

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA APLICADA Y CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

Tesis Doctoral

Optimización del diseño de vertederos de residuos sólidos basada en modelización

Miguel Cuartas Hernández

12/12/2012

Directores:

Amaya Lobo García de Cortázar

Valentín Arroyo Fernández

Therefore if we do not think that we are currently living in a computer simulation, we are not entitled to believe that we shall have descendants who will run lots of simulations of their forebears.

Nick Bostrom (Bostrom 2003)

Resumen

Los procesos que tienen lugar en un vertedero de residuos sólidos están interrelacionados. Cada variable de diseño influye en todos ellos y, por lo tanto, es difícil optimizar el diseño global teniendo en cuenta todas estas interacciones.

Este trabajo aporta un método de análisis de variables de diseño de vertederos basado en modelización, así como las herramientas y técnicas necesarias para ponerlo en práctica. El método consiste en lo siguiente:

- Se seleccionan las variables de diseño de interés y se les asigna dos o más valores habituales a cada una, en el rango que se desea estudiar.
- Se seleccionan diversos parámetros de control que describen los impactos y efectos que se desean valorar en el vertedero.
- Se crean variantes de un modelo real o teórico básico, con todas las combinaciones de las variables de diseño establecidas.
- Se simulan por computador todos los modelos creados obteniendo resultados para cada uno de los parámetros de control seleccionados.
- Se evalúan los resultados obtenidos con herramientas de análisis de datos y con representaciones gráficas de los mismos.
- Se extraen las conclusiones necesarias sobre las variables de diseño, ponderando los efectos e impactos que producen.

Para poner en práctica este método se han realizado las siguientes acciones:

- Se ha desarrollado un nuevo software de simulación de vertederos denominado Moduelo v4.
- Se ha adaptado el software de simulación al supercomputador Altamira, para poder realizar en paralelo el gran volumen de cálculos requerido.
- Se han seleccionado dos técnicas para el análisis de los resultados: los modelos de regresión lineal múltiple y los árboles de decisión.

Para comprobar la eficacia del método, se ha aplicado el mismo al análisis de las siguientes variables de diseño: Altura de capa, compactación del residuo, presencia de cobertura entre capas, aislamiento superficial en explotación y sellado del vertedero posclausura.

Se han analizado múltiples parámetros de control relacionados con la contaminación líquida y gaseosa emitida por el vertedero, la capacidad de generación de energía, los asentamientos superficiales, la estabilidad geotécnica y la contaminación remanente presente en el vertedero.

Además, se ha realizado el estudio para dos climas (cantábrico y mediterráneo) y dos tipos de residuos (“europeo” y “americano”) diferentes, de tal forma que se pueda analizar su influencia en los resultados.

Entre las conclusiones obtenidas, podemos destacar las siguientes:

- El método de trabajo propuesto es eficaz para el estudio de variables de diseño en vertederos.
- Las condiciones de contorno como el clima o el tipo de residuo influyen en el efecto de las variables de diseño de unos escenarios a otros.
- La altura de capa tiene una influencia comparativamente despreciable respecto al resto de variables estudiadas. Una altura de capa menor reduce la contaminación remanente y empeora la calidad del lixiviado.
- El efecto de la cobertura es muy importante. Su presencia disminuye el volumen de emisión de lixiviados y la contaminación remanente, permitiendo además generar más energía. No obstante, puede comprometer la estabilidad y aumentar los contaminantes emitidos.
- Una mayor compactación del residuo es beneficiosa ya que disminuye el asentamiento, favorece la estabilidad geotécnica y permite reducir la contaminación remanente.
- El aislamiento superficial y el sellado posclausura reducen los contaminantes líquidos emitidos por el vertedero, pero originan una mayor contaminación remanente.

Agradecimientos

A Amaya Lobo por su colaboración imprescindible en la creación del programa Moduelo v4 y en la consecución de este trabajo.

A Valentín Arroyo, Manuel Arroyo, Fernando Pérez y Oscar Valcuende por su generoso apoyo durante la elaboración de esta tesis.

A Ana López por su colaboración en la puesta a punto de Moduelo v4.

A mi mujer Rosa y a mi hija Alba por todo el tiempo que les he robado.

A mis padres, las dos personas que más admiro, por sus constantes ánimos.

Tabla de contenido

RESUMEN	V
AGRADECIMIENTOS	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABLAS	XV
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	3
1.2. CONTENIDOS DEL DOCUMENTO	4
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	7
2.1. SIMULACIÓN DE VERTEDEROS.....	7
2.2. MODELO. EVOLUCIÓN HISTÓRICA.....	15
2.3. MODELO. MODELOS TEÓRICOS.....	21
2.3.1. Hidrología superficial.....	22
2.3.2. Hidrología en el interior del vertedero.....	27
2.3.3. Biodegradación.....	34
2.3.4. Asentamientos.....	38
2.3.5. Gestión de lixiviados	42
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	49
3.1. INTRODUCCIÓN	49
3.2. VARIABLES DE DISEÑO	50
3.3. PARÁMETROS DE CONTROL.....	53
3.4. DEFINICIÓN DE LOS MODELOS DE VERTEDERO.....	59
3.4.1. Definición del modelo básico	59
3.4.1.1. Morfología base del modelo.....	59
3.4.1.2. Orden de llenado	61
3.4.1.3. Sistema de recolección de lixiviados.....	62
3.4.1.4. Gestión de la escorrentía superficial	63
3.4.2. Escenarios estudiados.....	64
3.4.2.1. Generación de residuos	64
3.4.2.2. Climatología.....	71
3.4.3. Adaptación del modelo básico a las variantes de diseño	73
3.4.3.1. Tipos de celda	74
3.4.3.2. Variantes en la morfología del modelo.....	79
3.4.3.3. Sistemas de recirculación	85
3.4.4. Relación final de las variantes del modelo.....	88
3.5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RESULTADOS	93
3.5.1. Introducción	93
3.5.2. Modelo de regresión lineal	95
3.5.2.1. Aplicación a un subconjunto de resultados	98
3.5.3. Árboles de decisión	105

CAPÍTULO 4. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	109
4.1. ANTECEDENTES.....	109
4.2. PLATAFORMA Y METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....	113
4.3. ÍNDICE DE MANTENIBILIDAD.....	115
4.4. MODELO DE DATOS.....	119
4.5. ESPECIFICACIONES FUNCIONALES.....	125
4.6. ARQUITECTURA DEL PROGRAMA.....	129
4.7. INTERACCIÓN CON EL USUARIO.....	133
4.8. PLATAFORMA DE SIMULACIÓN.....	141
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	145
5.1. INTRODUCCIÓN.....	145
5.2. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL.....	151
5.2.1. <i>Cantidad de lixiviado</i>	151
5.2.1.1. Cantidad de lixiviado durante el periodo de explotación.....	153
5.2.1.2. Cantidad de lixiviado durante el periodo posclausura.....	155
5.2.1.3. Cantidad de lixiviado total.....	159
5.2.1.4. Volumen máximo diario y mensual de lixiviado.....	161
5.2.2. <i>Cantidad de agua en el vertedero</i>	167
5.2.2.1. Cantidad máxima de agua.....	169
5.2.2.2. Cantidad final de agua.....	171
5.2.3. <i>Asentamientos</i>	175
5.2.4. <i>Contaminación remanente</i>	185
5.2.4.1. Consideraciones generales.....	185
5.2.4.2. Contaminación al final del periodo de explotación.....	190
5.2.4.3. Contaminación al final de la posclausura.....	193
5.2.4.4. Distribución de la contaminación remanente.....	193
5.2.5. <i>Emisión de metano y generación de energía</i>	201
5.2.5.1. Generación de metano.....	202
5.2.5.2. Generación de energía.....	203
5.2.6. <i>Calidad del lixiviado</i>	207
5.2.7. <i>Recirculación de lixiviados</i>	215
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	221
6.1. PRINCIPALES APORTACIONES.....	221
6.1.1. <i>Metodología y herramientas</i>	221
6.1.2. <i>Variables de diseño de vertederos</i>	224
6.2. CONCLUSIONES FINALES.....	231
6.3. LÍNEAS FUTURAS.....	233
REFERENCIAS.....	235
ANEXO I. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....	243
ANEXO II. MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL.....	303
ANEXO III. ÁRBOLES DE DECISIÓN.....	315

Lista de Figuras

ILUSTRACIÓN 1. MORFOLOGÍA BASE DEL MODELO.....	59
ILUSTRACIÓN 2. MORFOLOGÍA BASE DEL MODELO. CORTE TRANSVERSAL.....	60
ILUSTRACIÓN 3. MORFOLOGÍA BASE DEL MODELO. DISCRETIZACIÓN.....	60
ILUSTRACIÓN 4. PATRÓN DE LLENADO DE LAS CAPAS DE RESIDUO.....	61
ILUSTRACIÓN 5. DIAGRAMA DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS.....	62
ILUSTRACIÓN 6. TRATAMIENTO DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL.....	63
ILUSTRACIÓN 7. MODELOS CLIMÁTICOS. DATOS MEDIOS DIARIOS POR MESES.....	72
ILUSTRACIÓN 8. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. LEYENDA.....	81
ILUSTRACIÓN 9. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. DEFINICIÓN DE MORFOLOGÍA 1.....	82
ILUSTRACIÓN 10. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. DEFINICIÓN DE MORFOLOGÍA 2.....	82
ILUSTRACIÓN 11. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. DEFINICIÓN DE MORFOLOGÍA 3.....	82
ILUSTRACIÓN 12. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. DEFINICIÓN DE MORFOLOGÍA 4.....	83
ILUSTRACIÓN 13. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. DEFINICIÓN DE MORFOLOGÍA 5.....	83
ILUSTRACIÓN 14. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. DEFINICIÓN DE MORFOLOGÍA 6.....	83
ILUSTRACIÓN 15. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. DEFINICIÓN DE MORFOLOGÍA 7.....	84
ILUSTRACIÓN 16. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. DEFINICIÓN DE MORFOLOGÍA 8.....	84
ILUSTRACIÓN 17. MODELOS DE RECIRCULACIÓN. CAPAS AFECTADAS POR RIEGO SUPERFICIAL.....	86
ILUSTRACIÓN 18. MODELOS DE RECIRCULACIÓN. DISTRIBUCIÓN DE LOS POZOS EN PLANTA.....	87
ILUSTRACIÓN 19. MODELOS DE RECIRCULACIÓN. PROFUNDIDAD DE LOS POZOS.....	87
ILUSTRACIÓN 20. REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE EN MICROSOFT EXCEL.....	104
ILUSTRACIÓN 21. EJEMPLO DE ÁRBOL DE DECISIÓN.....	105
ILUSTRACIÓN 22. ÁRBOL DE DECISIÓN CON REGRESORES. CASOS DE PRUEBA VTOTAL.....	107
ILUSTRACIÓN 23. ÁRBOL DE DECISIÓN CON REGRESORES. CASOS DE PRUEBA ENERGIA TOTAL.....	108
ILUSTRACIÓN 24. ÁRBOL DE DECISIÓN CON REGRESORES. CASOS DE PRUEBA MAXSETT.....	108
ILUSTRACIÓN 25. MODELO ER. EJEMPLO DE REPRESENTACIÓN CONCEPTUAL.....	119
ILUSTRACIÓN 26. MODELO ER. SÍMBOLOS PARA LA CARDINALIDAD DE LAS RELACIONES.....	120
ILUSTRACIÓN 27. MODELO ER. DEFINICIÓN DEL VERTEDERO.....	121
ILUSTRACIÓN 28. MODELO ER. GENERACIÓN DE RESIDUOS.....	122
ILUSTRACIÓN 29. MODELO ER. CLIMATOLOGÍA.....	122
ILUSTRACIÓN 30. MODELO ER. SIMULACIONES Y RESULTADOS.....	123
ILUSTRACIÓN 31. MODUELO. ARQUITECTURA LÓGICA.....	130
ILUSTRACIÓN 32. MODUELO. ARQUITECTURA FÍSICA.....	131
ILUSTRACIÓN 33. INTERFACE DE USUARIO. ENTORNO MULTIDOCUMENTO.....	133
ILUSTRACIÓN 34. INTERFACE DE USUARIO. EXPLORADOR. TIPOS DE CELDA.....	135
ILUSTRACIÓN 35. INTERFACE DE USUARIO. EXPLORADOR. COMPONENTES DEL RESIDUO.....	136
ILUSTRACIÓN 36. INTERFACE DE USUARIO. EXPLORADOR. MODELOS Y SIMULACIONES.....	137
ILUSTRACIÓN 37. INTERFACE DE USUARIO. MENÚS CONTEXTUALES. TIPOS DE CELDA.....	138
ILUSTRACIÓN 38. INTERFACE DE USUARIO. MENÚS CONTEXTUALES. MODELOS.....	139
ILUSTRACIÓN 39. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN MODUELO v4.....	140
ILUSTRACIÓN 40. INTERFACE DE BIENVENIDA AL SUPERCOMPUTADOR ALTAMIRA.....	143
ILUSTRACIÓN 41. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN TOTAL DE LIXIVIADOS EMITIDOS.....	151
ILUSTRACIÓN 42. ÁRBOL DE DECISIÓN VTOTAL EXP.....	153
ILUSTRACIÓN 43. ÁRBOL DE DECISIÓN VTOTAL POS.....	155
ILUSTRACIÓN 44. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN TOTAL DE LIXIVIADOS EMITIDOS EN EL PERIODO DE POSCLAUSURA.....	156
ILUSTRACIÓN 45. ÁRBOL DE DECISIÓN VTOTAL.....	159

ILUSTRACIÓN 46. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN MENSUAL DE LIXIVIADOS.....	161
ILUSTRACIÓN 47. VOLUMEN MÁXIMO DIARIO DE LIXIVIADOS.....	162
ILUSTRACIÓN 48. VOLUMEN MÁXIMO MENSUAL DE LIXIVIADOS.....	162
ILUSTRACIÓN 49. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN MENSUAL DE LIXIVIADOS SEGÚN ESCENARIOS.....	163
ILUSTRACIÓN 50. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN DIARIO DE LIXIVIADOS.....	165
ILUSTRACIÓN 51. EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD TOTAL PRESENTE EN EL VERTEDERO.....	167
ILUSTRACIÓN 52. ÁRBOL DE DECISIÓN HUMEDADMAX.....	169
ILUSTRACIÓN 53. EFECTOS DE LA COBERTURA Y LA DENSIDAD EN LA HUMEDAD TOTAL.....	170
ILUSTRACIÓN 54. ÁRBOL DE DECISIÓN HUMEDADFINAL.....	171
ILUSTRACIÓN 55. EFECTO DEL SELLADO EN LA HUMEDAD FINAL. CLIMA CANTÁBRICO Y RESIDUO EUROPEO.....	172
ILUSTRACIÓN 56. DIFERENCIAS DE ASIENTO EN LA SUPERFICIE DEL VERTEDERO.....	175
ILUSTRACIÓN 57. ÁRBOL DE DECISIÓN MAXSETT.....	176
ILUSTRACIÓN 58. EFECTO DE LA ALTURA DE CAPA EN LOS ASIENTOS.....	177
ILUSTRACIÓN 59. EVOLUCIÓN DE LOS ASIENTOS PRIMARIO Y SECUNDARIO.....	178
ILUSTRACIÓN 60. MODELOS PARA TEST DE ASENTAMIENTOS.....	179
ILUSTRACIÓN 61. RESULTADO DEL TEST DE ASENTAMIENTOS. ASIENTO TOTAL.....	181
ILUSTRACIÓN 62. RESULTADO DEL TEST DE ASENTAMIENTOS. EVOLUCIÓN DEL ASENTAMIENTO PRIMARIO.....	184
ILUSTRACIÓN 63. RELACIÓN % SATURACIÓN Y % HIDRÓLISIS.....	186
ILUSTRACIÓN 64. DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE SATURACIÓN. R0_3_700_00_1_0_MA.....	187
ILUSTRACIÓN 65. DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE SATURACIÓN R0_5_700_00_1_0_MA.....	189
ILUSTRACIÓN 66. ÁRBOL DE DECISIÓN. TOTALCAREXP.....	190
ILUSTRACIÓN 67. DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE SATURACIÓN R0_3_900_00_1_0_MA.....	192
ILUSTRACIÓN 68. ÁRBOL DE DECISIÓN. TOTALCARPOS.....	193
ILUSTRACIÓN 69. DISTRIBUCIÓN DEL CARBONO SÓLIDO REMANENTE. FINAL PERIODO EXPLOTACIÓN.....	194
ILUSTRACIÓN 70. DISTRIBUCIÓN DEL CARBONO SÓLIDO REMANENTE. FINAL PERIODO POSCLAUSURA.....	195
ILUSTRACIÓN 71. DISTRIBUCIÓN DEL CARBONO DISUELTO REMANENTE. FINAL PERIODO EXPLOTACIÓN.....	196
ILUSTRACIÓN 72. DISTRIBUCIÓN DEL CARBONO DISUELTO REMANENTE. FINAL PERIODO POSCLAUSURA.....	197
ILUSTRACIÓN 73. DISTRIBUCIÓN DEL CARBONO SÓLIDO REMANENTE EN LA CAPA z=3.....	198
ILUSTRACIÓN 74. ÁRBOL DE DECISIÓN. CH4GENERADO.....	202
ILUSTRACIÓN 75. ÁRBOL DE DECISIÓN. ENERGIA TOTAL.....	203
ILUSTRACIÓN 76. EFECTO DE LA DENSIDAD EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN RESIDUO EUROPEO.....	205
ILUSTRACIÓN 77. EVOLUCIÓN DE LA ENERGÍA ANUAL GENERADA EN DIFERENTES MODELOS.....	205
ILUSTRACIÓN 78. ÁRBOL DE DECISIÓN. CODTOTALEXP.....	209
ILUSTRACIÓN 79. ÁRBOL DE DECISIÓN. CODTOTALPOS.....	211
ILUSTRACIÓN 80. ÁRBOL DE DECISIÓN. CODMAXMES.....	212
ILUSTRACIÓN 81. RECIRCULACIÓN POR POZOS. INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DE DISEÑO EN EL VOLUMEN RECIRCULADO.....	220
ILUSTRACIÓN 82. ÁRBOL DE DECISIÓN VTOTAL.....	315
ILUSTRACIÓN 83. ÁRBOL DE DECISIÓN VTOTALEXP.....	315
ILUSTRACIÓN 84. ÁRBOL DE DECISIÓN VTOTALPOS.....	316
ILUSTRACIÓN 85. ÁRBOL DE DECISIÓN VMAXDIA.....	316
ILUSTRACIÓN 86. ÁRBOL DE DECISIÓN VMAXMES.....	317
ILUSTRACIÓN 87. ÁRBOL DE DECISIÓN CODTOTAL.....	317
ILUSTRACIÓN 88. ÁRBOL DE DECISIÓN CODTOTALEXP.....	318
ILUSTRACIÓN 89. ÁRBOL DE DECISIÓN CODTOTALPOS.....	318
ILUSTRACIÓN 90. ÁRBOL DE DECISIÓN CODMAXMES.....	319
ILUSTRACIÓN 91. ÁRBOL DE DECISIÓN CODMAXCONMES.....	319
ILUSTRACIÓN 92. ÁRBOL DE DECISIÓN NH4TOTAL.....	320
ILUSTRACIÓN 93. ÁRBOL DE DECISIÓN NH4TOTALEXP.....	320
ILUSTRACIÓN 94. ÁRBOL DE DECISIÓN NH4TOTALPOS.....	321
ILUSTRACIÓN 95. ÁRBOL DE DECISIÓN NH4MAXMES.....	321

ILUSTRACIÓN 96. ÁRBOL DE DECISIÓN NH4MAXCONMES.....	322
ILUSTRACIÓN 97. ÁRBOL DE DECISIÓN CH4GENERATED.....	322
ILUSTRACIÓN 98. ÁRBOL DE DECISIÓN ENERGIATOTAL.....	323
ILUSTRACIÓN 99. ÁRBOL DE DECISIÓN CH4RESIDUAL.....	323
ILUSTRACIÓN 100. ÁRBOL DE DECISIÓN MAXSETT.....	324
ILUSTRACIÓN 101. ÁRBOL DE DECISIÓN AVGSETT.....	324
ILUSTRACIÓN 102. ÁRBOL DE DECISIÓN AVGSETTEXP.....	325
ILUSTRACIÓN 103. ÁRBOL DE DECISIÓN DIFFSETT.....	325
ILUSTRACIÓN 104. ÁRBOL DE DECISIÓN MINSETT.....	326
ILUSTRACIÓN 105. ÁRBOL DE DECISIÓN SOLIDCARBONEXP.....	326
ILUSTRACIÓN 106. ÁRBOL DE DECISIÓN TOTALCARBONEXP.....	327
ILUSTRACIÓN 107. ÁRBOL DE DECISIÓN SOLIDCARBONPOS.....	327
ILUSTRACIÓN 108. ÁRBOL DE DECISIÓN TOTALCARBONPOS.....	328
ILUSTRACIÓN 109. ÁRBOL DE DECISIÓN FINALCELLNH4.....	328
ILUSTRACIÓN 110. ÁRBOL DE DECISIÓN HUMEDADMAX.....	329
ILUSTRACIÓN 111. ÁRBOL DE DECISIÓN HUMEDADFINAL.....	329

Lista de Tablas

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE LIXIVIADOS.....	62
TABLA 2. COMPONENTES DEL RESIDUO. DESCOMPOSICIÓN EN ELEMENTOS QUÍMICOS.	64
TABLA 3. COMPONENTES DEL RESIDUO. PROPIEDADES.....	65
TABLA 4. MODELO DE RESIDUOS EUROPEO. COMPOSICIÓN INICIAL DE LOS RESIDUOS.	66
TABLA 5. MODELO DE RESIDUOS EUROPEO. REDUCCIÓN DEL VERTIDO DE MATERIA ORGÁNICA.....	67
TABLA 6. MODELO DE RESIDUOS EUROPEO. RECICLAJE DE MATERIALES DE ENVASADO.....	67
TABLA 7. MODELO DE RESIDUOS EUROPEO. GENERACIÓN ANUAL POR COMPONENTES.	68
TABLA 8. MODELO DE RESIDUOS AMERICANO. GENERACIÓN ANUAL POR COMPONENTES.	69
TABLA 9. MODELO DE RESIDUOS. DATOS GLOBALES GENERALES.	70
TABLA 10. MODELO DE RESIDUOS. DATOS GLOBALES POR ELEMENTOS QUÍMICOS.....	70
TABLA 11. MODELOS CLIMÁTICOS. DATOS MEDIOS DIARIOS GLOBALES.	71
TABLA 12. TIPOS DE CELDA. PROPIEDADES DEL SUELO DRENANTE.	75
TABLA 13. TIPOS DE CELDA RESIDUO. RELACIÓN CON LAS VARIABLES DE DISEÑO.	75
TABLA 14. TIPOS DE CELDA RESIDUO. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD.	76
TABLA 15. TIPOS DE CELDA RESIDUO. PROPIEDADES DE LA COBERTURA.	76
TABLA 16. TIPOS DE CELDA RESIDUO. INFLUENCIA DE LA COBERTURA.....	76
TABLA 17. TIPOS DE CELDA RESIDUO. PROPIEDADES COMUNES.	77
TABLA 18. TIPOS DE CELDA RESIDUO SELLADO. RELACIÓN CON LAS VARIABLES DE DISEÑO.	78
TABLA 19. TIPOS DE CELDA RESIDUO SELLADO. INFLUENCIA DEL TIPO DE SELLADO.	78
TABLA 20. TIPOS DE CELDA. RELACIÓN CON LAS VARIABLES DE DISEÑO.....	79
TABLA 21. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. RELACIÓN CON LAS VARIABLES DE DISEÑO.	81
TABLA 22. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. ALTURA DE LA CAPA DE SELLADO Y ERROR ABSOLUTO.	84
TABLA 23. MORFOLOGÍAS DEL MODELO. PENDIENTES LATERALES Y SUPERFICIE DE LA CAPA SUPERIOR.....	85
TABLA 24. VALORES DE LAS VARIABLES DE DISEÑO.	88
TABLA 25. VARIANTES BÁSICAS DEL MODELO. RELACIÓN CON LAS VARIABLES DE DISEÑO.	89
TABLA 26. VARIANTES BÁSICAS DEL MODELO. RELACIÓN CON TIPOS DE CELDA Y MORFOLOGÍAS.	90
TABLA 27. VARIANTES BÁSICAS DEL MODELO. CASOS ESTUDIADOS DE UNA VARIANTE BÁSICA.	91
TABLA 28. EJEMPLO DE REGRESIÓN. NORMALIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO.	98
TABLA 29. EJEMPLO DE REGRESIÓN. SUBCONJUNTO DE RESULTADOS.....	99
TABLA 30. EJEMPLO DE REGRESIÓN. SUBCONJUNTO DE RESULTADOS NORMALIZADO.	100
TABLA 31. EJEMPLO DE REGRESIÓN. REGRESIÓN LINEAL SIMPLE.....	101
TABLA 32. EJEMPLO DE REGRESIÓN. REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.	102
TABLA 33. PLATAFORMAS PARA TESTS DE RENDIMIENTO DE LAS SIMULACIONES.....	142
TABLA 34. RESULTADOS DE LOS TESTS DE RENDIMIENTO EN LAS PLATAFORMAS.	143
TABLA 35. COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN Y ERRORES ESTÁNDAR DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN.....	147
TABLA 36. COEFICIENTES DE REGRESIÓN DESTACADOS PARA LAS VARIABLES DE DISEÑO CAPA, DENSIDAD Y COBERTURA.	149
TABLA 37. COEFICIENTES DE REGRESIÓN DESTACADOS PARA LAS VARIABLES DE DISEÑO AISLAMIENTO Y SELLADO.	150
TABLA 38. RESULTADOS DEL TEST DE ASENTAMIENTOS.	180
TABLA 39. COEFICIENTES DE REGRESIÓN PARA LAS VARIABLES DE DISEÑO RIEGO Y POZOS.....	216
TABLA 40. VOLUMEN TOTAL RECIRCULADO (M ³) SEGÚN MODELO. PARTE 1.....	218
TABLA 41. VOLUMEN TOTAL RECIRCULADO (M ³) SEGÚN MODELO. PARTE 2.....	219
TABLA 42. EFECTOS DE LAS VARIABLES DE DISEÑO SEGÚN ESCENARIOS.	230
TABLA 43. EFECTOS GLOBALES DE LAS VARIABLES DE DISEÑO.....	230
TABLA 44. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	243
TABLA 45. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	244

TABLA 46. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4).	245
TABLA 47. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	246
TABLA 48. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. ASENTAMIENTOS.	247
TABLA 49. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	248
TABLA 50. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	249
TABLA 51. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	250
TABLA 52. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4).	251
TABLA 53. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	252
TABLA 54. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. ASENTAMIENTOS.	253
TABLA 55. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	254
TABLA 56. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	255
TABLA 57. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	256
TABLA 58. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4).	257
TABLA 59. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	258
TABLA 60. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. ASENTAMIENTOS.	259
TABLA 61. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	260
TABLA 62. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	261
TABLA 63. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD). ..	262
TABLA 64. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4). ..	263
TABLA 65. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA. ..	264
TABLA 66. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. ASENTAMIENTOS.	265
TABLA 67. RESULTADOS SIN RECIRCULACIÓN. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CONTAMINACIÓN REMANENTE. .	266
TABLA 68. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	267
TABLA 69. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	267
TABLA 70. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4).	268
TABLA 71. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	268
TABLA 72. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. ASENTAMIENTOS.	269
TABLA 73. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	269
TABLA 74. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	270
TABLA 75. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	270
TABLA 76. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4).	271
TABLA 77. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	271
TABLA 78. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. ASENTAMIENTOS.	272
TABLA 79. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	272
TABLA 80. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	273
TABLA 81. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	273
TABLA 82. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4).	274
TABLA 83. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	274
TABLA 84. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. ASENTAMIENTOS.	275
TABLA 85. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	275
TABLA 86. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	276
TABLA 87. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD). ..	276
TABLA 88. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4). ..	277
TABLA 89. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	277
TABLA 90. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. ASENTAMIENTOS.	278
TABLA 91. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RS. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CONTAMINACIÓN REMANENTE. .	278
TABLA 92. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	279
TABLA 93. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	280
TABLA 94. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4).	281
TABLA 95. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	282

TABLA 96. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. ASENTAMIENTOS.	283
TABLA 97. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - EUROPEO. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	284
TABLA 98. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	285
TABLA 99. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	286
TABLA 100. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4). ...	287
TABLA 101. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	288
TABLA 102. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. ASENTAMIENTOS.	289
TABLA 103. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO CANTÁBRICO - AMERICANO. CONTAMINACIÓN REMANENTE. ...	290
TABLA 104. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	291
TABLA 105. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD). ..	292
TABLA 106. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4). ..	293
TABLA 107. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA. ...	294
TABLA 108. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. ASENTAMIENTOS.	295
TABLA 109. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - EUROPEO. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	296
TABLA 110. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	297
TABLA 111. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. (COD).	298
TABLA 112. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. (NH4).	299
TABLA 113. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA. ...	300
TABLA 114. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. ASENTAMIENTOS.	301
TABLA 115. RESULTADOS RECIRCULACIÓN RP. ESCENARIO MEDITERRÁNEO - AMERICANO. CONTAMINACIÓN REMANENTE. ...	302
TABLA 116. MODELOS DE REGRESIÓN SIN RECIRCULACIÓN. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	303
TABLA 117. MODELOS DE REGRESIÓN SIN RECIRCULACIÓN. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	304
TABLA 118. MODELOS DE REGRESIÓN SIN RECIRCULACIÓN. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4).	305
TABLA 119. MODELOS DE REGRESIÓN SIN RECIRCULACIÓN. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	306
TABLA 120. MODELOS DE REGRESIÓN SIN RECIRCULACIÓN. ASENTAMIENTOS.	307
TABLA 121. MODELOS DE REGRESIÓN SIN RECIRCULACIÓN. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	308
TABLA 122. MODELOS DE REGRESIÓN CON RECIRCULACIÓN. CANTIDAD DE LIXIVIADOS.	309
TABLA 123. MODELOS DE REGRESIÓN CON RECIRCULACIÓN. CALIDAD DEL LIXIVIADO (COD).	310
TABLA 124. MODELOS DE REGRESIÓN CON RECIRCULACIÓN. CALIDAD DEL LIXIVIADO (NH4).	311
TABLA 125. MODELOS DE REGRESIÓN CON RECIRCULACIÓN. BIOGÁS Y CANTIDAD DE AGUA.	312
TABLA 126. MODELOS DE REGRESIÓN CON RECIRCULACIÓN. ASENTAMIENTOS.	313
TABLA 127. MODELOS DE REGRESIÓN CON RECIRCULACIÓN. CONTAMINACIÓN REMANENTE.	314

Capítulo 1. Introducción

Dentro del campo de las ciencias de la computación existe un sub-área denominado computación científica (Denning 2000). La computación científica trata de solucionar problemas complejos surgidos de las ciencias naturales y de la ingeniería a través de modelos matemáticos que describen fenómenos y procesos físicos y químicos. En cierto sentido, puede considerarse actualmente como la tercera vía de la ciencia junto con las dos clásicas: teoría y experimentación.

La computación científica ha contribuido con modelos y algoritmos para dar solución a grandes retos en múltiples campos, como en física (ej. demostrando la existencia de ciertos quarks), aerodinámica y dinámica de fluidos (ej. simulaciones del campo de flujo de aire alrededor de un avión en vuelo), química (ej. diseñando enzimas y proteínas que atacan selectivamente a virus), biología (ej. encajando fragmentos de la secuencia del DNA dentro del genoma humano), geología (ej. predicción de terremotos), astronomía (ej. localizando la masa perdida del universo), meteorología (ej. predicciones meteorológicas a largo plazo), ciencias de la tierra (ej. analizando la relación entre las corrientes marinas y el clima mundial), mecánica estructural (ej. efectos del viento o de los terremotos en la estabilidad de edificios), electromagnetismo (ej. emplazamiento óptimo de antenas) e ingeniería (ej. interacción entre superficies de control y movimientos de estrés dinámico en estructuras).

La computación científica tiene un marcado carácter multidisciplinar, ya que unifica tres elementos distintos (Daniluk 2012): (i) modelizado, algoritmos y simulaciones dentro del campo de aplicación, (ii) desarrollo de software y (iii) ciencias de la información y los computadores para desarrollar y optimizar sistemas hardware avanzados, sistemas de red y comunicaciones o componentes de gestión de datos eficientes.

Sin duda es un campo en auge ya que actualmente es difícil encontrar un área en la ciencia o la ingeniería que no haga uso de computadores. La simulación por computador no solo es útil para explorar escenarios imprevistos o inaccesibles, también es útil para analizar una gran variedad de escenarios normales que, de otra forma, necesitarían de un tiempo y un coste inasumible para su investigación. En los experimentos científicos y en los diseños de ingeniería, las simulaciones por computador permiten probar un gran conjunto de escenarios y operaciones mucho más rápidamente, con un menor coste y con más seguridad que con los métodos tradicionales de creación de prototipos y experimentación.

El presente trabajo utiliza la computación científica como herramienta para el estudio de los vertederos de residuos sólidos.

Un vertedero de residuos sólidos es una obra civil en continua construcción, en cuyo funcionamiento intervienen diversos factores tanto ambientales (terreno sobre el que se asienta, meteorología a la que está sometido...), como de diseño (patrón de llenado, altura de capa, grado de compactación del residuo, tipo de impermeabilización, sistemas de recolección de lixiviados, sistemas de extracción de biogás, sistema de cobertura para el sellado final...).

Se trata además de una obra que, por su naturaleza, produce impactos significativos en varios sentidos:

- Ocupación del suelo
- Generación de contaminación líquida
- Generación de contaminación atmosférica
- Generación de energía
- Riesgo de accidentes y contaminación

Existe una gran complejidad a la hora de determinar los impactos que, a lo largo de la vida del vertedero, van a producir las decisiones de diseño que se tomen inicialmente en la etapa de planificación o durante el periodo de explotación del mismo.

Por ejemplo, si se desea maximizar la producción de energía mediante el biogás captado a lo largo de la vida del vertedero, ¿tiene sentido que aumente la altura de capa de vertido o quizás es independiente la cantidad de energía obtenida con respecto a dicha altura de capa?

La complejidad no solo radica en cuantificar una relación causa - efecto individual entre una decisión de diseño y un objetivo deseable ya que, por ejemplo, medidas que inicialmente pueden suponer un ahorro económico, pueden empeorar las condiciones de explotación e incluso provocar impactos cuyas consecuencias den lugar a un coste mucho mayor en el futuro.

Para abordar esta complejidad, se utiliza aquí la computación científica como instrumento para modelizar y simular múltiples escenarios y, a través de ellos, obtener metodologías y criterios para el diseño de vertederos de residuos sólidos urbanos.

1.1. Objetivos

A la hora de diseñar un vertedero existen diferentes variables para las cuales es necesario establecer un valor: Altura de capa de vertido de residuos, espesor de cobertura en caso de utilizarla, grado de compactación de los residuos, políticas de recirculación de lixiviados, etc. Se define el término "variables de diseño" para hacer referencia a cada uno de estos aspectos.

Para poder establecer los mejores valores posibles para las variables de diseño es necesario obtener unos indicadores que representen los resultados globales del vertedero desde diferentes puntos de vista. Se define el término "parámetros de control" para referenciar a estos indicadores, por ejemplo, volumen total de lixiviados generados por el vertedero, carga de DQO emitida, asiento máximo producido, capacidad de generación de energía, etc.

El objetivo principal de esta tesis es desarrollar y poner en práctica una estrategia para obtener los mejores valores posibles de las variables de diseño que cumplan con las expectativas vinculadas a los parámetros de control en un determinado vertedero ya sea real o teórico.

El objetivo secundario consiste en la evaluación de diferentes variables de diseño concretas para obtener su importancia relativa y su influencia en parámetros de control seleccionados, en diferentes escenarios.

Como herramienta de trabajo principal se utilizan simulaciones por computador de diferentes configuraciones de vertederos. Las configuraciones representan variaciones en las variables de diseño a analizar y las simulaciones permiten conocer los valores de los parámetros de control para cada una de ellas.

Para lograr los objetivos señalados es necesario cumplir inicialmente otra serie de objetivos parciales entre los que se pueden destacar los siguientes:

- Identificar las variables de diseño que se van a someter a estudio y los parámetros de control más adecuados para evaluar los resultados.
- Definir una tipología de vertedero base sobre la cual poder realizar diferentes configuraciones con las variables de diseño. Este vertedero base debe permitir asignar diferentes valores a una variable de diseño sin variar apreciablemente el resto de características del mismo.
- Obtener una plataforma de simulación que permita realizar una gran cantidad de simulaciones en un tiempo razonable y con la cantidad de resultados requerida, y una metodología de análisis para tratar de forma sistemática los resultados obtenidos.

1.2. Contenidos del documento

En el capítulo 2 “Revisión de la literatura” de este documento se presentan aquellos modelos, tecnologías y programas comerciales de relevancia en el estudio de vertederos de residuos sólidos. Así mismo, se hace un recorrido por la evolución histórica del software de simulación de vertederos “Moduelo” referenciando la literatura científica y técnica más destacable relacionada con este programa, que pone de manifiesto su consolidación a lo largo de los últimos años. Por último, se describen brevemente los modelos teóricos y matemáticos presentes en Moduelo v3 que han servido como punto de partida para el desarrollo de la nueva versión.

En el capítulo 3 “Metodología” se describe la estrategia seguida para el estudio de criterios de diseño de vertederos basados en modelización. Para documentar dicha estrategia, se pone en práctica un ejemplo concreto. En primer lugar, se seleccionan un conjunto de variables de diseño objeto de estudio. A continuación, se seleccionan varios parámetros de control significativos para cuantificar los impactos que un vertedero puede producir.

Una vez definidas las variables de diseño, se define un modelo teórico básico de vertedero, y sobre él se aplican todas las combinaciones posibles de dichas variables en diferentes escenarios (de generación de residuos y climatológicos). De esta forma se establecen todas las variantes del modelo básico que es necesario simular.

Por último, para finalizar el apartado de metodología, se presentan las técnicas de análisis de resultados que se han utilizado para estudiar los datos generados por las simulaciones y para obtener conclusiones acerca de las variables de diseño estudiadas.

En el capítulo 4 “Herramienta de simulación”, se presenta el programa y la plataforma utilizados para la realización de las simulaciones. Si bien es verdad que forma parte de la metodología empleada, y como tal debería aparecer en el capítulo anterior, se ha creado un capítulo independiente para dotarlo de entidad propia. La herramienta de simulación desarrollada (Moduelo v4), en sí misma, está resultando en la actualidad de utilidad en el estudio de vertederos más allá del alcance de este trabajo.

Se presenta la herramienta de simulación Moduelo v4 desde diferentes enfoques, entre ellos, la metodología de desarrollo empleada, el modelo de datos diseñado para representar el vertedero, las especificaciones funcionales del sistema, aspectos de la interacción con el usuario y la plataforma de simulación utilizada para la ejecución de este trabajo.

En el capítulo 5 “Análisis de resultados” se presentan y discuten, de forma organizada, los diferentes resultados obtenidos para los parámetros de control. Para estudiar la vinculación entre las variables de diseño y los parámetros de control, se emplean las herramientas de análisis presentadas en el capítulo de metodología, en concreto, la regresión lineal y los árboles de decisión.

En el capítulo 6 “Conclusiones” se presentan las aportaciones de este trabajo, las conclusiones obtenidas y, por último, las ideas de desarrollo y líneas de investigación a seguir en un futuro. Las aportaciones y conclusiones se establecen en diferentes niveles. En primer lugar, respecto a la búsqueda de una metodología de análisis de criterios de diseño. En segundo lugar, respecto a la producción de una nueva herramienta de simulación de vertederos y sus características diferenciales. Y, en tercer lugar, respecto al análisis de unas variables de diseño de vertederos en particular.

Capítulo 2. Revisión de la literatura

2.1. Simulación de vertederos

A continuación, se enumeran modelos, tecnologías y programas comerciales utilizados para la realización de cálculos sobre los principales fenómenos que tienen lugar en vertederos de residuos sólidos (hidrológicos, degradación, generación de gas, asentamientos...). Algunas referencias se han extraído de la lista presentada en (Miliarium 2004) contrastando la información con las fuentes originales. Se ha completado dicha lista con programas que modelan específicamente la generación de gas y con programas en desarrollo, de plena vigencia en la actualidad, que integran varios de los procesos que tienen lugar en los vertederos.

EPA-1975 (*Fenn, Hanley y Degeare 1975*)

Método de cálculo del balance hídrico que permite predecir la generación de lixiviados en vertederos mediante los coeficientes de escorrentía y los valores de almacenamiento de humedad de los residuos urbanos que ellos mismos aportan. Basado en el modelo de balance hídrico de (Thorntwaite y Mather 1957) acerca de la estimación de las pérdidas por evaporación y de las pérdidas por escorrentía superficial y por infiltración.

Como datos de entrada utiliza valores medios de precipitaciones mensuales y como datos de salida ofrece datos de percolación y de escorrentía superficial. No considera los flujos laterales correspondientes a aguas de percolación y/o a aguas de lixiviados ni el tipo de cubierta instalada.

CREAMS (Chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems) (*Knisel 1980*)

Modelo para predecir la escorrentía, la erosión/sedimentación y el transporte químico en sistemas de gestión agrícola. Como entrada admite datos meteorológicos (precipitación, radiación y temperatura) y datos sobre la gestión agrícola del terreno y como datos de salida ofrece información acerca de la evapotranspiración, escorrentía superficial (erosión y sedimentación), infiltración y almacenamiento de agua y sustancias químicas en el suelo. No considera el flujo horizontal, únicamente modeliza el transporte vertical (es unidimensional).

HSSWDS (Hydrologic simulation on waste disposal sites) (Perrier y Gibson 1980)

Modelo para calcular la infiltración producida en vertederos. Es un modelo determinista de una dimensión adaptado del modelo CREAMS. Como datos de entrada admite datos hidrológicos, climatológicos y características del suelo empleado como material de cobertura. A partir de ellos realiza un análisis secuencial para obtener balances hidrológicos incluyendo escorrentía, infiltración y evapotranspiración.

UNSAT-H (Unsaturated soil water and heat flow model) (Fayer 2000)

Modelo desarrollado por el Pacific Northwest National Laboratory para el departamento de energía de los Estados Unidos. Es capaz de simular el flujo unidimensional de agua, vapor y calor en suelos. Tiene en cuenta los procesos de precipitación, evaporación, transpiración, almacenamiento e infiltración. Utiliza la ecuación de Richards para calcular los flujos de agua, la ley de Fick para la difusión del vapor y la ecuación de Fourier para el flujo de calor.

HELP (The hydrologic evaluation of landfill performance) (Schroeder, y otros 1994)

Modelo hidrológico cuasi-bidimensional para el análisis de los movimientos de agua en vertederos. El modelo acepta datos sobre climatología, características del suelo y criterios de diseño del vertedero. Tiene en cuenta efectos como el almacenamiento superficial, el deshielo, la escorrentía superficial, la infiltración, la evapotranspiración, el crecimiento vegetal, el almacenamiento de humedad del terreno, el drenaje lateral subterráneo, la recirculación de lixiviados, el drenaje vertical en flujo no saturado y las fugas a través del terreno o de las geo-membranas. El programa facilita el análisis de los balances hídricos y la estimación de escorrentía, evapotranspiración, drenaje, recolección de lixiviados y fugas perimetrales en la operación de un amplio abanico de diseños de vertederos.

El modelo HELP es el más aceptado y contrastado de los de su clase. La agencia de protección medioambiental de Estados Unidos (EPA) recomienda su utilización para el diseño de vertederos de residuos sólidos.

WHI UnSat Suite Plus (Scientific Software Group 1998)

Programa diseñado para el análisis del flujo subterráneo de agua y transporte de contaminantes en zona no saturada. Es un modelo unidimensional que realiza sus cálculos sobre una delgada columna de suelo. Combina varios modelos de cálculo en zona no saturada:

- SESOIL (Seasonal flow and transport model for the unsaturated soil zone) para calcular el transporte y destino de contaminantes a largo plazo en zona no saturada.
- VS2DT (Variably saturated 2D flow and transport model) para simular los procesos de flujo y transporte subterráneos en suelos heterogéneos y no saturados.
- VLEACH (Vadose zone leaching model) para predecir la migración vertical de hidrocarburos volátiles.
- PESTAN (Pesticide analytical model) para estimar la migración de pesticidas agrícolas.
- HELP (Hydrologic evaluation of landfill performance model) para predecir las recargas estacionales en condiciones de suelo heterogéneas y bajo condiciones ambientales variables.

MIGRATE v9

Modelo desarrollado para calcular el transporte de contaminantes de diversos orígenes ya sean en superficie o enterrados. Realiza cálculos en dos dimensiones mediante una técnica de capas finitas muy poco exigente computacionalmente. Considera, además de la advección y de la dispersión, los fenómenos de adsorción, las tasas de degradación biológica y radioactiva y el transporte a través de fracturas. Es capaz de calcular concentraciones de contaminantes para profundidades, distancias y tiempos determinados.

Modelos de generación de gas

(Kamalan, Sabour y Shariatmadari 2011) publicaron una revisión actualizada de distintos modelos de generación de gas que se han desarrollado y empleado en los últimos años, fundamentalmente para estimar el posible aprovechamiento energético del vertedero y/o sus emisiones de efecto invernadero. Se trata de modelos sencillos, que sólo tienen en cuenta la cantidad y tipo de residuos vertidos, agrupando en un número muy limitado de parámetros globales (habitualmente uno sólo, la velocidad de degradación), el efecto de las condiciones ambientales y de explotación. Entre estos modelos se han implementado en software y destacan el GasSim y Landgem, que son los que se describen a continuación.

GASSIM 2.5

GasSim (Golder Associates 2012) es un software desarrollado para la Agencia de Medio Ambiente de Gran Bretaña como herramienta para evaluar los riesgos y planificar la gestión del gas generado en los vertederos.

Teniendo en cuenta los datos de cantidad y composición de residuos vertidos y la secuencia de llenado, el programa simula la generación de gas a lo largo del tiempo. Basado en estos resultados estima las emisiones resultantes según las estrategias de gestión (combustión en motores, en antorcha), y su impacto en el entorno mediante modelos sencillos de dispersión y migración. Uno de los elementos clave del software es la representación de la incertidumbre de los parámetros de entrada mediante la aproximación probabilística de Monte Carlo.

Para simular la generación de biogás, el residuo se caracteriza por tres fracciones, según su velocidad de degradación (Clewes, y otros 2008). Las tres fracciones se degradan siguiendo leyes de primer orden respecto al carbono biodegradable disponible, suponiendo que el 99% del mismo se convierte en metano. Para representar el residuo el programa incluye valores por defecto de contenido en humedad, celulosa y hemicelulosa, que el usuario puede variar si dispone de información suficiente.

Hoy en día es el modelo aceptado por defecto por la Agencia de Medio Ambiente Británica para evaluación de emisiones en vertederos (el uso de otros modelos debe ser justificado, mientras que los resultados obtenidos por GasSim son aceptados directamente).

LandGEM 3.02

LandGEM (Alexander, Burklin y Singleton 2005) es un modelo desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), que se distribuye libremente. Utiliza una ley de descomposición de la materia orgánica de primer orden para estimar las emisiones anuales de gas de vertedero durante un período de tiempo determinado (Thorneloe, y otros 1999).

Los datos de entrada necesarios son: capacidad del vertedero, cantidad anual de residuos vertidos, potencial y tasa de generación de metano y concentración de compuestos orgánicos volátiles. La EPA propone valores para los principales parámetros del modelo, potencial y tasa de generación de metano, basados en la composición típica de los residuos en los Estados Unidos, y en el ajuste a partir de datos de explotación en distintas instalaciones del país.

Como resultados del modelo se obtienen las tasas anuales de emisión de metano y otros compuestos orgánicos a lo largo del tiempo.

Por su sencillez, hoy en día es un modelo muy utilizado en distintos lugares del mundo, adaptando los valores paramétricos a las circunstancias locales.

Programas integrados en desarrollo

(Bente 2011) hizo una revisión exhaustiva de los modelos de fenómenos de vertederos de residuos urbanos desarrollados en los últimos años. Entre ellos, son pocos los que consideran las interacciones entre los fenómenos hidráulicos, mecánicos y de degradación, y de éstos sólo tres en la actualidad han sido implementados en software para uso general, más allá de los casos en los que fueron creados. Estos programas son Moduelo, que se describe en los apartados siguientes, y LDAT y HBM, que se presentan brevemente a continuación.

LDAT

LDAT es un programa de simulación de la degradación y el transporte de contaminantes en vertederos desarrollado en la Universidad de Southampton. Surgió como apoyo a la investigación en laboratorio y en campo sobre fenómenos en vertederos.

La representación del vertedero se estructura en una malla bidimensional de diferencias finitas con elementos de volumen constante. Partiendo de un algoritmo básico que permite la simulación acoplada de fenómenos de transporte de líquido y gas en los poros del residuo (White, Robinson y Ren 2003), ha ido incorporando modelos de simulación de degradación de residuos y generación de biogás (White, Robinson y Ren 2004), y en los últimos años de asentamientos y equilibrio químico (White y Nayagum 2011).

En cada caso puede adaptarse la geometría de la malla y las propiedades de cada elemento. El modelo considera distintos tipos de residuo, que se introducen como porcentajes del residuo total. Cada tipo tiene distintas vías de degradación, con tasas de degradación diferentes, que se pueden definir a través del parámetro de biodisponibilidad y el factor catalítico. Tienen en cuenta el efecto de la humedad en las tasas de degradación según lo observado por (Burton, Beaven y White 2004).

El flujo se modeliza a partir de leyes que relacionan el grado de saturación líquida con la presión capilar, las densidades efectivas del gas y el líquido, las permeabilidades gaseosa y líquida y la densidad sólida.

La interrelación gas-líquido se tiene en cuenta modelizando la solubilidad de los gases y los cambios de fase del agua. El efecto de las tensiones efectivas sobre la densidad y la permeabilidad se simula según (Powrie y Beaven 1999).

Además se simula la transferencia de calor mediante parámetros de calor específico y conductividad térmica, relacionando la generación de calor con la de biogás. Como resultado se obtiene la temperatura, de la que dependen la viscosidad del líquido y el gas, las tasas de metabolismo biológico, el pH y el factor de inhibición por pH.

Como resultados del programa se obtienen las evoluciones históricas de las propiedades de cada elemento de la discretización: contenidos sólidos, líquidos, ácidos y gases, gas emitido, poblaciones bacterianas y asentamiento.

El modelo se ha utilizado y desarrollado como complemento a investigaciones relacionadas con la compresión y consolidación de residuos que se van degradando en distintas condiciones (con recirculación de lixiviados, tratamiento aeróbico, lavado por arrastre de contaminantes) (Hudson, y otros 2004) y (Rees-White, y otros 2008) y en investigaciones sobre el flujo vertical acoplado (humedad-gas) en relación a las fuerzas capilares (D. Nayagum, J. White, y otros 2009a) y (Zardava, Powrie y White 2009).

Hasta el momento sólo se ha contrastado su aplicación en instalaciones reales en dos ocasiones: simulando el flujo a partir de un pozo horizontal en el vertedero Rainham (Beaven, White y Lucas 2005), y simulando la degradación del residuo y el flujo de gas y calor en un experimento de aireación en el vertedero de Pitsea (Gran Bretaña) (Nayagum, White, y otros 2009b).

HBM (Napier University s.f.)

El modelo HBM (Hydro-Bio-Mechanical), desarrollado en la Universidad de Napier de Edimburgo, también está basado en un esquema bidimensional de diferencias finitas. El esquema adoptado permite considerar efectos importantes en vertederos reales, como distintas geometrías, la heterogeneidad del residuo, anisotropías, o el proceso de llenado. Incluye tres modelos o “sistemas” principales: hidráulico, mecánico y biodegradación. Estos sistemas están enlazados con rutinas que permiten considerar el efecto de cada fenómeno principal en los otros, modificando el valor de algunas variables o parámetros.

La hidráulica se simula con un modelo de flujo no saturado, gobernado por las curvas de van Genuchten. Para tener en cuenta la influencia de la sobrecarga sobre el residuo, la conductividad hidráulica saturada se calcula en función de la porosidad del residuo (McDougall y Hay 2005).

El modelo de biodegradación simplifica el proceso en dos fases, en las que las variables que controlan la velocidad de degradación son las concentraciones de ácidos volátiles y de biomasa metanogénica (McDougall y Philp 2001). La primera fase, que representa la disolución de la materia sólida, es la hidrólisis enzimática, que depende del contenido de humedad y la “digestibilidad” de la fracción degradable del residuo, y se ve inhibida por los productos de la descomposición (representados por los ácidos grasos volátiles). La segunda fase, metanogénesis, se modeliza como función de Monod con los ácidos volátiles como sustrato. Para simular el transporte de los productos de degradación se tiene en cuenta, además del flujo advectivo, el difusivo.

El modelo mecánico agrupa los asentamientos por sobrecarga, fluencia y biodegradación (McDougall y Pyrah 2003). La compresión por sobrecarga se modeliza con una expresión simplificada del comportamiento elastoplástico: el Modified Cam Clay. Para tener en cuenta también la viscosidad, se modeliza la fluencia en función del tiempo, mediante el modelo de (Yin y Graham 1989). Finalmente, el efecto de la degradación se introduce con un parámetro de relación pérdida de masa – asentamiento (McDougall y Pyrah 2004).

Los modelos incorporados en HBM se han tomado de resultados de otros autores y distintas experiencias de comprobación parcial. Para el uso integrado de los modelos en simulación de distintos casos, se ha creado una herramienta de interface gráfica estructurada en cinco módulos: preprocesador, postprocesador, máquina HBM, gestión de datos y comprobación de datos (página web).

Apoyados en esta interface, (Needham, y otros 2008) realizaron una evaluación de la capacidad del programa para estimación de los asentamientos a largo plazo, contrastando su aplicación en varios vertederos de Gran Bretaña, Estados Unidos, Australia y Hong Kong. En el estudio se concluyó que el modelo es robusto y capaz de simular casos distintos, aunque la validación quedó limitada por la calidad de los datos disponibles en las distintas instalaciones.

En todo caso, queda pendiente contrastar la aplicabilidad y ajuste de los modelos hidráulico y de biodegradación para estimar emisiones.

2.2. Moduelo. Evolución histórica.

El nuevo software creado, aunque diseñado y desarrollado desde cero, ha heredado todos los modelos matemáticos y procesos del programa Moduelo v3. Desde ese punto de vista le podemos considerar una evolución de dicho software y así se ha denominado Moduelo v4.

En este apartado, que pretende ser una revisión de los trabajos previos, se presenta la evolución histórica del software Moduelo, pilar sobre el que se fundamenta esta tesis, así como su aplicación a casos reales que han permitido comprobar y validar sus modelos.

La primera versión de Moduelo surgió del convenio de colaboración con la Consejería de Medio Ambiente del Gobierno de Cantabria titulado “Diseño de programas de gestión para los residuos sólidos en Cantabria” (Grupo de Ingeniería Ambiental 1998). El objetivo inicial del software era crear una herramienta de simulación del vertedero de Meruelo (de ahí el nombre del programa). Los fundamentos y desarrollo de los modelos, junto con la aplicación al antiguo vertedero de Meruelo (operado entre 1988 y 1990) de esta primera versión se presentaron en (Lobo, Herrero, y otros 2002a) y en (Lobo, Herrero, y otros 2002b)

El primer trabajo (Lobo, Herrero, y otros 2002a) presenta los modelos simplificados adoptados para simular los procesos hidrológicos en una malla tridimensional, suponiendo flujo saturado y condiciones estacionarias en cada paso de tiempo. En su aplicación al caso de Meruelo se detectó la necesidad de incorporar entre los modelos las distintas opciones de gestión de la escorrentía superficial, pues cuando está conectada a los sistemas de drenaje de fondo aumentan significativamente los caudales de lixiviado.

En el segundo trabajo (Lobo, Herrero, y otros 2002b) se presentan los modelos de biodegradación y su aplicación en el mismo vertedero. En los resultados se detectó la dificultad de contrastar los modelos con la realidad debida a la escasez de los datos disponibles sobre contaminación de lixiviados y a su dudosa representatividad. Asimismo, se puso de manifiesto la importancia de establecer mejor el valor de algunos datos de entrada al modelo, como la biodegradabilidad de los distintos componentes del residuo, para mejorar la precisión de los resultados.

Como mejoras a la herramienta se planteó incorporar modelos de degradación de otros tipos de contaminantes (más allá de los orgánicos biodegradables), el efecto de la temperatura, la generación de gases en etapas intermedias de degradación, el movimiento de gas en el residuo y la mejora de los modelos hidrológicos para hacerlos aplicables en vertederos con capas no saturadas.

(Dupuit 2000) aplicó la primera versión a un caso de laboratorio y al vertedero de Orense. Los resultados en ambos casos mostraron la potencialidad del software creado. Sin embargo se detectó de nuevo la necesidad de reducir la precisión en los datos requeridos por el programa para aumentar su aplicabilidad a distintos casos, pues es habitual una falta de precisión en los datos de explotación de los vertederos.

En (Lobo, Esteban, y otros 2001) se presentó un trabajo de evaluación de alternativas de clausura del vertedero de Meruelo basado en modelización. Los resultados se presentaron como ejemplo de aplicación de herramientas de simulación para estimar las emisiones de los vertederos a largo plazo, y por tanto para ayudar a establecer los períodos de vigilancia de los vertederos clausurados hasta su estabilización. Por otro lado en este trabajo se muestra la utilidad del programa para evaluar alternativas de remediación de antiguos vertederos.

El nuevo vertedero de Meruelo fue simulado con la primera versión de Moduelo por (Loddo 2001). Posteriormente, (Peña 2008) actualizaría la aplicación empleando la tercera versión del programa.

En la segunda versión de Moduelo se solucionan varios de los aspectos mejorables detectados en las aplicaciones de la primera versión. Se incluye el recuento de la escorrentía superficial conectada a la red de recolección de lixiviados, un modelo de flujo saturado corregido, una expresión que considera la variación de la permeabilidad con la sobrecarga y nuevos modelos en el balance superficial, de cálculo de flujo hacia los drenes y de biodegradación del residuo. Estos modelos se contrastan por aplicación al antiguo vertedero de Meruelo y a otro vertedero europeo (vertedero X, por confidencialidad).

En (Lobo y Tejero, MODUELO 2: a new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills. 2007) se presentan los fundamentos de esta segunda versión, y el contraste de los resultados de aplicación al vertedero de Meruelo. Se muestra como el modelo hidrológico del vertedero construido explica mejor los caudales de lixiviado observados que HELP y la versión anterior de Moduelo. Los resultados de degradación también son satisfactorios. En el proceso de modelización y calibración del vertedero se detectaron entradas de agua subterránea que incrementaban significativamente el caudal de lixiviado. Esto es prueba de la utilidad del modelo en seguimiento de vertederos.

En (Lobo y Tejero, Application of simulation models to the diagnosis of MSW landfills: an example. 2007) se presentó su aplicación en el vertedero X como ejemplo de utilidad en el diagnóstico de vertederos. La calibración del modelo hidrológico permitió detectar y cuantificar la entrada de parte de la escorrentía superficial directamente en el sistema de lixiviados, y la llegada al residuo de agua procedente de áreas circundantes en la misma cuenca drenante. Por su parte, el contraste de los resultados de simulación de la degradación con los datos de campo prueba la utilidad del programa para evaluar otros aspectos fundamentales en la gestión del vertedero, como el potencial aprovechamiento del biogás. En todo caso para mejorar la calidad de los modelos y por tanto su utilidad, se aconseja hacer registros en continuo y caracterizaciones específicamente diseñadas para la modelización.

(Lobo, López y Cobo 2007) aplicaron Moduelo 2 para evaluar las alternativas de gestión de residuos en una comarca del norte de España. Con el programa se estimaron las concentraciones de contaminantes en el lixiviado a lo largo de los años siguientes, lo que condicionaría el coste de vertido para repercutir los costes de tratamiento de los lixiviados.

La versión 3 del programa fue el resultado del proyecto de investigación “Desarrollo de una herramienta para la gestión y biorrecuperación de los suelos contaminados por vertederos de residuos sólidos urbanos”, financiado por el Ministerio de Medio Ambiente (PNMA-PNICDIT REF. 2000/032). Para ella se crea un nuevo modelo hidrológico basado en los trabajos de (Van Genuchten 1980) para zona no saturada incorporando también el flujo a través de caminos preferenciales. Se incorporan además modelos de simulación de distintas opciones de recirculación de lixiviados, del intercambio de agua con el terreno del contorno (infiltraciones-exfiltraciones), de variación de la temperatura y asentamiento, además de mejoras operativas en el programa.

Con esta versión se crearon modelos de distintos vertederos con diferentes objetivos. Como contraste con las versiones anteriores, se simuló el vertedero de Meruelo actualizando los datos a 2008, fecha del trabajo (Peña 2008). Varios grupos de investigación brasileños emplearon el programa en sus estudios de vertederos, como parte de investigaciones más amplias para evaluación del balance hidrológico, seguimiento o estimación del potencial de biogás (Martínez, y otros 2009). En colaboración con CESPAS Gestión de Residuos S.A., se realizó un trabajo de aplicación y adaptación del programa a uno de sus grandes vertederos como demostración de utilidad del programa para la empresa (Grupo de Ingeniería Ambiental 2006a).

Por otro lado, con financiación del Ministerio de Medio Ambiente (Grupo de Ingeniería Ambiental 2006b) se avanzó en la mejora de la herramienta en su aplicación a biorrecuperación de suelos contaminados.

Es en este momento de la evolución histórica de Moduelo cuando se comienza el desarrollo de la nueva versión v.4.0 por parte del autor de esta tesis en colaboración con el Grupo de Ingeniería Ambiental. Con esta nueva versión, paralelamente al desarrollo de esta tesis, se han realizado varias aplicaciones que, además de cumplir con los objetivos específicos de cada una, han permitido ir mejorando el programa en estos años.

En colaboración con TIRME, se ha creado un modelo de simulación de un vertedero resultante de la expansión vertical de un antiguo basurero incontrolado. Al no disponer de datos sobre la explotación anterior, ni de los residuos vertidos, fue necesario recurrir a una campaña de campo diseñada para caracterizar el vertedero de cara a su modelización. En (López, Cobo y Lobo 2011) se describe el trabajo experimental y de modelización de estos residuos antiguos, que incluyó una campaña de sondeos y caracterización de los residuos degradados con ensayos específicos de laboratorio. Los modelos se emplearon para estimar las emisiones y evolución futura de los viejos vertidos que han quedado enterrados por un lado (López, Cobo y Cuartas, y otros 2009) y de la nueva instalación por otro (López, Tejero, y otros 2009). El modelo creado se utiliza hoy en día para seguimiento y control de los vertederos con ayuda de instrumentación (Lobo, Cobo, y otros 2007).

En (Lobo, Lopez, y otros 2008) se presentaron los resultados de simulación de dos casos de laboratorio operados en condiciones controladas en la Universidad de Southampton, como base para evaluar y comparar el modelo de simulación con otros en desarrollo por otros grupos internacionales. El proceso de modelización y la comparación de resultados de simulación con lo observado en laboratorio pusieron de manifiesto las diferencias entre los modelos experimentales y lo que ocurre en vertederos reales. Las tasas de degradación determinadas en calibración fueron significativamente más elevadas que las obtenidas en simulación de vertederos, lo que obligó a utilizar pasos de tiempo menores. Por otro lado fue necesario introducir un tiempo de retraso en el comienzo de la metanogénesis para representar adecuadamente las concentraciones de contaminantes en el lixiviado.

En esta línea de contraste del programa con casos bien controlados para eludir el problema habitual de falta de datos (Gonzalorenna, Lopez y Lobo 2012) simularon una celda piloto operada en Holanda durante varios años. El trabajo de modelización reveló la necesidad de incorporar las estrategias de gestión de lixiviados por cierre y apertura de válvula en el programa. La calibración se basó en datos sobre los lixiviados registrados durante los primeros años de explotación, dejando los últimos y el registro de biogás para validar los modelos construidos.

En el contraste (Beaven, Results of the second landfill modelling challenge 2011) se comprobó una buena aproximación de los datos de lixiviación, pero no de los de emisiones gaseosas. Revisando los datos a posteriori se estableció de nuevo la sensibilidad de los resultados a los factores de biodegradabilidad de los componentes del residuo que se introducen como dato en el modelo.

2.3. Moduelo. Modelos teóricos.

En los próximos apartados se presentan, de manera resumida, los modelos teóricos implementados en la nueva versión del programa Moduelo v4. Se ha preferido incluirlos en el capítulo de revisión de la literatura para dejar constancia de que no son aportaciones de este trabajo ni del autor del mismo. Son el punto de partida heredado de la anterior versión existente del programa Moduelo v3. Algunas de las aportaciones originales del autor, en el presente trabajo, referentes al diseño y desarrollo de Moduelo v4 se exponen en el Capítulo 4 Herramienta de simulación.

El modelo del vertedero se define mediante datos de cinco tipos: terreno sobre el que se asienta, producción de residuos, datos de topografía e historial de explotación, meteorológico y datos de gestión del lixiviado.

A partir de esta información se crea la representación del vertedero en una malla tridimensional formada por capas compuestas por celdas de distintos tipos. Existen dos tipos básicos de celda: “vertedero”, que representa la capa de residuo con su correspondiente cobertura, y “suelo”, que representa un volumen formado por material homogéneo (como el que formaría caballones, muros drenantes, etc.). Cada tipo de celda caracteriza un material con propiedades hidrológicas, de biodegradación y asentamiento específicas. Las redes de recolección de lixiviado se definen en las capas deseadas, independientemente de las celdas que las compongan, mediante las características básicas de drenaje (área de tubería equivalente, coeficiente de rozamiento, pendiente, etc.).

El módulo de cálculo de producción de residuos establece, con las tasas y características introducidas por el usuario, la producción, composición y propiedades de la mezcla de residuos que llega al vertedero a lo largo del tiempo. Con estos datos y los de topografía, además del plan o historial de explotación, el programa establece que celdas están activas en el paso de tiempo correspondiente. Tomando esta información y los datos meteorológicos se realiza el balance hidrológico superficial y se simula el flujo hidrológico en el interior del vertedero para calcular el caudal de lixiviado generado diariamente y la humedad del residuo en cada celda. Este dato sirve de partida para los cálculos de biodegradación, que dan como resultado los contaminantes arrastrados por el lixiviado y el biogás generado. Los asentamientos se calculan entonces en función de las sobrecargas y pérdidas de masa. Finalmente se establece el balance de gestión de lixiviados, según la estrategia de almacenamiento o recirculación de los mismos.

2.3.1. Hidrología superficial

El módulo de hidrología superficial permite calcular a partir de los datos meteorológicos y en un paso de tiempo, la evolución de la humedad de las celdas superficiales, así como la cantidad de agua almacenada en la superficie, evaporada (o evapotranspirada), infiltrada y escurrida superficialmente durante ese periodo.

Conociendo las condiciones meteorológicas, la cantidad de agua precipitada y la disponible para evaporación en las celdas superficiales, se calcula inicialmente la evaporación (o evapotranspiración, según el estado del vertedero), que se produce sobre el agua de lluvia, la almacenada superficialmente y la del interior de las celdas. Del volumen de agua sobrante se calcula la cantidad infiltrada según las características y condiciones de la superficie y, si el volumen es suficiente, el agua que queda almacenada en superficie y/o que escurre superficialmente.

A continuación se presentan brevemente los modelos matemáticos y algoritmos adoptados para simular cada fenómeno superficial.

Modelo de Precipitación

La lluvia caída sobre las celdas situadas en la superficie del vertedero durante la simulación se obtiene a partir de los datos horarios del modelo meteorológico. Esta precipitación se supone repartida a lo largo de la hora correspondiente salvo en el caso de lluvias aisladas o de que se trate de la primera o la última hora de un aguacero de mayor duración. Para obtener la intensidad de lluvia en estos casos se define la variable “duración de lluvia aislada”, que es introducida por el usuario con el fin de ponderar la intensidad horaria de este tipo de lluvias. Su valor está comprendido entre 1 y 60 minutos.

Modelo de Evaporación

En el vertedero se distinguen dos formas diferentes de pérdida de agua por evaporación superficial: la evaporación simple y la evapotranspiración. La primera de ellas es la que se produce en el suelo árido mientras que la otra se da cuando se clausura el vertedero en el cuál, además de considerar la evaporación simple, se debe de tener en cuenta el agua evaporada por la transpiración de las plantas.

La evaporación solo tiene efecto sobre las celdas superficiales. Para controlar el alcance de la evaporación se introduce un parámetro de calibración, denominado “Profundidad de Evaporación”, que representa la profundidad máxima, en metros, afectada por la evaporación.

En la evaporación se distinguen dos casos de cálculo, función de los datos de los que disponga el usuario: Estación Meteorológica Completa o Estación Meteorológica Básica.

Si se dispone de datos de una estación meteorológica completa (precipitaciones horarias, temperatura media diaria, velocidad del viento diaria, horas diarias de sol) se utiliza la fórmula de Penman dada por:

$$E = \frac{(\Delta * R_n + \gamma * E_a)}{(\Delta + \gamma)}$$

Dónde:

- E: Evaporación en mm/día
- γ : Constante psicrométrica
- Δ : Pendiente de la curva de la tensión de saturación
- R_n : Radiación neta, traducida a mm de agua que puede evaporarse
- E_a : Depende de la velocidad del viento a 2m de la superficie, de la tensión de saturación y de la tensión de vapor en el aire

En el caso de disponer de una estación meteorológica básica (precipitación horaria y temperatura máxima y mínima diaria) se utiliza la expresión de Hargreaves, dada por:

$$E = \frac{0.0023(T_{max} - T_{min})^{0.5} Ra \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 17.8 \right)}{59.732 - 0.0564 \frac{T_{max} + T_{min}}{2}}$$

Dónde:

- E: Evaporación en mm/día
- Tmax: Temperatura máxima en el día en °C
- Tmin: Temperatura mínima en el día en °C
- Ra: Radiación solar función de la latitud y la época del año

Para estimar la evapotranspiración potencial, se emplean las expresiones anteriores (Penman y Hargreaves) corregidas.

En el caso de estación meteorológica completa, se emplea la expresión de Penman con un albedo de 0.25, correspondiente a hierba húmeda, un factor de reducción en la Energía aerodinámica de evaporación (Ea) y un factor 0.95 sobre la radiación reflejada de onda larga. Así:

$E_a = 0.35 \cdot (0.5 + 0.54 \cdot (V/3.6)) \cdot (e_a(t) - e(H_r, t));$ Para evaporación

$E_a = 0.35 \cdot (1 + 0.54 \cdot (V/3.6)) \cdot (e_a(t) - e(H_r, t));$ Para evapotranspiración

Dónde:

- V: Velocidad media diaria del viento en km/h
- $e_a(t)$: Tensión de saturación, función de la temperatura, en mm de Hg
- $e(H_r, t)$: Tensión de vapor de agua en el aire en mm Hg, función de la humedad relativa (H_r) y de la tensión de saturación

En el caso de estación meteorológica básica, se emplea la expresión de Hargreaves aplicando un factor que depende de la época del año:

- noviembre a febrero = 0.6
- marzo, abril, septiembre y octubre = 0.7
- mayo a agosto = 0.8

Estas expresiones estiman la ETP (Evapotranspiración potencial), capacidad evaporante de la atmósfera. La ETR (Evapotranspiración real) vendrá limitada por el contenido de humedad en la profundidad de evaporación o, lo que es lo mismo, por la precipitación y el volumen de agua acumulada sobre las celdas en el intervalo de tiempo anterior. Para tener presente esta circunstancia se procede como sigue:

- a) La precipitación y el agua acumulada en superficie y en la profundidad de evaporación son superiores a la ETP. La ETR es igual a la potencial, esto es, la capacidad evaporante de la atmósfera no está limitada por la humedad disponible.
- b) La precipitación y el agua acumulada en superficie y en la profundidad de evaporación son inferiores a la ETP. La ETR es la suma de las precipitaciones, el agua acumulada en la profundidad de evaporación y de toda o parte de la reserva del suelo. Si la reserva de agua del terreno (humedad libre en la profundidad de evaporación) es suficiente para completar la diferencia entre la ETP y la precipitación, P, la ETR sigue siendo igual a la potencial y la reserva del suelo se reduce en la diferencia ($ETP - (P + \text{Almacenamiento})$). Si, por el contrario, la reserva es insuficiente, la ETR es igual a la precipitación más la reserva de agua del suelo.

Modelo de Infiltración

Para descomponer la lluvia caída sobre el vertedero en agua infiltrada y escorrentía se utiliza la fórmula de Horton:

$$f = fc + (fo - fc) * e^{-k*t}$$

Donde:

- f: Capacidad de infiltración del suelo (mm/h)
- t: Tiempo transcurrido desde que se inició la lluvia
- fc: Capacidad de infiltración mínima de ese tipo de suelo, alcanzada al cabo de un cierto tiempo (mm/h)
- fo: Capacidad de infiltración inicial máxima de ese tipo de suelo, que se da al iniciarse la lluvia (mm/h)

Cada hora en la que existe precipitación se compara la intensidad de la misma, I, con la capacidad de infiltración en ese instante f, asumiéndose lo siguiente:

- Si $I < f$, se infiltra toda la lluvia.
- Si $I > f$, sólo se infiltra una parte de la lluvia, mientras que el resto da lugar a la escorrentía.

Modelo de Almacenamiento y Escorrentía Superficial

Si después de producidos los fenómenos de evaporación, evapotranspiración e infiltración, queda agua en la superficie, esta se almacena hasta un máximo definido por la máxima altura de encharcamiento (dp) y estará disponible sobre la celda para el periodo siguiente. Superada esta altura, se producirá la escorrentía superficial.

Cuando por la explotación del vertedero se coloca una celda encima de otra, se asume que el almacenamiento superficial de la segunda entra a formar parte de la humedad de la nueva celda. Si esta supera su humedad de saturación, la diferencia escurrirá hacia las adyacentes según las pendientes de la superficie. Existen en este caso dos posibilidades:

- Que la celda adyacente en el sentido de la pendiente está ya colocada, en cuyo caso este escurrido formará parte de su humedad.
- Que la celda adyacente en el sentido de la pendiente no esté colocada, en cuyo caso el escurrido formará parte del almacenamiento superficial de la última celda colocada en superficie y podrá producirse escorrentía superficial si se supera la altura de almacenamiento dp.

En cuanto al registro de escorrentía superficial, se contemplan dos opciones:

- Escorrentía de celdas conectadas: aquellas cuyos drenes superficiales están conectados al sistema de recogida de lixiviados.
- Escorrentía de celdas no conectadas: aquellas cuyos drenes superficiales siguen una línea independiente del sistema de recogida de lixiviados.

Para representar los sistemas de gestión de escorrentía superficial que se utilizan en vertederos, se permiten también comportamientos mixtos, es decir, celdas que se pueden comportar como conectadas o no conectadas en función del estado de explotación del vertedero. Así se permite la definición de celdas con gestión “mixta” de la escorrentía, o con gestión “por caballones”.

- Sistema mixto. Este caso representa el funcionamiento de los sistemas de drenaje inferior que se construyen en una capa durante la explotación de la capa inferior y no conectan inmediatamente al drenaje general del vertedero, sino cuando empieza a explotarse la capa a la que pertenecen. Una celda “mixta” se considera no conectada mientras no se haya colocado otra celda en su misma capa y aguas arriba de la dirección de drenaje, (el sistema de drenaje inferior de esa capa aún no está conectado a la red general de drenaje) mientras que se considerará conectada en caso contrario.
- Sistema de caballones. En muchos vertederos, la colocación de los residuos se realiza compartimentando la superficie mediante caballones de baja permeabilidad que permiten controlar las escorrentías, conectándolas con la red general de lixiviados. En este caso, cuando comienza a explotarse un determinado compartimento (limitado por uno o más caballones), toda la escorrentía de las celdas colocadas aguas arriba de la dirección de drenaje de dicho caballón se considera escorrentía conectada, mientras que la escorrentía de las celdas situadas aguas abajo, se considera como escorrentía no conectada. Según se va realizando la explotación de la superficie del vertedero, los caballones “activos” van variando, variando así la forma de gestionar la escorrentía en las distintas celdas.

2.3.2. Hidrología en el interior del vertedero

Los modelos de hidrología en el interior del vertedero permiten simular cómo se transmite la humedad infiltrada y aportada por los materiales vertidos a través del volumen del vertedero (compuesto por capas formadas por celdas según la discretización del programa) hasta los sistemas de recolección de lixiviados. Como resultado de estos modelos se obtiene la cantidad de lixiviado recolectado y la actualización de la humedad de cada celda.

En cada paso de tiempo el programa actualiza primero la cantidad de residuos vertidos y sus características. Seguidamente se establece el balance hidrológico superficial, que modifica el estado de humedad de las celdas superficiales, y el balance de recirculación de lixiviados, que modifica el estado de las celdas afectadas por estos sistemas. Con esta información el programa calcula, sucesivamente, el flujo vertical, el flujo hacia los elementos de recolección de lixiviados y el flujo horizontal entre celdas adyacentes, para terminar actualizando las humedades de todas las celdas del modelo.

Flujo Vertical

El flujo vertical entre dos celdas se divide en dos componentes: “flujo lento”, que se produce, en condiciones saturadas o no saturadas “homogéneamente” a través de la superficie de contacto y “flujo preferencial” o “rápido” a través de canales preferenciales.

a) Flujo Vertical. Flujo “lento” en zona no saturada.

Este sub-modelo calcula el flujo vertical entre dos celdas sin cobertura (Modelo “drenaje libre”), a través de la capa de cobertura que separa una celda de residuos de la celda situada sobre ella (Modelo “celda – cobertura”), o en una celda situada sobre una capa impermeabilizante (Modelo “celda impermeable”).

En cada caso se aplica un modelo simplificado, que es fruto del análisis numérico de la solución de distintos casos siguiendo las fórmulas de (Van Genuchten 1980). El proceso de análisis que llevo a estas simplificaciones está descrito en (Lobo, Sanchez, y otros 2003). Los modelos a que dieron lugar se describen esquemáticamente a continuación, haciendo uso de la siguiente notación:

- q_v : Caudal vertical entre celdas
- h_{RSU} , e_{cob} : Altura de residuos, espesor de cobertura
- K_v^{sat} , K_v^{cob} , K_v^{RSU} : Conductividad hidráulica en condiciones saturadas, de la cobertura y del residuo
- i , i_{max} : Gradiente hidráulico, gradiente máximo
- i_{sat} : Gradiente en condiciones saturadas $i_{sat} = \frac{h_{RSU} + e_{cob}}{e_{cob}}$
- A_h : Área horizontal de la celda, transversal al flujo

- t, t_{hmax} : Tiempo, tiempo de gradiente máximo
- h : Altura de agua sobre el fondo de la celda
- $\theta, \theta_0, \theta_{min_v}, \theta_{res}, \theta_{sat}$: Humedad de la celda, humedad inicial, humedad mínima a partir de la cual se produce el flujo vertical, humedad residual, humedad de saturación.
- $\theta_{corregido}$:

$$Si t = t_{hmax} \rightarrow \theta_{corregido} = \theta_0$$

$$Si t > t_{hmax} \rightarrow \theta_{corregido}(t + \Delta t) = \theta_{corregido}(t) - qv(t) * \Delta t$$

- Θ :

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_{min_v}}{\theta_{sat} - \theta_{min_v}}$$

a.1) Modelo celda – cobertura.

En el caso de celdas con cobertura, el caudal vertical desde las celdas superiores se calcula en función de la permeabilidad saturada de la cobertura y el gradiente hidráulico siguiendo las fórmulas siguientes:

$$qv = K v^{cob} i(t) Ah$$

$$Para t < t_{hmax} \rightarrow i(t) = 4 \cdot t_{hmax} \cdot i_{max} \frac{t}{(t + t_{hmax})^2}$$

$$Para t \geq t_{hmax} \rightarrow i(\theta_{corregido}, K v^{cob}, K v^{RSU}) = i_{saturación} (1 - (1 - \Theta_{corregido})^\beta)$$

$$\theta_{min_v} = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + (0,01|h|)^2)^{0,5}}; h = 10^{PF}; PF = 2,265$$

$$i_{max}(\Theta_0, K v) = i_{saturación} (1 - (1 - \Theta_0)^\beta)$$

$$\beta = a_1 \left(\log \left(\frac{K v^{RSU}}{K v^{cob}} \right) \right)^2 + b_1 \log \left(\frac{K v^{RSU}}{K v^{cob}} \right) + c_1$$

$$a_1 = -0,0379; b_1 = 0,3919; c_1 = -0,3109$$

$$t_{hmax}(\Theta_0, K v^{cob}, K v^{RSU}) = - \frac{(\ln(\Theta_0))^\gamma}{k(K v^{cob}, K v^{RSU})}$$

$$k = a_2 \cdot e^{(b_2 \cdot X)} \cdot \frac{K v^{cob}}{0,082} \cdot \left(1 + \frac{\theta_{res}}{30} \right)$$

$$X = \log \left(\frac{K v^{RSU}}{K v^{cob}} \right); a_2 = 0,000653; b_2 = 1,56; \gamma = 1,25$$

a.2) Modelo de drenaje libre

En el caso de celdas sobre celdas in cobertura, no se producirá acumulación sobre la celda inferior (excepto si ésta se satura), por lo que el cálculo del caudal entre ambas se estima a partir de la permeabilidad vertical saturada de la superior, siguiendo las indicaciones de las fórmulas siguientes:

$$qv = Kv_{sat} \cdot Kr \cdot i$$

$$Kr = \Theta^{1/2} \left(1 - (1 - \Theta^{1/0,5})^{0,5} \right)^2$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}}$$

$$i = 60\alpha + 1,3; \alpha = 0,01$$

a.3) Modelo celda impermeable

En este caso no se produce flujo. Se calcula la altura de acumulación de agua sobre el fondo impermeable en función de las curvas de distribución de humedad a lo largo del tiempo.

$$\text{Para } t < t_{hmax} \rightarrow h(t) = 4 \cdot t_{hmax} \cdot h_{max} \frac{t}{(t + t_{hmax})^2}$$

$$\text{Para } t \geq t_{hmax} \rightarrow h(t) = h_{max}$$

$$h_{max}(\Theta_0) = h_{RSU} (1 - (1 - \Theta_0)^{1/2})$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_{min_H}}{\theta_{sat} - \theta_{min_H}}$$

$$t_{hmax}(\Theta_0, Kv^{RSU}) = - \frac{(\ln(\Theta_0))^{1,25}}{0,04 \cdot \frac{Kv^{RSU}}{86,4} \cdot \left(1 + \frac{\theta_{res}}{30} \right)}$$

$$\theta_{min_H} = \theta_{res} + \frac{\theta_{sat} - \theta_{res}}{(1 + (0,01 \cdot |h|)^2)^{0,5}}$$

$$h = 10^{PF}; PF = 2,22$$

b) Flujo Vertical. Flujo “preferencial” o “rápido”.

Al asumir un flujo vertical “Darciniano”, en los modelos presentados no se consideran los flujos preferenciales que ocurren en la realidad por la heterogeneidad de los materiales, lo que lleva a sobrestimar el almacenamiento de agua y el tiempo de retención del lixiviado en las celdas.

Para modelizar estos fenómenos se adopta la aproximación descrita por (Rosqvist y Destouni 2000), que subdividen el volumen de la celda en dos partes: en una parte del volumen de la celda (entre el 5 y el 50 %) el flujo predominante es canalizado, mientras que el volumen restante se puede analizar como flujo Darciniano lento.

Una forma sencilla de representar esto fenómenos es tomando como base los modelos de flujo no saturado planteados, asignando al volumen canalizado una permeabilidad superior a la permeabilidad saturada propia de la celda.

Por esta razón, para representar el flujo a través de canales preferenciales se definen dos nuevos parámetros:

- μ : % del volumen de la celda que se encuentra “canalizado”.
- f_K : factor de permeabilidad, que relaciona la permeabilidad saturada del material en la zona canalizada con la de la zona homogénea.

Así, la celda se considera dividida en dos partes:

- La zona no canalizada en la que se produce flujo lento (q_{lento}), con una permeabilidad vertical $K_v = K_{v_{sat}}$, que ocupa un volumen $V_{lento} = V_{total} \cdot (1 - \mu)$
- La zona canalizada, en la que se produce el flujo rápido (q_{rapido}), con permeabilidad vertical $K_v = K_{v_{sat}} \cdot f_K$, en un volumen $V_{rapido} = V_{total} \cdot \mu$.

En cada una de las partes se aplica el modelo de flujo vertical (drenaje libre, celda – cobertura o celda impermeable) que corresponde según el estado hidráulico de la celda y sus condiciones de contorno, siendo el caudal total que pasa a la celda inferior la suma de las partes descritas $q = q_{lento} + q_{rapido}$.

La altura de agua libre para el flujo horizontal se calcula repartiendo en el fondo de la celda el volumen de agua acumulada en el fondo de cada una de las partes como consecuencia de los flujos calculados. Así:

$$V_{lento} = H_{libre_{lento}} \cdot n \cdot (1 - \mu) \cdot A_h \quad V_{rapido} = H_{libre_{rapido}} \cdot n \cdot \mu \cdot A_h$$

$$H_{libre_{flujo\ horizontal}} = H_{libre_{lenta}} \cdot (1 - \mu) + H_{libre_{rapida}} \cdot \mu$$

Flujo hacia el sistema de drenaje

Se aplica sobre las celdas en las que se ha definido un dren inferior. Calcula la cantidad de agua que se filtra hacia el conducto de recolección de lixiviado (dren) para ser extraído. Se asume que en el fondo de la celda existe una capa de grava capaz de evacuar todo el agua hacia la tubería de drenaje. El flujo dentro de la celda hacia la capa de gravas se calcula mediante el modelo de drenaje libre, considerando la permeabilidad vertical del residuo situado sobre el fondo.

El caudal de lixiviado extraído está limitado por la capacidad de extracción del conducto. Si este no es capaz de extraer todo el agua que llega, el caudal sobrante tenderá a acumularse en el fondo de la celda, formando una lámina de agua en el caso de que exista una capa más impermeable bajo ella (bien cobertura, un relleno menos permeable que el propio residuo o bien un capa de impermeabilización). En este caso se producirá flujo vertical hacia la celda inferior en condiciones saturadas. Si no existe esta capa más impermeable (por ejemplo, en capas de residuos sin cobertura entre ellas o celda vertedero sobre celda dren), todo el caudal sobrante pasa a la celda inferior.

El caudal vertical hacia la celda inferior está limitado por el volumen de agua disponible y la humedad de saturación de la celda inferior. Si después de calculados los flujos de humedad en un paso de tiempo (dren, verticales y horizontales), queda agua acumulada en el fondo de una celda con sistema de drenaje inferior (porque el sistema de drenaje no es capaz de captar todo el agua que le llega y la impermeabilización o la cobertura impiden la transmisión del caudal sobrante), en el paso de tiempo siguiente el flujo hacia el dren pasa a calcularse como “sistema de drenaje con agua acumulada en el fondo”, según los modelos de celda – cobertura o celda impermeable según las condiciones de contorno.

Flujo horizontal

Este sub-modelo estima simplificada el flujo horizontal entre dos celdas. Por simplificación, se aplica de manera desacoplada en ambas direcciones de una misma capa, X e Y, considerando las celdas por pares.

Las celdas se idealizan como depósitos con una altura de agua acumulada en el fondo, h_1 y h_2 respectivamente, que se obtiene tras el cálculo del flujo vertical y del flujo al dren, como se indica en los apartados anteriores.

En el flujo de una celda a otra se acepta que el agua recorre el trayecto entre centros de celdas L (longitud de cada celda), atravesando un área vertical media $A_v = ((h_1 + h_2)/2) \cdot L$

Para considerar celdas con distinta permeabilidad horizontal se define una permeabilidad equivalente:

$$Kh_{equivalente} = 2 \cdot (K_1 \cdot K_2) / (K_1 + K_2)$$

Adoptando la ley de Darcy para flujo en medio poroso:

$$Q = - \frac{\Delta h \cdot L_x \cdot L_y}{\Delta t} = Kh_{equivalente} \cdot A_v \cdot i$$

Siendo Δt el incremento de tiempo (paso de tiempo del programa, 1 hora).

Para obtener la expresión del gradiente hidráulico i , se acepta que entre dos celdas con distinta altura de agua (h_1 y h_2), se produce una transición del nivel h_1 al nivel h_2 en una distancia horizontal L .

Existe un caso particular de flujo horizontal de una celda hacia el exterior, que ocurrirá cuando la celda contigua está aún sin colocar en el tiempo de la simulación. Se resuelve con la misma fórmula que en el caso general, teniendo en cuenta que la altura de agua de la celda vacía (h_2) es nula.

En el caso de que existan celdas saturadas, se considera la altura de agua entre la superficie libre y el fondo impermeable y el flujo se asigna a la celda que no está totalmente saturada.

$$q_{Hx}(m^3/s) = K_{x_{eq}} \frac{(h_{z_{s1}}^2 - h_{z_{s2}}^2)}{2L_x} L_y$$

Para evitar inestabilidades por pasos de tiempo elevados, se limita el flujo entre celdas calculado con las expresiones mostradas para que la humedad resultante en cada una de las dos celdas entre las que actúa el flujo, ni exceda la humedad de saturación ni rebaje la capacidad de campo.

Flujo con el contorno

El vertedero puede intercambiar líquido con el contorno a través del terreno natural sin impermeabilizar, capas minerales de baja permeabilidad o imperfecciones en capas artificiales de impermeabilización, según cuál haya sido la preparación del vaso de vertido. El flujo de agua subterránea (hacia el interior) o lixiviado (hacia el exterior) intercambiado depende de la conductividad hidráulica del vaso de vertido y la diferencia de cotas piezométricas entre el interior y el exterior del vertedero.

Estos fenómenos se simulan aplicando a cada celda en contacto con una celda del terreno la siguiente expresión:

$$V_{fondo}(m^3/(m^2 \text{ celda})) = C \cdot (H_{libre} - H_{exterior}) \cdot \Delta t$$

Dónde:

- V_{fondo} : Volumen de agua intercambiado con el terreno por cada m^2 .
- C : Conductancia equivalente del vaso de vertido [$m^2 \text{ s}^{-1} / m^2$] que caracteriza las propiedades hidráulicas del sistema de impermeabilización o el terreno natural, según el caso, por área horizontal de la celda.
- H_{libre} : Cota del agua acumulada en la celda sobre la capa impermeabilizante [m] (Se estima con el modelo de celda impermeable).
- $H_{exterior}$: Cota piezométrica del acuífero regional existente en la zona del vertedero [m].
- Δt : Intervalo de tiempo de cálculo.

Este volumen está limitado según el caso:

- a) Si es positivo (salida de agua hacia el terreno), no puede superar el volumen disponible de agua acumulada en el fondo de la celda.
- b) Si es negativo (entrada de agua desde el terreno), no puede superar el volumen de humedad libre de la celda (volumen de agua de saturación menos volumen de agua inicial en el paso de tiempo considerado).

Si la cota del acuífero exterior es menor que la del vertedero sólo se producirán intercambios de agua en las celdas que tengan altura de agua acumulada en el fondo.

Si el volumen de agua intercambiado con el terreno es positivo (salida de agua) y se está simulando degradación, se calculará la contaminación que supone ese volumen en función de la materia disuelta que está presente en cada celda (de la misma forma que se calculan los flujos de materia entre celdas).

2.3.3. Biodegradación

Para simular los fenómenos de degradación son necesarios dos modelos interrelacionados: el modelo de simulación de los procesos de degradación y el de caracterización de la degradabilidad del residuo. Los apartados que siguen presentan un breve resumen de estos modelos. En (A. Lobo 2003a) puede encontrarse una descripción detallada de los mismos, así como valores de referencia para los parámetros que intervienen.

Caracterización del residuo

El modelo de degradación adoptado se centra sólo en procesos biológicos que afectan a los componentes orgánicos del residuo. En la materia orgánica se establecen dos fracciones: una biodegradable, que puede ser transformada por microorganismos dando lugar primero a materias disueltas y finalmente a gas, y una no biodegradable. Además, en la fracción biodegradable se distingue una parte rápidamente hidrolizable (MS_{rhb}) y otra lentamente hidrolizable (MS_{lhb}). Las dos fracciones biodegradables se caracterizan por su “fórmula química”, $C_{C_{rhb}}H_{H_{rhb}}O_{O_{rhb}}N_{N_{rhb}}S_{S_{rhb}}$ y $C_{C_{lhb}}H_{H_{lhb}}O_{O_{lhb}}N_{N_{lhb}}S_{S_{lhb}}$, donde los factores “i” indican la cantidad (moles) de elemento i (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno o azufre) incluida que forma la unidad básica de la fracción, correspondiendo “rhb” a rápidamente hidrolizable y “lhb” a lentamente hidrolizable.

Según la información de que se disponga, la división anterior puede realizarse en la mezcla completa de residuos o a partir de las características de cada material que compone la mezcla (materia orgánica, papel, cartón, plástico, etc.). Para modelizar la masa biodegradable a partir de las características de los distintos materiales, estos se clasifican en rápidamente biodegradables, lentamente biodegradables e inertes. Cada uno de los materiales, además, se caracteriza por un valor del parámetro “ f_{bio} ”, que relaciona la masa biodegradable del componente con la masa orgánica total del mismo. “ f_{bio} ” se aplica a todos los elementos químicos de cada componente o fracción, de manera que la fórmula química de la fracción biodegradable del mismo conserva las proporciones entre elementos de la fórmula original.

A la masa que puede llegar a ser degradada hasta gas, definida por “ f_{bio} ”, se añade, en la primera etapa de degradación, otro tipo de sustancias que, no siendo degradables por los microorganismos, pueden ser “arrastradas” al disolverse los componentes de su entorno o consecuencia directa de procesos físico-químicos como arrastre con el agua en su percolación y/o disolución química.

Estas sustancias forman finalmente los compuestos orgánicos no biodegradables que aparecen en el lixiviado y muchas veces se agrupan bajo la denominación de “compuestos húmicos” o DQO “refractaria”. Para modelizarlas se incluye en el modelo un coeficiente “ f_{ar} ” denominado “fracción de arrastre”, tal que la materia orgánica inerte que pasa al lixiviado acompañando a la sustancia hidrolizada es directamente proporcional, con factor de proporcionalidad “ f_{ar} ”, a la masa de esta última.

Un último parámetro, el factor “de accesibilidad”, separa la parte de la fracción biodegradable que será disuelta en el vertedero de la que no podrá serlo por diversas razones, como quedar encerrada en zonas aisladas del agua. Este factor “ f_{ac} ”, denominado “fracción degradable accesible”, aplicado a la masa degradable en condiciones ideales, expresa la parte de la misma que será realmente hidrolizada en las condiciones específicas del vertedero estudiado. Su valor variará de unos lugares a otros entre 0 (los microorganismos no pueden acceder a ninguna fracción del residuo y el vertedero se mantendría “momificado”) y 1 (la situación ideal en que toda la materia degradable puede ser descompuesta).

Procesos de degradación

Para simular la aparición sucesiva de materia contaminante en el lixiviado y de biogás la secuencia de descomposición de los residuos se simplifica en tres etapas: la “hidrólisis”, la “acetogénesis” y la “gasificación”.

- a) Hidrólisis. Representa el paso de la materia sólida al lixiviado por degradación biológica de los compuestos orgánicos o por acciones de “arrastre” químico o físico. Se distinguen dos reacciones, según el tipo de materia que sufra el proceso. Las sustancias biodegradables sólidas dan lugar directamente a “compuestos intermedios” (compuestos orgánicos disueltos más complejos que el ácido acético), ácido acético, amonio, ácido sulfhídrico, dióxido de carbono e hidrógeno en proporciones estequiométricas determinadas. Estas proporciones son función de los parámetros “ f_{AC} ” y “ f_{CHO} ”, que pueden fijarse para cada vertedero.
- b) Acetogénesis. Consiste en la transformación de los “productos intermedios” en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno. La proporción de carbono de los compuestos intermedios que se transforma en acetato, “ f_{AC} ”, también puede fijarse en cada caso.

- c) Gasificación. El proceso final de descomposición transforma la materia en biogás. La creación de metano en sistemas biológicos se produce a través de dos vías: por utilización del acetato (metanógenos acetófilos) y por reducción del CO₂ con H₂ (metanógenos hidrogenófilos). En este modelo se proponen dos transformaciones independientes, una para cada proceso de generación de metano.

Todas las reacciones presentadas se desarrollan según cinéticas de primer orden respecto a la masa de sustancia a degradar, con velocidades k_{hr} , k_{hl} , k_A , k_{AC} , k_{H_2} , para la hidrólisis rápida, lenta, acetogénesis, metanogénesis a partir del acetato y metanogénesis a partir del hidrógeno respectivamente.

Las tasas de hidrólisis tienen la forma $k_h = k_h' \cdot FH$, donde k_h es la tasa máxima de hidrólisis y FH el factor de influencia de la humedad.

La ley variación de FH se compone de tres tramos lineales, dependiendo del porcentaje de humedad sobre la humedad mínima relativo al intervalo total de variación de la misma (humedad de saturación menos la mínima).

$$P = \frac{\omega - \omega_{cc}}{\omega_{SAT} - \omega_{CC}}$$

A continuación, se presentan los tramos empleados en la representación de la influencia de la humedad sobre la hidrólisis:

P(%)	Coficiente FH
0 < P < 15	0
15 < P < 35	(P-15)/80
35 < P < 65	0,25+(P-35)/60
65 < P < 90	0,75+(P-65)/100
P > 90	1

Por otro lado se incluye el concepto de “tiempo de activación”, que representa dos realidades que se dan en el vertedero. Existe cierto retraso en los procesos de degradación respecto a la situación ideal en que el sólido está completamente rodeado de agua y microorganismos que realizan un ataque enzimático inmediato. Los residuos han de ser colonizados una vez depositados y no siempre pueden serlo con igual facilidad (estado de mezcla, trituración, encerramiento en bolsas, recirculación...). Este retardo inicial se ve incrementado por un periodo de aclimatación, tiempo que los microorganismos necesitan para acostumbrarse al nuevo sustrato, que variará según el residuo sea más o menos fácilmente degradable. La suma de estos dos periodos para las sustancias rápidamente y lentamente hidrolizables respectivamente, da como resultado el parámetro “tiempo de activación” ($t_{act,r}$ y $t_{act,l}$).

Transporte de contaminantes

Los fenómenos de propagación de los contaminantes se simplifican despreciando fenómenos como la difusión y las reacciones químicas a que pueden dar lugar. El transporte de sustancias disueltas en el modelo se produce por advección con el líquido intercambiado, produciéndose la mezcla instantánea en cada celda destino. Se acepta que cada elemento de los considerados en las fórmulas químicas de los residuos se encuentra en forma libre, sin formar moléculas y distribuido homogéneamente en cada celda.

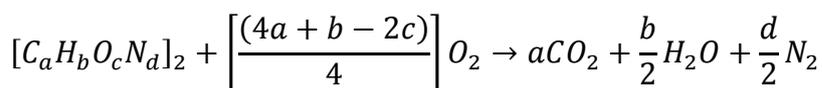
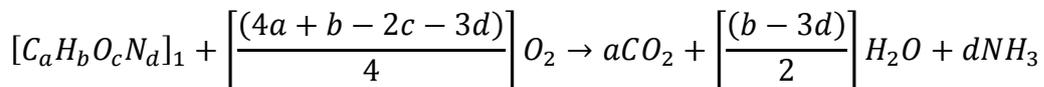
Considerando una celda “k”, conocidos los volúmenes de aguas afluentes desde las seis celdas adyacentes “i”, en el tiempo t, “ $Q_{ik}(t)$ ”, la masa transportada de cada componente disuelto (se consideran doce componentes (C, H, O, N, S y cenizas, cada uno biodegradable y no biodegradable) será:

$$\Delta DM_{TT}(k; t) = \sum_i \left[Q_{ik}(t) \cdot \Delta t \cdot \frac{DM(i; t)}{h(i; t)} \right]$$

Donde Δt es el paso de tiempo; $h(i; t)$ es el contenido de humedad de la celda i en el instante t, calculado por el módulo hidrológico. El cambio total en la masa de contaminantes disueltos en la celda k será el resultado de la suma de este término de transporte, $\Delta DM_{TT}(k; t)$ y los de transformación por hidrólisis $\Delta DM_{j_{HiD}}(k; t)$ y gasificación $\Delta DM_{b_{GAS}}(k; t)$.

Parámetros de contaminación orgánica

El resultado directo del modelo son las cantidades de materia orgánica hidrolizada no biodegradable y de materia biodegradable remanente (que todavía no ha sido gasificada) en el lixiviado, además de la cantidad formada de cada componente del gas. Para expresar los valores de contaminación orgánica del lixiviado según parámetros ampliamente utilizados en el campo de la calidad del agua como son DBO y DQO, el modelo realiza las operaciones de cuantificación del oxígeno consumido en las siguientes reacciones:



Donde el subíndice “1” indica “materia orgánica biodegradable disuelta” y el subíndice “2” la “suma de materiales orgánicos disueltos biodegradables y no biodegradables”.

2.3.4. Asentamientos

El proceso de asentamiento de los residuos en el vertedero puede estudiarse en tres etapas: asientos iniciales, producidos durante la extensión y compactación del residuo, asientos primarios, debidos a la compresión que genera la sobrecarga de las capas superiores, y asientos secundarios, por consolidación y degradación del residuo.

Se adopta un modelo de simulación de asentamientos basado en la teoría de la consolidación unidimensional que considera las tres etapas mencionadas. La unidad de cálculo es la celda, sometida a sucesivos incrementos de carga y evolucionando en su proceso de biodegradación. No se tiene en cuenta la interacción entre celdas: se calculan los asentamientos celda a celda, sin considerar el rozamiento o cohesión entre las mismas. Esta simplificación da lugar a un modelo de asentamiento por “columnas” (grupos de celdas que ocupan el mismo espacio en planta), a cada una de las cuales se le atribuyen unas condiciones medias del área abarcada.

Asientos primarios

En el modelo se acepta que los asientos iniciales que se producen durante el extendido y compactación del residuo quedan incluidos en el espesor de la celda, cuyo dato es dado por el usuario. A partir de este punto, definido por el peso específico inicial, se producen los asentamientos primarios por efecto del peso propio del residuo (incluido el agua que contenga), de la capa de cobertura, y de las capas que se coloquen sobre el mismo.

Para la estimación de los asientos se emplea la fórmula de consolidación universal:

$$S_p = C'_p H_0 \log \frac{\sigma_{v0} + \Delta\sigma_{v0}}{\sigma_{v0}}$$

Donde:

- C'_p : Índice de compresión primaria modificado = $C_p / ((1 + e_0))$
- C_p : Índice de compresión primaria
- e_0 : Índice de vacíos tras la compresión inicial
- H_0 : Altura inicial del volumen considerado (m)
- σ_{v0} : Presión efectiva previa en el volumen considerado (kPa)
- $\Delta\sigma_{v0}$: Sobrecarga efectiva en el volumen considerado (kPa)

Asientos secundarios

La estimación de los asientos secundarios se basa en el modelo Meruelo (Palma 1995), que parte de las siguientes hipótesis:

- Los asientos secundarios se deben únicamente al proceso de biodegradación de los residuos.
- La relación entre los asientos producidos y la masa degradada es igual a una constante α característica del tipo de vertedero y los residuos depositados.

$$\alpha = \frac{S_S/H}{RD/RT}$$

Donde:

- α : Coeficiente de pérdida de masa convertida en asientos
- S_S : Asiento secundario producido (mm)
- H : Espesor del volumen considerado (mm)
- RD : Masa de residuos degradados (kg)
- RT : Masa de residuos inicial en el volumen considerado (kg)

En cada paso de tiempo Δt , el programa calcula el asiento potencial de cada celda según los modelos presentados. El asiento potencial total es la suma del primario y el secundario. Se supone que sólo son posibles los asientos por eliminación de volumen de poros. Si el asiento da lugar a que la celda quede saturada, entonces el asiento está limitado por el volumen de huecos disponible. Queda entonces un asiento “remanente” asignado a la celda correspondiente, que se producirá en cuanto exista volumen de huecos suficiente.

A continuación, se describen los cambios en algunas propiedades hidráulicas originados por los asientos.

Variación de la humedad de saturación

El volumen de agua que el residuo puede ir acumulando depende directamente del volumen de huecos accesibles en relación a la masa o volumen total y, por tanto, de la porosidad (n).

Si los asientos son consecuencia de dos causas principales, la variación de la porosidad tendrá también dos componentes: uno consecuencia de una mayor presión, que da lugar a la compresión del residuo y otro función de la degradación, que elimina masa de residuo y modifica su estructura.

La variación “primaria” de la porosidad Δn_1 originada por la compresión, en un paso de tiempo, es:

$$\Delta n_{1a} = \frac{\Delta V_{1a}}{V}$$

donde ΔV_{1a} es la reducción de volumen como consecuencia de la compresión.

La componente “secundaria”, a consecuencia de la degradación y disolución del sólido, produce una doble variación de volumen: se pierde volumen sólido con la masa lixiviada y además se genera una variación en la porosidad (n) que puede ser positiva o negativa (Manassero, Van Impe y Bouazza 1997).

$$\Delta n_{2a} = \frac{\Delta V_{2a}}{V} - \frac{\Delta M}{\rho_{sol}}$$

Si la densidad del sólido ρ_{sol} se asume constante, puede entonces hallarse a partir de las características iniciales del residuo.

$$\rho_{sol} = \frac{\rho_{ap} - \omega}{1 - n}$$

Donde ρ_{ap} es la densidad aparente inicial del residuo y ω es la humedad.

Con estas condiciones y conocidos los asientos, la variación de $\omega_{SAT,VOL}(z; t)$ se calcula como suma de la evolución primaria y secundaria de la porosidad.

Variación de la humedad residual

Para simplificar los cálculos se emplea la expresión que (Huitric, Raksit y Haug 1980) propusieron para la variación de la capacidad de campo en los residuos.

$$Hres(\%PesoSeco) = CCa_{ps} - \frac{CCa_{ps} - CCb_{ps}}{1 + CC_c/W}$$

Donde:

- CCa: Humedad residual inicial de los residuos, sin estar sometidos a presión, en % peso seco.
- CCb: Humedad residual mínima, que corresponde a la humedad que podría retener un residuo cuando está sometido a una presión infinita, en % peso seco.
- CCc: Parámetro de calibración, como el anterior, que define la rapidez de la variación de la humedad residual con la profundidad entre los valores extremos CCa y CCb, en kg/m^2 .
- W: Peso total sobre la celda entre área horizontal, en kg/m^2

Variación de la permeabilidad

A medida que se comprimen los residuos, se produce una reducción en la conductividad hidráulica saturada por reducción del volumen de huecos disponible para el flujo. La variación de K en las distintas capas, se estima en función de la densidad seca (Bleiker, Farquhar y McBean 1995).

$$K = K_0 \cdot \exp[-0,0076(d_{seca} - d_{secaini})]$$

Donde:

- K_0 : Permeabilidad inicial del residuo (m/s)
- $d_{secaini}$: Densidad seca inicial del residuo (kg/m^3)

Variación de los canales preferenciales

El flujo a través de canales preferenciales varía al compactarse el residuo, por doble razón: disminución del volumen de la celda afectado por canales preferenciales (μ) y cambio de la permeabilidad de los mismos (y por tanto, de f_K , factor de permeabilidad saturada del material en la zona canalizada).

Como el factor f_K se aplica sobre la permeabilidad saturada del material y ésta se corrige en función de la densidad de la celda, la permeabilidad de la zona canalizada varía de forma directa por efecto de los asientos (primarios y secundarios).

En cuanto al volumen de la celda que se encuentra canalizado, se acepta que sigue una tendencia análoga a la variación de la humedad residual. De esta forma, si μ varía entre su valor inicial y cero (cuando el residuo está tan compactado que ya no se producen flujos preferenciales), la expresión de cálculo del volumen canalizado a lo largo del tiempo es:

$$\mu(\%Vol. Canalizado) = \mu_{inicial} \left(1 - \left[\frac{1}{1 + \frac{CC_c}{W}} \right] \right)$$

Donde:

- CC_c : Parámetro de calibración de la variación de la humedad residual, que define la rapidez de la variación de μ con la profundidad entre los valores extremos $\mu_{inicial}$ y cero, en kg/m^2 .
- W : Presión total sobre la celda entre área horizontal, en kg/m^2

2.3.5. Gestión de lixiviados

Es posible modelizar distintas estrategias de recirculación de lixiviados al interior del residuo, de manera independiente o combinada. Se diferencia entre recirculación de lixiviados cuando el vertedero se encuentra en explotación y cuando ha sido cerrado (operaciones de recuperación y posclausura). Las opciones de aplicación del lixiviado en el residuo que se contemplan son seis: prehumectación del residuo, riego en la línea de vertidos, riego mediante difusores, lagunas sobre la superficie, inyección directa mediante tuberías horizontales, e inyección directa mediante pozos verticales.

El algoritmo de cálculo de los volúmenes y contaminantes implicados comprende dos secciones principales: el modelo de sistema de almacenamiento y el de datos de explotación del sistema, más los modelos específicos de inyección/extracción de lixiviados en pozos verticales. A continuación se presenta cada uno de ellos:

Modelización del sistema de almacenamiento

El sistema de almacenamiento de lixiviados se modeliza como un depósito donde se producen aportes y pérdidas instantáneas de agua, así como fenómenos de depuración que modifican las características biológicas del lixiviado almacenado.

Como aportes de agua, al depósito pueden llegar los lixiviados extraídos por los sistemas de drenaje del vertedero y las escorrentías superficiales “conectadas” y “no conectadas”. En cuanto a las pérdidas de agua, se puede extraer parte del volumen almacenado en el depósito bien para llevar a estación de tratamiento o bien para recirculación en el vertedero.

El depósito puede estar sometido a fenómenos climatológicos, principalmente aportes debidos a la lluvia y pérdidas por evaporación. Para calcular estos fenómenos, tal y como se describió en los apartados hidrológicos anteriores, se consideran los modelos de Penman y de Hargreaves según se disponga de datos procedentes de una estación meteorológica completa o básica.

Así, en cada instante de tiempo durante la simulación y tras el balance de masas realizado sobre el depósito, en el sistema de almacenamiento de lixiviados existirá un volumen de agua, con unas características contaminantes determinadas, disponible para su recirculación.

Los modelos de depuración de los lixiviados en el depósito permiten calcular las variaciones en la materia contaminante como consecuencia de su retención en el depósito. El modelo de depuración adoptado es semejante a un “modelo de lagunaje” en el que se produce, por un lado, degradación de la materia disuelta biodegradable presente en el lixiviado y, por otro, sedimentación de la fracción sedimentable. Ambos fenómenos simulados con cinéticas de primer orden según se expone a continuación:

Degradación:

$$\Delta DMb = -K'bl \cdot \Delta t \cdot DMb$$

$$K'bl(T dep) = Kbl(10^{\circ}C)\theta^{(T dep-10)}$$

Sedimentación:

$$\frac{dDM}{DM} = -Kdl \cdot dt \cdot fs \rightarrow \Delta DM = -Kdl \cdot \Delta t \cdot fs \cdot DM$$

Siendo:

- Kbl: Tasa de degradación de la materia disuelta biodegradable a 10° C (d⁻¹)
- K'bl: Tasa de degradación de la materia disuelta biodegradable a la temperatura considerada
- θ : Coeficiente de Arrhenius para Kbl
- Kdl: Tasa de sedimentación (d⁻¹)
- DM: Materia disuelta en el lixiviado almacenado
- DMb: Materia disuelta biodegradable en el lixiviado almacenado
- fs: Fracción sedimentable de la materia disuelta en el lixiviado almacenado

Datos de explotación de la recirculación

Los parámetros que permiten establecer en cada paso de tiempo la cantidad de lixiviado recirculado aportado a cada una de las celdas son los que se describen a continuación:

- a) Volumen máximo diario a recircular por celda (m^3/d). Este volumen se aplicará a cada una de las celdas afectadas de forma uniformemente distribuida en cada hora a lo largo del día. Para cada paso de tiempo (el cálculo hidráulico se realiza cada hora), el volumen introducido está limitado por la humedad de saturación de la celda y el volumen de lixiviados disponibles en el sistema de almacenamiento.
- b) Lixiviados disponibles para recircular. Se pueden especificar los volúmenes de agua procedentes del vertedero que llegan al depósito de lixiviados y que, por tanto, van a estar disponibles para ser recirculados. Se puede seleccionar entre lixiviados por dren, escorrentía superficial conectada y escorrentía superficial no conectada.
- c) Condición para que se realice la recirculación. Se consideran tres tipos de condicionantes:
 - a. Lluvia del periodo anterior (mm/d) menor que un valor predefinido.
 - b. Volumen de biogás producido (m^3/d) mayor que un valor determinado. Si el volumen de biogás producido ($\text{CH}_4+\text{CO}_2+\text{H}_2$) no supera el valor introducido, no se producirá la recirculación.
 - c. Recirculación siempre, es decir, no limitada por ninguno de los anteriores.
- d) Periodo de recirculación. Se pueden definir varios periodos de recirculación descritos por sus fecha iniciales y finales. Así, para que se realice la recirculación de lixiviados en una celda en un instante determinado durante la simulación, se deberá cumplir la doble condición: por un lado que el día de la simulación esté dentro de un “periodo de recirculación” y, por otro, que se cumpla la condición de lluvia o biogás en caso de que esta exista.
- e) Definición de zonas. Se definen sobre el vertedero las celdas que están afectadas por cada uno de los sistemas de recirculación definidos. De esta forma se podrán haber definido las características de cada uno de los sistemas de recirculación y luego localizar sobre el terreno cuáles se utilizan y sobre que zonas.

Pozos de inyección de lixiviados

Las características que modelizan un pozo de inyección para la recirculación de lixiviados son las siguientes:

- H_p (m): Cota del nivel de agua en el pozo (se supone constante)
- z_p (m): Cota del fondo del pozo
- r_p (m): Radio del pozo. Normalmente en los pozos que se utilizan en vertederos, varía entre 0,5 y 0,6 metros.
- Sh (%): Porcentaje de perforaciones de la superficie lateral

Además, las características de la celda residuo donde se ubica dicho pozo son las siguientes:

- h_{RSU} (m): Altura de la celda
- z_{celda} (m): Cota del fondo de la celda
- H_{libre} (m): Cota de la lámina de agua acumulada en el fondo de la celda
- h_{libre} (m): Altura de la lámina de agua acumulada en el fondo de la celda ($H_{libre} - z_{celda}$)
- K_H (m/s): Permeabilidad horizontal saturada del residuo (10 - 4 m/s)
- e : Porosidad de la celda (Volumen huecos / Volumen total)
- r_f : Frente del volumen de agua inyectado a la celda

$$Q(t) = 2 \cdot \pi \cdot K_H \cdot h_{RSU} \frac{H_p - h_c}{\ln\left(\frac{r_f(t)}{r_p}\right)}$$

$$\Delta Volumen_{inyectado}(\Delta t) = Q \cdot \Delta t$$

donde se puede considerar que $h_c = z_{celda} + h_{RSU}$ (cota superior de la celda)

El volumen de agua que entra en cada instante de tiempo desde el pozo de inyección a cada una de las celdas afectadas rellena el volumen de huecos no saturados en ese instante, esto es, una altura ($h_{RSU} - h_{libre}$), desplazando el frente como si se tratase de un émbolo.

$$r_f(t+1) = \left[r_f(t)^2 + \frac{\Delta Volumen}{\pi \cdot \eta_e \cdot (h_{RSU} - h_{libre})} \right]^{1/2}$$

Con la nueva posición del frente, se calcula el caudal que entra en el instante de tiempo siguiente, por lo que el cálculo se realiza de una forma iterativa (con un paso de tiempo Δt) hasta que la celda se sature totalmente o finalice el periodo de recirculación.

Para resolver la inestabilidad de la solución al comienzo de la inyección (cuando r_f coincide con r_p) se considera que en el instante inicial del proceso, el caudal que entra en la celda sólo depende de las características del tubo que constituye el pozo de inyección, según las ecuaciones de flujo a través de los orificios del tubo perforado.

$$Q_{\text{perforaciones}} = \sqrt{2g(H_p - H_{\text{libre}})} S_{\text{lateral}}$$

Siendo

$$S_{\text{lateral}} = 2 \cdot \pi \cdot r_p \cdot h_{RSU} \cdot S_h$$

Esta hipótesis no afecta de manera significativa a los resultados hasta que el frente se sitúa a 10 cm del pozo. A partir de ese instante el sistema funciona con la expresión de Thiem.

Para la primera hora, se calcula el volumen de agua que inyecta el pozo en cada una de las celdas afectadas con un incremento de tiempo de un minuto. Para las horas restantes el cálculo se realiza cada hora.

Pozos de extracción de lixiviados

Para estimar los volúmenes de agua extraídos por unidad de tiempo de cada celda atravesada por un pozo de extracción de lixiviados, estos se pueden relacionar con la altura de la superficie libre (h_{libre}) de la celda en cada instante, considerando que el nivel de agua en el pozo es constante (en principio nulo).

Considerando que en la celda se ha alcanzado el estado estacionario, el caudal (m^3/s) que puede extraerse se calcula mediante la expresión:

$$Q = \pi \cdot K_H \frac{h_0^2 - h_p^2}{\ln(r_0/r_p)}$$

Donde:

- h_0 (m): Altura de la superficie libre a una distancia del pozo r_0 (radio de influencia)
- h_p (m): Altura del nivel de agua en el pozo (para simplificar, vamos a considerar que el sistema de bombeo colocado, garantiza que el nivel de agua en el pozo es nulo)
- r_p (m): Radio del pozo
- K_H (m/s): Permeabilidad horizontal saturada del residuo
- r_0 (m): Radio de influencia, tomado como el radio de la circunferencia cuyo área coincide con el área horizontal de la celda

El caudal extraído se iguala a la altura de agua acumulada sobre el fondo impermeable de la celda de residuo (hlibre), dato calculado para cada celda en cada instante de tiempo. Así se obtiene la siguiente expresión, que permite calcular, para cada intervalo de tiempo, el volumen (m^3) de agua que se puede bombear desde cada celda afectada por un pozo de extracción, conociendo las características del pozo y la altura libre acumulada:

$$Vol = \pi \cdot K_H \cdot r_p \frac{(1,25 \cdot Hlibre)^2}{\ln(r_0)} \Delta t$$

Capítulo 3. Metodología

3.1. Introducción

El método propuesto y utilizado en este trabajo para la evaluación de criterios de diseño de vertederos se fundamenta en:

- Identificar el conjunto de variables de diseño que se desea evaluar.
- Definir el conjunto de parámetros de control que representen los impactos y efectos que se desea tener en cuenta a la hora de evaluar esas variables de diseño.
- Desarrollar un conjunto de modelos de vertedero que recojan todas las combinaciones posibles de los valores de las variables de diseño.
- Simular por computador dichos modelos para obtener el valor de los parámetros de control en diferentes escenarios.
- Analizar los datos resultantes con herramientas que permitan evaluar de forma eficiente la relación entre las variables de diseño y los parámetros de control y obtener las conclusiones correspondientes.

En el caso de un vertedero real, puede ser que la morfología del vertedero ya venga predefinida (salvo que se incluya como una o más variables de diseño a estudiar). En el caso de un estudio teórico como el que se plantea en este trabajo como ejemplo de aplicación de la metodología, es necesario definir un modelo básico teórico a partir del cual se realizan las variaciones necesarias para obtener todos los modelos.

La metodología que se propone es aplicable a cualquier tipo de vertedero, siendo posible seleccionar tanto los criterios de diseño que resulten de más interés como aquellos parámetros de control que mejor reflejen los impactos que se desea evaluar. En este trabajo se ha definido un modelo teórico básico de geometría sencilla para poder mostrar la eficacia de la metodología en esta primera aplicación. Así mismo se han seleccionado unos criterios de diseño y parámetros de control que, aun siendo simples, permitan obtener unos primeros resultados prácticos generales de interés.

El modelo básico para este ejemplo de aplicación consiste en un vertedero en área, con vida útil típica en diseño, de 20 años, para albergar los residuos generados por una población equivalente de 500.000 habitantes, para lo cual se establece una superficie de vertido cuadrada de 400 x 400 m.

3.2. Variables de diseño

A continuación se enumeran y se describen las variables de diseño seleccionadas para aplicar el método de estudio propuesto en este trabajo.

Altura de capa (“Capa”)

La altura de capa continua de residuos, entre capas de cobertura intermedia, es una variable de explotación importante, pues tiene repercusión en varios aspectos. Por un lado, cuanto mayor sea la altura, menor cantidad de material de cobertura es necesario para verter la misma cantidad de residuos, lo que implica un ahorro económico y de espacio. Por otro, una mayor altura de residuo sin cubrir con un frente de vertido de las mismas dimensiones, implica que el residuo está descubierto durante más tiempo, con las posibles consecuencias de generación de olores, voladura de materiales ligeros, penetración de mayor cantidad de agua de lluvia, etc.

Se han seleccionado dos valores representativos para la altura de capa que corresponden con 3 y 5 m.

Densidad de compactación del residuo (“Densidad”)

El grado de compactación del residuo depende de las características del propio residuo, de la maquinaria empleada para su extensión y compactación, del espesor de cada tongada extendida y del número de pasadas de la maquinaria sobre cada tongada. Una mayor compactación asegura mayor estabilidad geotécnica y ahorro de espacio en el vertedero, pero implica un mayor coste de explotación (en maquinaria y operación). Con maquinaria específica trituradora-compactadora de vertedero (tana) se alcanzan densidades de 700 kg/m^3 con intensidades medianas/bajas de compactación, pudiéndose llegar a alcanzar densidades mayores de 900 kg/m^3 con intensidades altas.

Se proponen, por tanto, dos densidades diferentes para el residuo compactado, la primera de 700 kg/m^3 y la segunda de 900 kg/m^3 .

Espesor de cobertura (“Cobertura”)

La cobertura intermedia sobre las capas de residuo permite evitar, durante la explotación, problemas de olores por emisiones gaseosas producto de la degradación del residuo, el acceso al residuo de animales que se convertirían en vectores sanitarios, reducir la cantidad de agua de lluvia que penetra en el vertedero, reducir el impacto estético del frente de vertido, constituir la base para la creación de caminos de acceso al frente, etc.

Como cobertura se han utilizado materiales muy diversos: desde arcillas, hasta materiales residuales como compost o escorias, pasando por láminas plásticas impermeables que se retiran al comenzar el vertido en la capa siguiente. Otra opción común hoy en día es la extensión de una capa arcillosa en espesor suficiente para cumplir con los objetivos comentados, que luego, al depositar la siguiente capa de residuos, se retira por rascado, para recuperación de material, ahorro de espacio y asegurar la continuidad hidráulica en toda la altura del vertedero.

En este estudio se han elegido dos casos extremos: la cobertura tradicional con 0,3 m de arcilla y la ausencia de cobertura intermedia. En el primer caso se ha adoptado un espesor de cobertura de 0,3 m, mientras que en el otro dicho espesor es de 0 m.

Aislamiento durante la explotación (“Aislamiento”)

Para estudiar el efecto de distintas opciones de cobertura intermedia sobre el vertedero, se han establecido dos casos: sin aislamiento o con aislamiento. En el caso sin aislamiento la infiltración en las celdas superficiales depende de las características de la cobertura que tengan las celdas (en caso de tenerla, ya que es otra variable de diseño) o bien del residuo si no existe cobertura. Con aislamiento implica que las celdas superficiales del vertedero (de residuo, no de residuo sellado) se cubren con algún material que las aísla de la infiltración debida a precipitaciones durante el periodo de explotación (caso de la instalación de una lámina plástica impermeable que funciona idealmente). Este efecto de aislamiento solo tiene lugar cuando la celda es superficial, una vez que colocamos otra celda encima ya no tiene sentido, dado que no afecta al flujo vertical de humedad entre ambas.

También es importante destacar que en la realidad nunca es posible obtener un aislamiento completo de la superficie durante la explotación. Las láminas aislantes impermeables se quitan cada día para seguir vertiendo de manera que siempre permiten entrar agua, al menos por el frente de vertido. No obstante, como simplificación se opta por un caso ideal de impermeabilización.

Por lo tanto, se consideran dos valores para el aislamiento durante la explotación: con aislamiento y sin aislamiento.

Sellado posterior a la clausura (“Sellado”)

Se han estudiado dos opciones de sellado: tradicional, con capa de arcilla poco permeable, y con lámina plástica supuesta perfectamente impermeable. Es equivalente al aislamiento durante la explotación, pero en este caso se aplica a las celdas de residuo sellado, es decir, aquellas con las que se cubre definitivamente el residuo para proceder a su clausura.

Por lo tanto se consideran dos valores para el sellado posterior a la clausura: poco permeable e impermeable.

Recirculación de lixiviados

Se contemplan tres variantes de recirculación. Modelo sin recirculación, modelo con recirculación por riego superficial y modelo de recirculación mediante pozos. La recirculación consiste en recoger el lixiviado que genera el vertedero a través de sus sistemas de recolección en la capa drenante y volverlo a introducir en el vertedero.

La recirculación por riego superficial consiste en ir vertiendo lixiviado sobre la superficie del vertedero durante el periodo de explotación del mismo. En este caso se aplica dicho vertido de forma homogénea sobre todas aquellas celdas de tipo residuo que no tengan sobre ellas ninguna otra (que se encuentren en la superficie).

La recirculación por pozos es similar a la anterior con dos salvedades. La primera es que no se aplica a la superficie, sino que se inyecta el lixiviado en pozos excavados en el vertedero que afectan a varias capas del mismo. La segunda salvedad es que no se realiza solo durante el periodo de explotación sino también durante el periodo de posclausura.

Para poder reflejar estas tres variantes se crean dos variables de diseño denominadas: Recirculación por riego y recirculación por pozos. Ambas variables pueden adoptar los valores de aplica o no aplica.

3.3. Parámetros de control

Los parámetros de control actúan como indicadores que determinan en qué medida son adecuados los criterios de diseño. Es necesario realizar un análisis detallado de todos los posibles impactos que puede generar un vertedero para, a continuación, buscar magnitudes físicas concretas con las cuales sea posible cuantificar de forma objetiva dichos impactos. Para un determinado impacto es posible que se definan varios parámetros de control, de forma que cada uno de ellos aporte matices relacionados con dicho impacto.

Dentro de la metodología seguida, el análisis y la definición de los parámetros de control se realizó a priori, antes de realizar ninguna simulación. Por ello, como se verá, algunos de los parámetros propuestos inicialmente resultaron poco efectivos una vez en la fase de análisis de resultados. Así mismo, fue necesario añadir, en esa fase, otros parámetros que resultaban atractivos a la vista de los resultados. A continuación se presenta el conjunto completo de parámetros de control y en el capítulo de análisis de datos se discute sobre la bondad de cada uno de ellos.

Se han definido seis categorías de parámetros de control que intentan recoger los impactos y efectos más importantes del vertedero:

- Cantidad de lixiviado. Es la cantidad de contaminación líquida (lixiviado) que el vertedero emite a lo largo del tiempo. Resulta interesante, además de la cantidad total, distinguir entre la cantidad de lixiviado emitida durante el periodo de explotación y durante el periodo de posclausura. Es preferible que, para una misma cantidad total, se emita más cantidad durante la explotación y menos durante la posclausura. Así mismo resulta de interés conocer la variabilidad de dicha cantidad de lixiviados en el tiempo, es decir, si su generación es más o menos constante. Este es un factor importante a la hora de planificar los sistemas de transporte, almacenaje y tratamiento de los lixiviados generados. A igual cantidad total generada, cuanto más constante sea dicha generación, más se podrá optimizar desde el punto de vista de costes el tratamiento de dichos lixiviados.
- Calidad de lixiviado. Es el grado de contaminación presente en el lixiviado generado. Cuanto más contaminado esté dicho lixiviado, más costoso resulta su tratamiento. En este trabajo la contaminación se mide a través de la demanda química de oxígeno (DQO o COD en inglés) y de la presencia de nitrógeno amoniacal (NH_4) en el lixiviado. Al igual que en la cantidad de lixiviado se distingue entre el periodo de explotación y el de posclausura. También se intenta establecer el grado de variabilidad de dicha magnitud a lo largo del tiempo.

- Emisión de metano y generación de energía. El gas metano (CH₄) emitido por un vertedero produce impactos ambientales debido a su efecto invernadero, a los componentes tóxicos que suelen acompañarlo, a su potencial explosivo y a la generación de olores. Por otro lado, es posible utilizar dicho gas metano para la generación de energía. Se analiza en esta categoría la cantidad de gas metano (CH₄) generado por el vertedero a lo largo del tiempo, la cantidad de energía que sería posible generar a partir de dicho metano y, por último, la cantidad de gas metano residual (remanente de la generación de energía) que es emitido a la atmósfera.
- Asentamientos. Un vertedero puede suponer una ocupación importante de suelo. El vertedero va creciendo progresivamente con residuos cuyo grado de compactación y humedad evoluciona de forma importante a lo largo del tiempo. Ya sea por la necesidad de establecer ciertos elementos estructurales sobre su superficie durante la explotación (ej. para generación de energía a partir del biogás) o para realizar cualquier tipo de instalación más estable en un futuro posterior a su clausura, es necesario establecer qué asentamientos superficiales se van a producir a lo largo del tiempo. Resulta de interés conocer los asentamientos máximos, mínimos y medios que se produzcan, los mayores asentamientos diferenciales, y en qué medida el asentamiento se produce durante la explotación o en la posclausura.
- Contaminación remanente. Se ha evaluado en categorías anteriores la contaminación líquida y gaseosa que produce el vertedero a lo largo del tiempo. Pero no menos importante es conocer el potencial contaminante que queda latente en el vertedero al final del periodo de explotación o al final del periodo total de vida útil considerado. Cuantificaremos la contaminación remanente por la cantidad de carbono biodegradable presente tanto al final del periodo de explotación, como al final del periodo total de simulación.
- Cantidad de agua en el vertedero. La cantidad de agua presente dentro del vertedero a lo largo del tiempo tiene un cierto impacto en la estabilidad estructural del vertedero. En este trabajo se ha interpretado como un factor de riesgo cuando sea especialmente alta. Para ello se valora la cantidad máxima de agua presente en el total del vertedero a lo largo del tiempo y la cantidad total de agua presente al final del periodo de simulación.

Se enumeran, a continuación, los parámetros de control definidos en este trabajo agrupados, en cada una de las categorías establecidas. Se presenta el nombre corto que se utiliza para referenciarlos a lo largo del trabajo, las unidades en las que se miden y una breve descripción de los mismos.

Cantidad de lixiviado

- **VTot**. Volumen total de lixiviados (m^3) recogido por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo.
- **VTotExp**. Volumen total de lixiviados (m^3) recogido por los sistemas de recolección de lixiviados durante el periodo de explotación del vertedero.
- **VTotPos**. Volumen total de lixiviados (m^3) recogido por los sistemas de recolección de lixiviados con posterioridad al cierre del vertedero (durante el periodo de posclausura).
- **VMaxDia**. Volumen máximo diario de lixiviados (m^3) recogido por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo.
- **VMaxMes**. Volumen máximo mensual de lixiviados (m^3) recogido por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo.
- **VFinalBalsa**. Volumen final de lixiviados (m^3) presente en la balsa de almacenamiento en el último día del periodo para aquellos casos en los que se aplique recirculación.

Calidad del lixiviado

- **CODTotal**. Carga total de DQO (kg) producida por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo.
- **CODTotalExp**. Carga total de DQO (kg) producida por los sistemas de recolección de lixiviados durante el periodo de explotación del vertedero.
- **CODTotalPos**. Carga total de DQO (kg) producida por los sistemas de recolección de lixiviados con posterioridad al cierre del vertedero (durante el periodo de posclausura).
- **CODMaxMes**. Carga máxima mensual de DQO (kg) producida por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo.
- **CODMaxConMes**. Máxima concentración media mensual de DQO (mg/l) producida por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo.

- **CODFinalBalsa.** Carga total de DQO (kg) presente en la balsa de almacenamiento de lixiviados en el último día del periodo para aquellos casos en los que se aplique recirculación.
- **NH4Total.** Carga total de NH_4^+ (kg) producida por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo.
- **NH4TotalExp.** Carga total de NH_4^+ (kg) producida por los sistemas de recolección de lixiviados durante el periodo de explotación del vertedero.
- **NH4TotalPos.** Carga total de NH_4^+ (kg) producida por los sistemas de recolección de lixiviados con posterioridad al cierre del vertedero (durante el periodo de posclausura).
- **NH4MaxMes.** Carga máxima mensual de NH_4^+ (kg) producida por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo.
- **NH4MaxConMes.** Máxima concentración media mensual de NH_4 (mg/l) producida por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo.
- **NH4FinalBalsa.** Carga total de NH_4^+ (kg) presente en la balsa de almacenamiento de lixiviados en el último día del periodo para aquellos casos en los que se aplique recirculación.

Emisión de metano y generación de energía

- **CH4Generado.** Cantidad total de metano generado por el vertedero (kg) durante todo el periodo.
- **EnergíaTotal.** Cantidad total de energía¹ (MW * h) que es capaz de producir el vertedero a partir del metano emitido durante todo el periodo.
- **CH4Residual.** Cantidad total de metano liberado por el vertedero (kg) tras aplicar la generación de energía (metano no aprovechable) durante todo el periodo.

¹ Para estimar la cantidad de energía aprovechable se multiplica el 70 % del metano generado (se supone que el 30 % se pierde por emisiones difusas) por el potencial energético del metano (10,4 kWh/m³). También se tiene en cuenta que el rendimiento de los motores de generación suele ser del orden del 30 %. Calculando así la energía captada, se ha considerado que mientras ésta sea mayor de 0,25 MW se puede aprovechar, pero no por debajo, porque los motores habituales de este tipo son de al menos 0,25 MW (hasta 3MW).

Asentamientos

- **MinSett.** Asiento mínimo, en porcentaje con respecto a la altura del vertedero, producido en la superficie del mismo una vez transcurrido todo el periodo.
- **MaxSett.** Asiento máximo, en porcentaje con respecto a la altura del vertedero, producido en la superficie del mismo una vez transcurrido todo el periodo.
- **AvgSett.** Asiento medio, en porcentaje con respecto a la altura del vertedero, producido en la superficie del mismo una vez transcurrido todo el periodo.
- **AvgSettExp.** Asiento medio, en porcentaje con respecto a la altura del vertedero, producido en la superficie del mismo una vez finalizado el periodo de explotación.
- **DiffSett.** Diferencia entre el asiento máximo y el asiento medio en la superficie del vertedero, expresada como porcentaje respecto a la altura del mismo, una vez transcurrido todo el periodo.

Contaminación remanente

- **SolidCarExp.** Cantidad total de carbono sólido biodegradable remanente (kg) presente en el vertedero al final del periodo de explotación.
- **TotalCarExp.** Cantidad total de carbono biodegradable remanente (kg) presente en el vertedero al final del periodo de explotación.
- **SolidCarPos.** Cantidad total de carbono sólido biodegradable remanente (kg) presente en el vertedero al final de todo el periodo.
- **TotalCarPos.** Cantidad total de carbono biodegradable remanente (kg) presente en el vertedero al final de todo el periodo.
- **FinalCelNH4.** Cantidad total de NH_4 (kg) presente en el vertedero al final de todo el periodo.

Cantidad de agua en el vertedero

- **HumedadMax.** Cantidad máxima de agua (m^3) presente en el vertedero a lo largo de todo el periodo.
- **HumedadFinal.** Cantidad final de agua (m^3) presente en el vertedero al final de todo el periodo.

3.4. Definición de los modelos de vertedero

3.4.1. Definición del modelo básico

3.4.1.1. Morfología base del modelo

A la hora de definir el modelo básico es necesario tener en cuenta dos criterios fundamentales. El primero es la cantidad de residuo que llega al vertedero, que debe ser equivalente en el modelo básico y en todos los modelos derivados de él. El segundo criterio es la superficie en planta del vertedero que debe ser la misma en todos ellos para lograr una vida útil común y para garantizar que la precipitación de lluvia que reciben sea la misma.

Para que todos los modelos sean homogéneos se selecciona una morfología de vertedero que permite albergar diferentes espesores de capa y de cobertura en las capas con ligeras variaciones. Dicha morfología consiste en un tronco de pirámide de planta cuadrada, como se puede observar en la Ilustración 1.

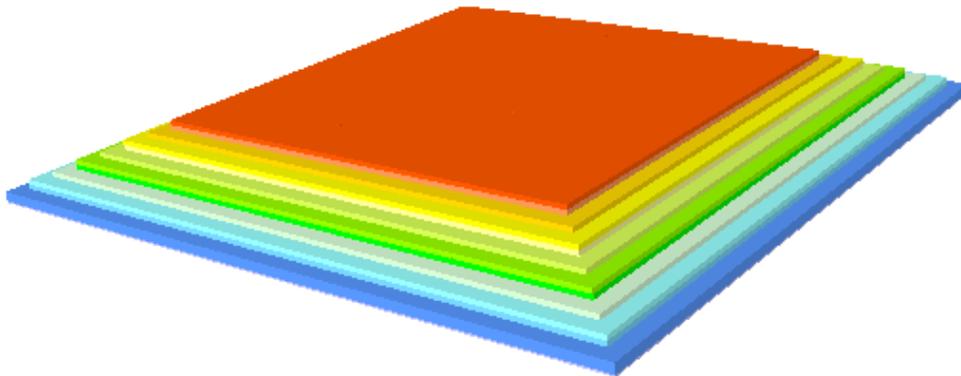


Ilustración 1. Morfología base del modelo.

Se define, por tanto, un terreno llano de planta cuadrada de 400 x 400 m sobre el que se asienta el vertedero. Dado que sobre el terreno la primera capa es una capa drenante, es necesario definir también un borde de terreno en el perímetro que evite pérdidas laterales de la capa drenante. El residuo se colocará sobre la capa drenante en capas sucesivas. En la Ilustración 2 se muestra un corte transversal del modelo donde se aprecian estos aspectos.

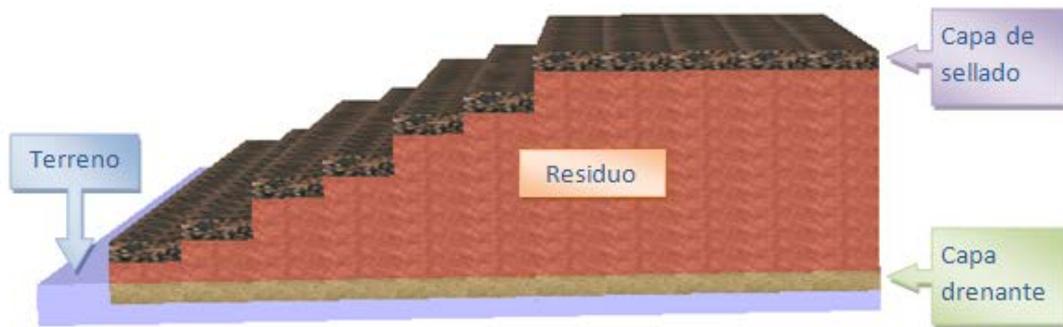


Ilustración 2. Morfología base del modelo. Corte transversal.

Para realizar las simulaciones, es necesario discretizar el vertedero en pequeños cubos que denominaremos celdas. En planta, se divide el vertedero mediante una cuadrícula con divisiones de 10 x 10 m (ejes x e y) dando lugar a 42 x 42 celdas de terreno en la primera capa y a 40 x 40 celdas de suelo drenante en la segunda capa². En alzado se divide el vertedero en capas cuya altura es una de las variables de diseño a tener en cuenta. Por lo tanto, se discretiza el vertedero en celdas de 10 m x 10 m x 3 o 5 m de altura. A continuación se muestra una ilustración que representa la discretización.

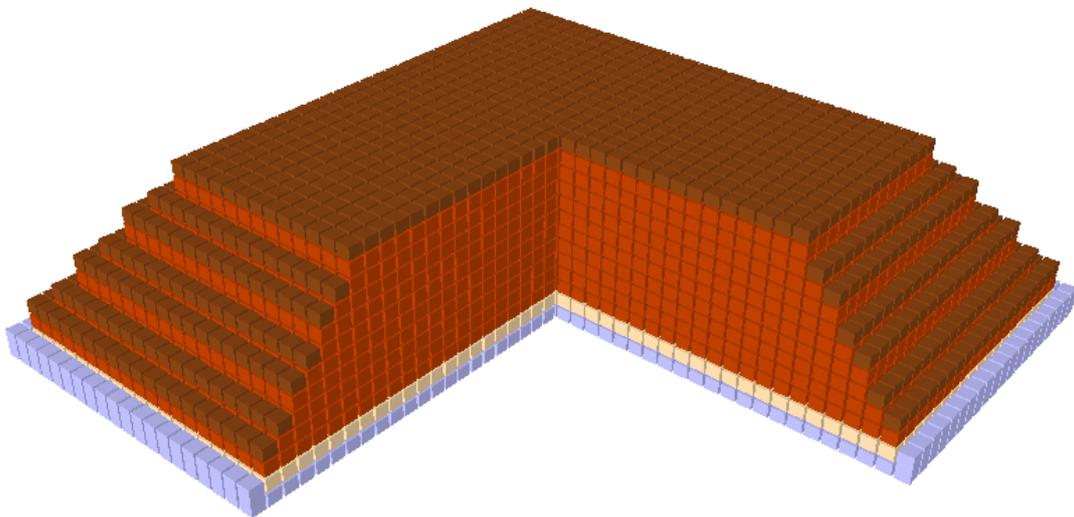


Ilustración 3. Morfología base del modelo. Discretización.

² El perímetro de la segunda capa está formado por terreno que actúa como cinturón de contención de la capa drenante ante flujos laterales. Por ello, si bien la capa drenante es de 40 x 40 celdas que conforman la superficie de base de nuestro vertedero (400 x 400 m), la segunda capa tiene en realidad 42 x 42 celdas que incluyen tanto la capa drenante como el terreno.

3.4.1.2. Orden de llenado

El orden de llenado del vertedero es común para todas las variantes. En primer lugar se coloca la capa drenante y a continuación se van relleno las celdas de residuos en cada capa según un patrón determinado, que reproduce lo que podría ser un sistema de explotación habitual. Para comprender dicho patrón se propone un ejemplo sencillo de dos capas de residuos. La primera (inferior) es de 5x5 celdas y la segunda (superior) es de 3x3 celdas. Después de colocar las nueve celdas de la segunda capa, procederemos a sellar las 16 celdas perimetrales de residuo de la primera capa que quedaron al descubierto.

El algoritmo de llenado sería el representado en la Ilustración 4 para la primera y la segunda capa vistas en planta (eje x en horizontal e y en vertical), donde se asigna el número indicativo de orden de llenado para cada celda. Las dos figuras superiores representan el llenado de la primera capa (la inferior) y las dos figuras inferiores representan el llenado de la segunda capa (la superior) así como el sellado realizado perimetralmente sobre la primera capa (la inferior). El “talud” de la “pirámide” se va sellando al finalizar cada capa.

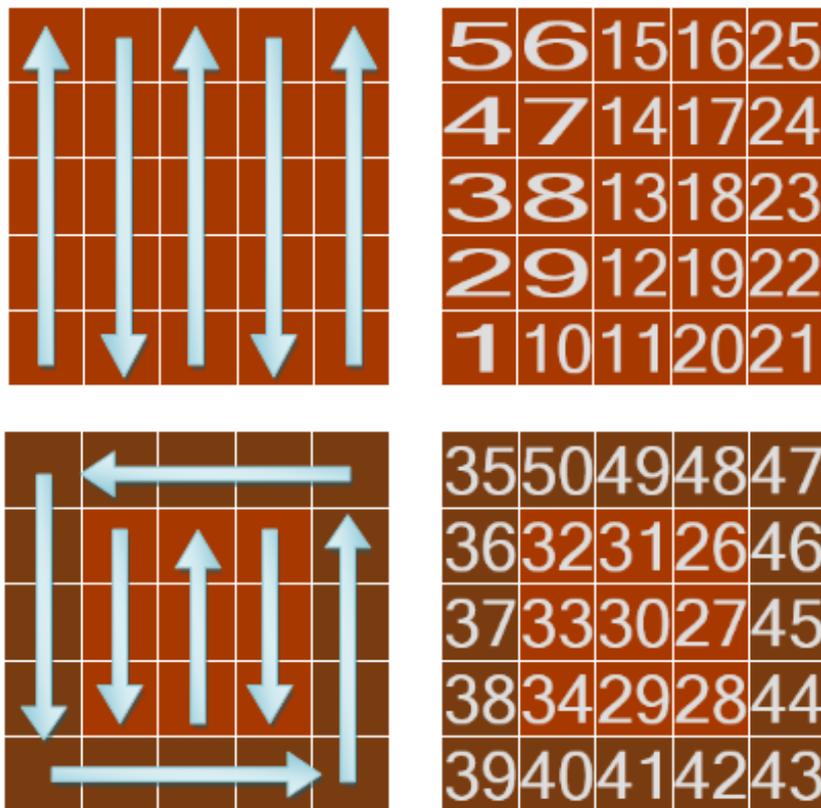


Ilustración 4. Patrón de llenado de las capas de residuo.

3.4.1.3. Sistema de recolección de lixiviados

El sistema de recolección de lixiviados es común para todas las variantes del vertedero y está situado en la capa de drenaje. Según se aprecia en la Ilustración 5, consiste en dos colectores centrales de diámetro 600 mm con tuberías de drenaje transversal de polietileno de diámetro 200 mm conectadas cada 100 m. Cada dren transversal recorre aproximadamente 100 m. La Tabla 1 recoge los parámetros representativos del sistema de recolección de lixiviados utilizado en todos los modelos.

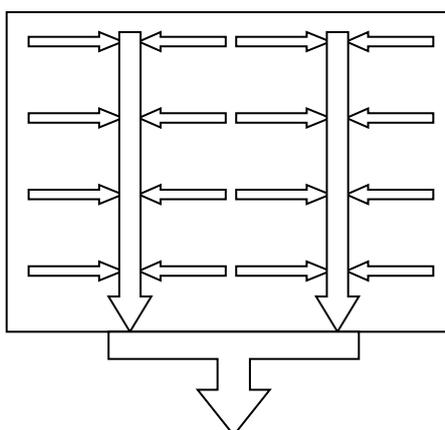


Ilustración 5. Diagrama del sistema de recolección de lixiviados.

Propiedades	Valor
Pendiente de la tubería (tanto por uno)	0,02
Número de celdas servidas por el dren	10
Pendiente de las capas hacia el dren (tanto por uno)	0,01
Conductancia hidráulica equivalente bajo el dren (s^{-1})	0
Diámetro de la tubería (m)	0,2
Coefficiente de Manning	0,009

Tabla 1. Características del sistema de recolección de lixiviados.

Las dimensiones se han elegido para que el sistema de recolección de lixiviados funcione correctamente (no se sature en ningún momento), es decir, que no suponga un factor limitante sino un mecanismo para poder evaluar la cantidad de lixiviado generada por el vertedero a través de la capa drenante.

Se podría haber considerado el sistema de recolección de lixiviados, así como el orden de llenado, como alguno de los factores de diseño a evaluar, pero se ha considerado que existían otros factores con más interés, ponderando la dificultad de su evaluación y el valor de los resultados que se esperan obtener.

3.4.1.4. Gestión de la escorrentía superficial

Dentro del balance de agua superficial, se evalúa básicamente la precipitación de lluvia, la evaporación del agua de lluvia, la evaporación del agua en superficie o en las capas superficiales del vertedero y la infiltración de agua al vertedero. Si dicho balance resulta en un excedente de agua, este agua se irá acumulando en la superficie en forma de charco.

La altura máxima de charco establecida para el modelo es de 0,05 metros, para tener en cuenta el posible encharcamiento de la superficie por efecto de asientos diferenciales o la ejecución durante la explotación de capas de cobertura con pendiente insuficiente. Cuando se alcanza la altura máxima de charco se produce la escorrentía superficial del agua. Cuando dicha escorrentía se produce sobre la capa drenante se ha considerado que está conectada al sistema de recolección de lixiviados. Cuando se produce sobre el resto de capas de residuo se considera como no conectada, para representar la evacuación correcta del agua mediante pendiente superficial hacia canales externos. Este modelo se puede apreciar en la Ilustración 6.

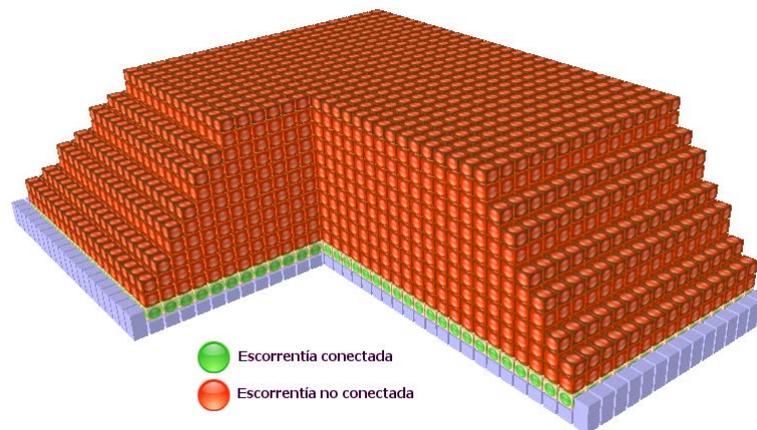


Ilustración 6. Tratamiento de la escorrentía superficial.

3.4.2. Escenarios estudiados

3.4.2.1. Generación de residuos

Se plantean dos escenarios diferentes de generación de residuos, que se denominan “modelo europeo” y “modelo americano”. Cada uno trata de representar las características del residuo que llega a vertedero en cada uno de los continentes. El “modelo europeo” intenta representar la aplicación de objetivos de reciclaje y de reducción de vertido de materia orgánica impuestos por la normativa europea y española a lo largo del periodo, mientras que el “modelo americano” (más por América del Sur y Central que del Norte) no aplica estos objetivos dado que dichas políticas no están tan instauradas. La elección de los nombres, además, obedece a un intento de encontrar dos nombres cortos, significativos y fáciles de recordar de estos dos escenarios.

Para que el vertedero tenga una vida útil equivalente en los dos escenarios, es necesario ajustar ambos modelos para que la cantidad total de residuos que llegan a vertedero sea la misma. Por otro lado, la caracterización de cada componente individual del residuo (restos de alimentos, papel, cartón, etc.) en sus elementos básicos (carbono, hidrógeno, oxígeno, etc.) es también común a ambos modelos. Por tanto, la variación entre el modelo europeo y el americano se plasma principalmente en la cantidad de cada componente del residuo que se va vertiendo a lo largo de la vida útil del vertedero.

A continuación, en la Tabla 2 se enumeran los componentes básicos del residuo que se han tenido en cuenta en el modelo con su descomposición en elementos químicos representada en porcentaje.

Componente	Carbono	Hidrogeno	Oxigeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Cartón	44,00 %	5,90 %	44,60 %	0,30 %	0,20 %	5,00 %
Goma y cuero	69,00 %	9,00 %	5,80 %	6,00 %	0,20 %	10,00 %
Inerte	26,30 %	3,00 %	2,00 %	0,50 %	0,20 %	68,00 %
Madera	49,50 %	6,00 %	42,70 %	0,20 %	0,10 %	1,50 %
Alimentos	48,00 %	6,40 %	37,60 %	2,60 %	0,40 %	5,00 %
Metal	4,50 %	0,60 %	4,30 %	0,10 %	0,00 %	90,50 %
Pañales y celulosa	44,50 %	6,00 %	49,50 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Papel	43,50 %	6,00 %	44,00 %	0,30 %	0,20 %	6,00 %
Plástico	60,00 %	7,20 %	22,80 %	0,00 %	0,00 %	10,00 %
Poda y siega	47,80 %	6,00 %	38,00 %	3,40 %	0,30 %	4,50 %
Tetrabrick	50,00 %	7,30 %	33,50 %	0,20 %	0,20 %	8,80 %
Textil	55,00 %	6,60 %	31,20 %	4,60 %	0,15 %	2,45 %
Vidrio	0,50 %	0,10 %	0,40 %	0,10 %	0,00 %	98,90 %

Tabla 2. Componentes del residuo. Descomposición en elementos químicos.

También es necesario definir otras propiedades de los componentes del residuo como son su capacidad de biodegradación, su humedad, su densidad global y su poder calorífico. En la Tabla 3 se representan estas magnitudes algunas de las cuales han sido adaptadas de (Tchobanoglous, Theisen y Vigil 1994).

Magnitud	Unidad
Biodegradabilidad	Enumerado
Fracción biodegradable	% peso seco
Contenido global de humedad	% peso húmedo
Densidad global	T/m ³ residuo húmedo
Poder calorífico	Kcal/kg residuo seco

Componente	Biodegradabilidad	Fracción biodegradable	Humedad	Densidad	Poder calorífico
Cartón	Rápida	41 %	5 %	0,08 T/m ³	4127 kcal/kg
Goma y cuero	Lenta	0 %	6 %	0,26 T/m ³	5295 kcal/kg
Inerte	Inerte	0 %	6 %	1,00 T/m ³	48 kcal/kg
Madera	Lenta	17 %	20 %	0,32 T/m ³	4620 kcal/kg
Materia orgánica	Rápida	64 %	70 %	0,48 T/m ³	3324 kcal/kg
Metal	Inerte	0 %	2 %	1,15 T/m ³	177 kcal/kg
Pañal y celulosa	Inerte	0 %	20 %	0,22 T/m ³	4000 kcal/kg
Papel	Rápida	40 %	6 %	0,13 T/m ³	4206 kcal/kg
Plástico	Inerte	0 %	2 %	0,13 T/m ³	7995 kcal/kg
Poda y siega	Lenta	35 %	60 %	0,23 T/m ³	3613 kcal/kg
Tetrabrick	Inerte	0 %	2 %	0,13 T/m ³	6100 kcal/kg
Textil	Lenta	32 %	10 %	0,10 T/m ³	4913 kcal/kg
Vidrio	Inerte	0 %	2 %	0,48 T/m ³	48 kcal/kg

Tabla 3. Componentes del residuo. Propiedades.

Una vez definidos los componentes del residuo, es necesario establecer la generación de dichos componentes durante el periodo de vertido, que para todos los modelos se define desde el 01/01/2009 hasta el 31/12/2029.

Generación en el modelo europeo.

El denominado “modelo europeo” es aquel que tiene en cuenta las normativas europeas de reciclaje y reducción del vertido de materia orgánica.

Para calcular la producción de residuos se ha estimado una población sostenida desde 1995 de 500.000 habitantes (equivalente a la de Cantabria). Para la producción unitaria de residuos se toma 1 kg/hab/d en 1995 y 1,7 kg/hab/d en 2009 (según el Plan de Residuos de Cantabria (Gobierno de Cantabria 2006) en el que se menciona que en 2007 la generación es de 1,61 kg/hab/d).

Si se parte de la composición (porcentaje de cada componente presente en el residuo) de residuos en Cantabria en 1998, se obtiene la generación de residuos que muestra la Tabla 4 para los años 1995 y 2008, que sirven de soporte para los cálculos siguientes.

	Composición de residuos en Cantabria 1998 (%)	Generación en 1995 (T)	Generación a partir de 2008 (T)
Tasa de generación (kg/hab/d)		1	1,7
Habitantes		500.000	500.000
Cartón	3,6	6.570,00	11.169,00
Goma y cuero	0,7	1.277,50	2171,75
Inerte	3,6	6.570,00	11.169,00
Madera	0,6	1.095,00	1861,50
Materia orgánica	50,5	92.162,50	156.676,30
Metal	3,9	7.117,50	12.099,75
Pañal y celulosa	3,4	6.205,00	10.548,50
Papel	10,9	19.892,50	33.817,25
Plástico	9,3	16.972,50	28.853,25
Poda y siega	1,8	3.285,00	5.584,50
Tetrabrick	1,5	2.737,50	4.653,75
Textil	2,6	4.745,00	8.066,50
Vidrio	7,6	13.870,00	23.579,00
Total (T/año)		182.500	310.250
Total (T/día)		500	850

Tabla 4. Modelo de residuos europeo. Composición inicial de los residuos.

Se supone que se cumplen los objetivos de reciclaje y de reducción del vertido de la materia orgánica impuestos por la actual normativa de residuos.

- Reducción del vertido de la materia orgánica: RD 1481/2001 (Ministerio de Medio Ambiente 2002). Dicho real decreto especifica como materia biodegradable aquella que puede descomponerse, como residuos de alimentos y de jardín, papel y cartón. Impone los siguientes límites al vertido de residuos biodegradables (RB):
 - 16/07/2006 cantidad de RB \leq 75 % RB generados en 1995
 - 16/07/2009 cantidad de RB \leq 50 % RB generados en 1995
 - 16/07/2016 cantidad de RB \leq 35 % RB generados en 1995

Esto se traduce en la generación de residuos para los años 2009 y 2016 que se representa en la Tabla 5.

Componente	Generado 1995 (T)	Objetivo 2009	Generado 2009 (T)	Objetivo 2016	Generado 2016 (T)
Cartón	6.570,00	50 %	3.285,00	35 %	2.299,50
Materia orgánica	92.162,50	50 %	46.081,25	35 %	32.256,87
Papel	19.892,50	50 %	9.946,25	35 %	6.962,37
Poda y siega	3.285,00	50 %	1.642,50	35 %	1.149,75

Tabla 5. Modelo de residuos europeo. Reducción del vertido de materia orgánica.

- Objetivos de reciclaje: RD 252/2006 (Ministerio de la Presidencia 2006). En 03/2006 el reciclaje (R) global de materiales de envasado debe cumplir $25 \% \leq R \leq 45 \%$. Para cada material se cumplirá que $R \geq 15 \%$. En esa fecha se valorizarán (V) los envases tal que $50 \% \leq V \leq 65 \%$. El 31/12/2008, para todos los residuos de envases, $V \geq 60 \%$. El 31/12/2008 se cumplirán los siguientes objetivos:
 - Vidrio en envases: $R \geq 60 \%$
 - Papel y cartón en envases $R \geq 60 \%$
 - Metales en envases $R \geq 50 \%$
 - Plásticos $R \geq 22,5 \%$
 - Madera $R \geq 15 \%$

Para aplicar estos porcentajes habría que cuantificar la cantidad de cada componente que corresponde a residuo de envase, pero en el Plan Nacional de Residuos, y en el de Cantabria, consideran todo el material para hacer las cuentas en cada caso.

En la Tabla 6 se representa la variación de la generación de componentes debida al reciclado de los mismos. No se aplica al papel y al cartón dado que el anterior objetivo de disminución de materia orgánica es más restrictivo que el de reciclaje para ellos.

Componente	Generado > 2008 (T)	Reciclaje (%)	Reciclado (T)	Generado neto a partir de 2008 (T)
Madera	1861,50	15 %	279,22	1.582,27
Metal	12.099,75	50 %	6.049,87	6.049,87
Plástico	28.853,25	22,5 %	6.491,98	22.361,27
Vidrio	23.579,00	60 %	14.147,40	9.431,60

Tabla 6. Modelo de residuos europeo. Reciclaje de materiales de envasado.

Aplicando todos estos criterios se obtiene la generación de residuos en los años 2009 y 2016. Extrapolando los datos se obtiene la generación de residuos en los años comprendidos entre 2009 y 2016 y se supone que desde el 2016 hasta la finalización del periodo en 2029 la generación anual de residuos permanecerá homogénea. Se presentan los datos finales de generación anual por componentes en la Tabla 7.

Componente	2009 (T)	2010 (T)	2011 (T)	2012 (T)	2013 (T)
Cartón	3.285	3.144	3.003	2.863	2.722
Goma y cuero	2.172	2.172	2.172	2.172	2.172
Inerte	11.169	11.169	11.169	11.169	11.169
Madera	1.582	1.582	1.582	1.582	1.582
Alimentos	46.081	44.106	42.131	40.157	38.182
Metal	6.050	6.050	6.050	6.050	6.050
Pañal y celulosa	10.549	10.549	10.549	10.549	10.549
Papel	9.946	9.520	9.094	8.667	8.241
Plástico	22.361	22.361	22.361	22.361	22.361
Poda y siega	1.643	1.572	1.502	1.431	1.361
Tetrabrick	4.654	4.654	4.654	4.654	4.654
Textil	8.067	8.067	8.067	8.067	8.067
Vidrio	9.432	9.432	9.432	9.432	9.432

Componente	2014 (T)	2015 (T)	2016 (T)	2017(T)	> 2017 (T)
Cartón	2.581	2.440	2.300	2.300	2.300
Goma y cuero	2.172	2.172	2.172	2.172	2.172
Inerte	11.169	11.169	11.169	11.169	11.169
Madera	1.582	1.582	1.582	1.582	1.582
Alimentos	36.207	34.232	32.257	32.257	32.257
Metal	6.050	6.050	6.050	6.050	6.050
Pañal y celulosa	10.549	10.549	10.549	10.549	10.549
Papel	7.815	7.389	6.962	6.962	6.962
Plástico	22.361	22.361	22.361	22.361	22.361
Poda y siega	1.291	1.220	1.150	1.150	1.150
Tetrabrick	4.654	4.654	4.654	4.654	4.654
Textil	8.067	8.067	8.067	8.067	8.067
Vidrio	9.432	9.432	9.432	9.432	9.432

Tabla 7. Modelo de residuos europeo. Generación anual por componentes.

Por lo tanto, en el periodo de explotación del vertedero, comprendido entre el 01/01/2009 y el 31/12/2029, se vierten en él un total de 2.565.909 T de residuo.

Generación en el modelo americano.

Para el modelo de generación “americano”, es necesario que la generación total corresponda con 2.565.909 T. Como caso extremo, se supone que todos los residuos generados van a parar al vertedero, sin reducción de los materiales reciclables ni de la materia orgánica. Se toma, por lo tanto, la composición (porcentaje de cada componente presente en el residuo) de residuos en Cantabria en 1998 que permanecerá constante a lo largo de los años y se ajusta la generación de cada año para obtener el total deseado.

Para que el vertedero tenga una vida útil igual al europeo, se asume que da servicio a una población menor (334.756 hab), de tal manera que para la tasa de generación de 1 kg/hab/d se genere, entre 2009 y 2029, una cantidad anual de 122.186 T. En el último mes del último año se realiza un ligero ajuste para cuadrar el valor total. La composición del modelo americano se representa en la Tabla 8.

Componente	Composición de residuos en Cantabria 1998 (%)	2009 -2028 (T)	2029 (T)
Cartón	3,6	4.398,696	4.398,812
Goma y cuero	0,7	855,300	855,323
Inerte	3,6	4.398,696	4.398,812
Madera	0,6	733,116	733,135
Alimentos	50,5	61.703,920	61.705,550
Metal	3,9	4.765,260	4.765,385
Pañal y celulosa	3,4	4.154,328	4.154,437
Papel	10,9	13.318,272	13.318,623
Plástico	9,3	11.363,304	11.363,603
Poda y siega	1,8	2.199,348	2.199,406
Tetrabrick	1,5	1.832,796	1.832,844
Textil	2,6	3.176,832	3.176,916
Vidrio	7,6	9.286,140	9.286,384

Tabla 8. Modelo de residuos americano. Generación anual por componentes.

Una vez definidos los dos modelos de residuos se presentan unos datos globales después de procesarlos. En la Tabla 9, donde se presentan datos generales de cada modelo, podemos observar, como era de esperar, que el modelo americano presenta un residuo mucho más húmedo y con una mayor biodegradabilidad tanto rápida como global. En la Tabla 10 se presentan datos globales de biodegradabilidad por elementos químicos para cada uno de los dos modelos.

	Modelo europeo	Modelo americano
Fecha inicial de vertido	01/01/2009	01/01/2009
Fecha final de vertido	31/12/2029	31/12/2029
Residuo vertido (T húmedo)	2.565.909	2.565.909
Residuo vertido (T seco)	1.922.708	1.564.486
Humedad (% húmedo)	25,07	39,03
Poder calorífico (kcal/kg seco)	4.010,78	3.629,17
Rápidamente biodegradable (T seco)	208.865	369.383
Lentamente biodegradable (T seco)	55.534	26.980
Orgánico no biodegradable (T seco)	1.118.011	760.840
Cenizas (T seco)	540.299	407.283
Factor de accesibilidad	0,65	0,65
Factor de arrastre	0,10	0,10

Tabla 9. Modelo de residuos. Datos globales generales.

Categoría (T seco)	Carbono	Hidrogeno	Oxigeno	Nitrógeno	Azufre	Ceniza
	Modelo europeo					
Rapida. biodeg.	102.343	13.771	88.132	3.897	722	11.619
Rapida. no biodeg.	89.663	12.143	82.056	2.413	553	10.772
Lenta. biodeg.	30.817	3.710	18.540	2.378	89	1.428
Lenta. no biodeg.	100.766	12.432	46.833	7.616	284	7.463
Inerte	467.423	58.314	235.270	1.613	633	509.017
Total no biodeg.	657.853	82.889	364.158	11.641	1.470	527.252
	Modelo americano					
Rapida. biodeg.	180.995	24.355	155.863	6.892	1.277	20.548
Rapida. no biodeg.	158.572	21.476	145.117	4.267	979	19.050
Lenta. biodeg.	14.695	1.782	9.346	1.108	50	793
Lenta. no biodeg.	44.906	5.548	22.646	3.320	141	3.382
Inerte	218.437	27.163	107.221	799	249	363.509
Total no biodeg.	421.914	54.187	274.984	8.386	1.369	385.942

Tabla 10. Modelo de residuos. Datos globales por elementos químicos.

Es necesario tener presente que, si bien anteriormente asignamos a cada componente del residuo una densidad, y sería posible obtener la densidad global del residuo colocado en el vertedero a partir de sus componentes, no se utilizará este dato. El grado de compactación de los residuos colocados en el vertedero es una de las variables de diseño a analizar, luego, se asignarán densidades típicas de 700 kg/m³ o 900 kg/m³ al residuo vertido, con independencia de la densidad que le correspondiera por su composición.

3.4.2.2. Climatología

Se plantean dos casos diferentes de climatología que se denominan “modelo cantábrico” y “modelo mediterráneo”. Se han intentado buscar dos casos que representen dos climas muy diferentes dentro de las tipologías españolas. Entre los datos que conforman cada uno de los modelos meteorológicos, el que más influencia tendrá sobre el comportamiento del vertedero es la precipitación. Es por ello que se han seleccionado climatologías que presentan una gran diferencia en este aspecto.

Para el “modelo cantábrico” se han tomado los datos meteorológicos recogidos en Cantabria durante un año y se han repetido en los años sucesivos durante el periodo de simulación. Para el “modelo mediterráneo” los datos utilizados corresponden a la climatología en Palma de Mallorca.

Se podría haber recurrido a técnicas de predicción climatológica para obtener los datos esperados en el periodo 2009-2029 o incluso recurrir a datos históricos de años anteriores asumiendo que el clima para el modelo en el periodo considerado sería el mismo, por ejemplo, que en el periodo 1989-2009. En cambio, se ha optado por un clima homogéneo a lo largo de los años que permita analizar los datos finales sin introducir un ruido añadido que no aportaría nada significativo a los resultados. La ventaja de aplicar dos modelos meteorológicos diferentes no está tanto en la exactitud anual de cada uno de ellos sino en la diferencia que presentan.

Dentro de los modelos meteorológicos se incluyen datos diarios de precipitación, humedad relativa, temperatura, velocidad del viento y horas de insolación, así como datos horarios de precipitación.

La Tabla 11 muestra los datos globales anuales representativos de cada uno de los dos modelos.

Datos medios diarios	Modelo cantábrico	Modelo mediterráneo
Precipitación (mm)	2,87	1,33
Humedad relativa (%)	74,02	73,11
Temperatura (°C)	15,53	17,52
Velocidad del viento (km/h)	7,25	9,17
Insolación (horas)	4,50	7,44

Tabla 11. Modelos climáticos. Datos medios diarios globales.

La Ilustración 7 representa la comparativa de medias mensuales (para los dos modelos) de la precipitación, la velocidad del viento, la temperatura y las horas de insolación. La humedad relativa no se ha incluido ya que, al estar ambas localizaciones geográficas cerca del mar, no presenta variaciones apreciables.

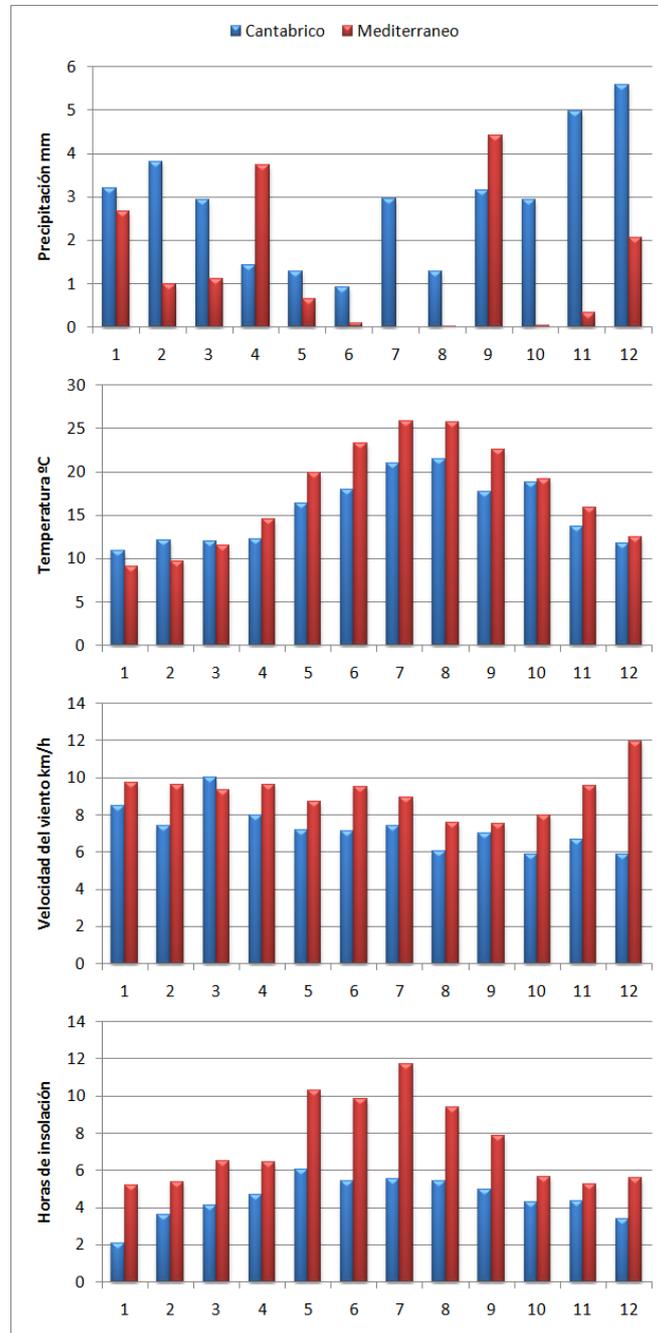


Ilustración 7. Modelos climáticos. Datos medios diarios por meses.

3.4.3. Adaptación del modelo básico a las variantes de diseño

Es necesario adaptar el modelo básico para que incluya los distintos valores de las variables de diseño objeto de estudio. El objetivo final es obtener un número de modelos para simular equivalente a la combinación de todas las variantes de diseño. A continuación, se enumeran las variables de diseño con sus posibles valores y cómo influye cada una de ellas a la hora de adaptar el modelo básico.

- **Altura de capa.** Se han seleccionado dos valores para la altura de capa que corresponden con 3 y 5 m. La altura de capa condicionará la morfología del vertedero (número de capas y extensión de éstas).
- **Compactación del residuo.** Se proponen dos densidades diferentes para el residuo compactado, la primera de 700 kg/m^3 y la segunda de 900 kg/m^3 . La densidad del residuo influirá en la morfología del vertedero ya que, si bien el peso del residuo a verter es constante, a diferentes densidades diferentes volúmenes y distinto número de capas y/o extensión de las mismas. Además, ciertas propiedades de las celdas dependerán de la densidad como por ejemplo la humedad de saturación, la conductividad hidráulica o el ratio de compresión.
- **Espesor de cobertura sobre las capas de residuo.** Se presentarán dos casos: sin cobertura y con un espesor de cobertura de 0,3 metros. La presencia o ausencia de cobertura afectará a la morfología del vertedero ya que su presencia resta volumen a un determinado modelo haciendo necesaria la inclusión de más capas y/o modificando la extensión de las mismas. También influye en algunas propiedades de las celdas como la velocidad de infiltración o la profundidad de evaporación.
- **Aislamiento durante la explotación.** Se establecen los casos sin aislamiento o con aislamiento. Esta variable no afecta a la morfología del vertedero y básicamente se representa asignando a las celdas una velocidad de infiltración de 0.
- **Sellado posterior a la clausura.** Se establecen los casos de poco permeable e impermeable. Tampoco afecta a la morfología y se representa con una velocidad de infiltración 0 en las celdas de residuo sellado impermeable.

- Recirculación de lixiviados. Esta variable de diseño, siendo quizás la más compleja en su tratamiento, no influye ni en la morfología ni en las propiedades de las celdas del modelo. Simplemente es un “submodelo” que se incorpora sobre el modelo base para representar el almacenamiento de los lixiviados extraídos del vertedero y la recirculación de los mismos. Se plantean tres casos: sin recirculación, con recirculación mediante riego superficial, que solo se llevaría a cabo durante la explotación, y con recirculación por pozos, que se prolongaría en el periodo de posclausura.

3.4.3.1. Tipos de celda

En el modelo de vertedero aparecen tres tipos fundamentales de celdas:

- Celdas de suelo drenante. Corresponden a la capa drenante situada sobre el terreno.
- Celdas de residuo (o celdas vertedero). Son las celdas que representan los residuos vertidos a lo largo del tiempo. Una de sus características destacables es que en su parte superior puede estar presente la capa de cobertura. Para una altura de capa de 3 m, si no existe cobertura, el volumen de la celda ocupada por residuos será de 10 x 10 x 3 m mientras que si la celda tiene una cobertura de 0,3 m de espesor, el volumen destinado a residuos será de 10 x 10 x 2,7 m. Los tipos de celda de residuo se ven afectados por tres variables de diseño: El grado de compactación del residuo (densidad), el espesor de la cobertura y el aislamiento durante la explotación. Dado que cada variable de diseño puede tener dos valores diferentes se obtienen 8 combinaciones que dan lugar a la definición de 8 tipos de celda de residuo.
- Celdas de residuo sellado (o celdas vertedero sellado). Para clausurar el vertedero, sobre todos los residuos vertidos se coloca una capa de clausura final. Esto se representa con las celdas de residuo sellado cuya estructura es similar a las celdas de residuo en cuanto que tienen una parte inferior destinada a residuo y una parte superior formada por la cobertura. La diferencia estriba principalmente en el espesor de dicha cobertura y sus características de infiltración con respecto a una celda de residuo. Los tipos de celda de residuo sellado se ven afectados por dos variables de diseño: El grado de compactación del residuo (densidad) y el sellado posterior a la clausura, lo que da lugar a la definición de 4 tipos de celda de residuo sellado.

Celdas de suelo drenante.

En la Tabla 12 se representan las características del tipo de celda suelo drenante.

Propiedad	Valor	Referencia
Humedad inicial (% peso húmedo)	6	Igual a la capacidad de campo
Densidad inicial (kg/m ³ húmedo)	1300	
Humedad residual inicial (% peso húmedo)	2	(Tchobanoglous, Theisen y Vigil 1994)
Capacidad de campo inicial (% peso húmedo)	6	(Tchobanoglous, Theisen y Vigil 1994)
Humedad de saturación inicial (% peso húmedo)	15	Calculada
Conductividad hidráulica vertical inicial (m/s)	1E-03	
Conductividad hidráulica horizontal inicial (m/s)	1E-03	
Velocidad mínima de infiltración (mm/h)	12	(Huber y Dickinson 1988)
Velocidad máxima de infiltración (mm/h)	150	(Huber y Dickinson 1988)
Parámetro de Horton (1/h)	4,14	(Huber y Dickinson 1988)
Profundidad de evaporación (m)	0	No hay capilaridad
Punto de marchitez (% de la humedad residual)	100	Igual a la humedad residual
Acumulación máxima en superficie (m)	0,1	Adoptada
Humedad residual mínima (% peso húmedo)	2	Igual a la inicial
Influencia de la sobrecarga en la humedad residual (kg/m ²)	4536	(Huitric, Raksit y Haug 1980)
Ratio de compresión	0	Supuesto incompresible

Tabla 12. Tipos de celda. Propiedades del suelo drenante.

Celdas de residuo (o celdas vertedero).

En la Tabla 13 se definen los 8 tipos de celda residuo creados, indicando su relación con las variables de diseño que implementan.

Nombre del tipo de celda	Densidad (kg/m ³)	Cobertura (m)	Aislamiento
Vertedero 1	700	No presente	Sin aislamiento
Vertedero 2	700	No presente	Con aislamiento
Vertedero 3	700	0,3	Sin aislamiento
Vertedero 4	700	0,3	Con aislamiento
Vertedero 5	900	No presente	Sin aislamiento
Vertedero 6	900	No presente	Con aislamiento
Vertedero 7	900	0,3	Sin aislamiento
Vertedero 8	900	0,3	Con aislamiento

Tabla 13. Tipos de celda residuo. Relación con las variables de diseño.

La densidad afecta a la humedad residual, la capacidad de campo, la humedad de saturación, a las conductividades hidráulicas horizontal y vertical, al ratio de compresión y al ratio de asentamiento por pérdida de masa. Todas estas magnitudes disminuyen cuanto mayor es la densidad. En la Tabla 14 se representan los valores de estas propiedades para las dos densidades estudiadas.

Propiedad	700 kg/m ³	900 kg/m ³
Humedad residual inicial (% peso húmedo)	16	13
Capacidad de campo inicial (% peso húmedo)	29	24
Humedad de saturación inicial (% peso húmedo)	48	34
Conductividad hidráulica vertical inicial (m/s)	5E-06	1E-06
Conductividad hidráulica horizontal inicial (m/s)	1E-05	2E-06
Ratio de compresión	0,16	0,14
Ratio de pérdida de masa asentamiento	0,25	0,2

Tabla 14. Tipos de celda residuo. Influencia de la densidad.

Cuando un tipo de celda residuo tiene cobertura, dicha cobertura presenta las características que se describen en la Tabla 15, correspondientes a una cobertura margoarcillosa:

Propiedad	Valor	Referencia
Espesor (m)	0,3	Valor típico
Humedad inicial (% peso húmedo)	27	Capacidad de campo
Densidad inicial (kg/m ³ peso húmedo)	1400	
Humedad residual inicial (% peso húmedo)	26	Calculada
Capacidad de campo inicial (% peso húmedo)	27	(Schroeder, y otros 1994)
Humedad de saturación inicial (% peso húmedo)	30	(Schroeder, y otros 1994)
Conductividad hidráulica vertical inicial (m/s)	2E-07	

Tabla 15. Tipos de celda residuo. Propiedades de la cobertura.

La presencia o no de cobertura afecta a la profundidad de evaporación y a las velocidades de infiltración siendo menores estas últimas cuando está presente, como se aprecia en la Tabla 16.

Propiedad	Sin cobertura	Con cobertura	Referencia
Velocidad mínima de infiltración (mm/h)	11,4	1,3	(Huber y Dickinson 1988)
Velocidad máxima de infiltración (mm/h)	152,4	50,8	(Huber y Dickinson 1988)
Profundidad de evaporación (m)	0	0,3	(Schroeder, y otros 1994)

Tabla 16. Tipos de celda residuo. Influencia de la cobertura.

La presencia o no de aislamiento superficial durante la explotación se traduce en que, cuando existe aislamiento, las velocidades de infiltración mínima y máxima son 0. En el caso opuesto de que no exista aislamiento, dichas velocidades de infiltración vendrán definidas por la presencia o no de cobertura según vimos en la Tabla 16.

Existen otra serie de características comunes para todos los tipos de celda residuo la mayoría de las cuales tienen que ver con el modelo de degradación de residuos. Dichas características se presentan en la Tabla 17.

Propiedad	Valor	Referencia
Tiempo de activación hidrólisis rápida (d)	0	Moduelo (*1)
Tiempo de activación hidrólisis lenta (d)	365	Moduelo (*1)
Tiempo de activación metanogénesis (d)	365	Moduelo (*1)
Velocidad hidrólisis rápida (d^{-1})	0,0025	0,00023 a 0,05 (*2)
Velocidad hidrólisis lenta (d^{-1})	0,00013	0,00003 a 0,0025 (*2)
Velocidad acetogénesis (d^{-1})	0,03	0,005 a 0,1 (*2)
Velocidad metanogénesis acetoclástica (d^{-1})	0,19	0,005 a 0,7 (*2)
Velocidad metanogénesis hidrogenoflica (d^{-1})	160	50 a 500 (*2)
Fracción de carbono transformado en compuestos intermedios	0,76	Moduelo (*1)
Fracción de carbono transformado en acetato en la hidrólisis	0,2	Moduelo (*1)
Fracción de carbono transformado en acetato en la acetogénesis	0,68	Moduelo (*1)
Punto de marchitez (% de la humedad residual)	100	Igual a la humedad residual
Acumulación máxima en superficie (m)	0,05	Adoptado
Fracción del volumen afectada por caminos preferenciales (%)	25	(Rosqvist y Destouni 2000)
Ratio flujo preferencial/homogéneo conductividad hidráulica	100	Adoptado
Humedad residual mínima del residuo (% peso húmedo)	5	(Lobo, Sanchez, y otros 2003)
Influencia de la carga en la humedad residual (kg/m^2)	4536	(Huitric, Raksit y Haug 1980)
Parámetro de Horton (1/h)	4,14	(Huber y Dickinson 1988)

Tabla 17. Tipos de celda residuo. Propiedades comunes.

(*1) Valor propuesto por defecto en Moduelo. (A. Lobo 2003a)

(*2) Valor medio en el rango de valores hallados en trabajos anteriores (en cada caso se indica el rango).

Celdas de residuo sellado (o celdas vertedero sellado).

En cuanto a las celdas de tipo residuo sellado, es necesario definir 4 tipos de celda, ya que sus características se ven afectadas por el grado de compactación del residuo y por la existencia o no de sellado superficial. En la Tabla 18 se presentan los 4 tipos de celda residuo sellado que se han definido y su relación con las variables de diseño que implementan.

Nombre del tipo de celda	Densidad (kg/m ³)	Sellado
Sellado 1	700	Permeable
Sellado 2	700	Impermeable
Sellado 3	900	Permeable
Sellado 4	900	Impermeable

Tabla 18. Tipos de celda residuo sellado. Relación con las variables de diseño.

Los valores de las propiedades de los tipos residuo sellado influenciadas por la densidad son los mismos que para las celdas de tipo residuo. En cuanto a la cobertura, todas las celdas de tipo residuo sellado tienen una cobertura de espesor 1,2 m con las mismas características que se presentaron anteriormente para la cobertura de las celdas de tipo residuo. Las propiedades comunes son, de igual forma, las mismas que para los tipos residuo a excepción de la profundidad de evaporación que en este caso es para los 4 tipos de 0 m y la acumulación máxima en superficie que es también de 0 m.

La principal diferencia con las celdas de tipo residuo está en las velocidades de infiltración que serán nulas cuando el sellado es "impermeable" y muy bajas cuando es "permeable". Desde este punto de vista realmente sería más correcto decir "poco permeable" o "semi permeable" en lugar de "permeable". En la Tabla 19 se representan estas magnitudes.

Propiedad	Sellado permeable	Sellado impermeable	Referencia
Velocidad mínima de infiltración (mm/h)	0,7	0	(Huber y Dickinson 1988)
Velocidad máxima de infiltración (mm/h)	25,4	0	(Huber y Dickinson 1988)
Profundidad de evaporación (m)	0	0	(Schroeder, y otros 1994)

Tabla 19. Tipos de celda residuo sellado. Influencia del tipo de sellado.

Concluyendo, en este apartado se han presentado las características de las celdas del modelo que sirven para reflejar los diferentes valores de nuestras variables de diseño. Se han definido tres tipos fundamentales de celdas: Suelo drenante, residuo y residuo sellado. Para cada uno de ellos se ha analizado las variables de diseño que los afectan y se han creados los “subtipos” necesarios para recoger todas las combinaciones (8 tipos de celda residuo y 4 tipos de celda residuo sellado). Para cada uno de estos tipos se han definido con precisión todas sus propiedades. En la Tabla 20 se presenta, a modo de resumen final, los tipos de celda empleados y su relación con las variables de diseño. Las casillas vacías de la tabla indican que ese tipo de celda se utilizará con independencia de la variable de diseño correspondiente (para cualquiera de sus valores).

Nombre del tipo	Densidad (kg/m ³)	Cobertura (m)	Aislamiento	Sellado
Suelo drenante				
Vertedero 1	700	No presente	Sin aislamiento	
Vertedero 2	700	No presente	Con aislamiento	
Vertedero 3	700	0,3	Sin aislamiento	
Vertedero 4	700	0,3	Con aislamiento	
Vertedero 5	900	No presente	Sin aislamiento	
Vertedero 6	900	No presente	Con aislamiento	
Vertedero 7	900	0,3	Sin aislamiento	
Vertedero 8	900	0,3	Con aislamiento	
Sellado 1	700			Poco permeable
Sellado 2	700			Impermeable
Sellado 3	900			Poco permeable
Sellado 4	900			Impermeable

Tabla 20. Tipos de celda. Relación con las variables de diseño.

3.4.3.2. Variantes en la morfología del modelo

El objetivo es crear las variantes necesarias de la morfología básica del modelo para representar las siguientes variables de diseño que afectan a dicha morfología: altura de capa de 3 o 5 metros, grado de compactación del residuo de 700 kg/m³ o 900 kg/m³ y presencia o no de cobertura de 0,3 m.

Las condiciones de contorno impuestas son las siguientes:

- El periodo de explotación del vertedero es constante para todos los modelos y es necesario verter todo el residuo de tal forma que se llene por completo el vertedero entre el 01/01/2009 y el 31/12/2029.

- Cualquiera de los modelos de generación de residuos origina una cantidad de residuos de 2.565.909 T. Dichos residuos tendrán un volumen de 3.665.584 m³ para una densidad de 700 kg/m³ y de 2.851.010 m³ para una densidad de 900 kg/m³.
- La morfología básica del modelo es la de un vertedero en área (un tronco de pirámide) de base cuadrada. En alzado (z) se discretiza el modelo en capas de 3 o 5 m. En planta (x, y) se discretiza el modelo en una cuadrícula de 10x10 m.
- El vertido se coloca sobre la capa drenante que tiene 400 x 400 m o bien 40 x 40 celdas una vez discretizado.
- La pendiente lateral del vertedero en alzado debe de acercarse a 3/1 (H/V) para garantizar la estabilidad del terreno. En cualquier caso, no puede haber más de dos capas de residuo consecutivas con la misma superficie.
- Las celdas que modelizan la colocación del residuo (tipo residuo) pueden tener o no una cobertura de 0,3 m que va incluida dentro de la propia celda. Cuando no existe cobertura, si la capa es de 3 m, la celda admite $10 \times 10 \times 3 = 300 \text{ m}^3$ de residuo, si existe cobertura admite $10 \times 10 \times 2,7 = 270 \text{ m}^3$. En el caso de capa de 5 m los volúmenes admitidos son de 500 m³ sin cobertura y de 470 m³ con ella.
- El vertedero tiene una capa de sellado sobre su superficie al final de la explotación. Las celdas que modelizan dicha capa de sellado (tipo residuo sellado) tienen una estructura similar a las celdas de tipo residuo con la diferencia que la cobertura, para todas ellas, es de 1,2 m. Por lo tanto estas celdas admiten, para capa de 3 m, 180 m³ de residuo y 380 m³ para capas de 5 m.
- Dado que la discretización en celdas no permitiría el vertido exacto de las 2.565.909 T (con capas de 5 m una celda más o menos supone 500 m³ de diferencia), se admite que la capa superior del vertedero (la capa de sellado) tenga una altura diferente al resto de capas que siguen la norma de los 3 o 5 m.

Cumpliendo con dichas condiciones de contorno se ha intentado obtener una morfología óptima para cada una de las combinaciones altura de capa – densidad – cobertura. En la Tabla 21 se muestran las 8 morfologías necesarias y su relación con las variables de diseño.

Nombre de la morfología	Altura de capa (m)	Cobertura (m)	Densidad (kg/m ³)
Morfología 1	3	No presente	700
Morfología 2	3	No presente	900
Morfología 3	3	0,3	700
Morfología 4	3	0,3	900
Morfología 5	5	No presente	700
Morfología 6	5	No presente	900
Morfología 7	5	0,3	700
Morfología 8	5	0,3	900

Tabla 21. Morfologías del modelo. Relación con las variables de diseño.

Para obtener las diferentes morfologías se ha desarrollado un programa de ordenador que sea capaz de evaluar cada caso y proporcione una solución adecuada. Desde la Ilustración 8 hasta la Ilustración 16 se presentan los resultados para cada una de las morfologías. Dado que las ilustraciones de las morfologías son esquemáticas, la representación visual del modelo en corte transversal no está a escala.



1	Nombre de la morfología y valores de las variables de diseño.
2	Coordenas de las celdas según el eje x.
3	Lado del cuadrado formado por la capa según el eje x.
4	Terreno.
5	Celdas de la capa drenante.
6	Celdas de tipo vertedero.
7	Celdas de tipo vertedero sellado.
a	Número de la capa según el eje z.
b	Número de celdas de la capa drenante.
c	Número de celdas de tipo vertedero por capa.
d	Número de celdas de tipo vertedero sellado por capa.
e	Orden de llenado de las celdas en cada capa con el formato "celdas vertedero celdas vertedero sellado".
f	Fecha de finalización de llenado de cada capa.
g	Número total de celdas de cada tipo: Capa drenante, vertedero y vertedero sellado.
h	Número total de celdas del modelo.

Ilustración 8. Morfologías del modelo. Leyenda.

Morfología 1. Altura de capa 3 metros. Sin cobertura. Densidad 700 kg/m ³ .														
X:	0	1	2	3	4	5	6	7	Capa	Drenaje	Residuo	Sellado	Orden de llenado	Finalización
									13			784	13725 - 14508	31/12/2029
									12		784		12941 - 13724	10/04/2029
									11		784	116	12041 - 12824 12825 - 12940	05/12/2027
									10		900	124	11017 - 11916 11917 - 12040	17/06/2026
									9		1024		9993 - 11016	14/10/2024
									8		1024	132	8837 - 9860 9861 - 9992	11/01/2023
									7		1156	140	7541 - 8696 8697 - 8836	17/02/2021
									6		1296		6245 - 7540	01/01/2019
									5		1296	148	4801 - 6096 6097 - 6244	09/10/2016
									4		1444	156	3201 - 4644 4645 - 4800	23/05/2014
									3		1600		1601 - 3200	30/09/2011
									2	1600			1 - 1600	01/01/2009
									1	Número de celdas			Número total de celdas: 14508	
Lado:	42	40	38	36	34	32	30	28		1600	11308	1600		

Ilustración 9. Morfologías del modelo. Definición de Morfología 1.

Morfología 2. Altura de capa 3 metros. Sin cobertura. Densidad 900 kg/m ³ .														
X:	0	1	2	3	4	5	6	7	Capa	Drenaje	Residuo	Sellado	Orden de llenado	Finalización
									10			784	10877 - 11660	31/12/2029
									9		784	240	9853 - 10636 10637 - 10876	10/10/2028
									8		1024	132	8697 - 9720 9721 - 9852	22/09/2026
									7		1156		7541 - 8696	14/04/2024
									6		1156	140	6245 - 7400 7401 - 7540	25/09/2021
									5		1296	148	4801 - 6096 6097 - 6244	29/12/2018
									4		1444	156	3201 - 4644 4645 - 4800	07/12/2015
									3		1600		1601 - 3200	14/07/2012
									2	1600			1 - 1600	01/01/2009
									1	Número de celdas			Número total de celdas: 11660	
Lado:	42	40	38	36	34	32	30	28		1600	8460	1600		

Ilustración 10. Morfologías del modelo. Definición de Morfología 2.

Morfología 3. Altura de capa 3 metros. Con cobertura. Densidad 700 kg/m ³ .														
X:	0	1	2	3	4	5	6	7	Capa	Drenaje	Residuo	Sellado	Orden de llenado	Finalización
									13			784	14829 - 15612	31/12/2029
									12		784	116	13929 - 14712 14713 - 14828	16/01/2029
									11		900	124	12905 - 13804 13805 - 13928	15/09/2027
									10		1024		11881 - 12904	09/03/2026
									9		1024	272	10585 - 11608 11609 - 11880	08/08/2024
									8		1296		9289 - 10584	27/09/2022
									7		1296	148	7845 - 9140 9141 - 9288	25/09/2020
									6		1444		6401 - 7844	29/07/2018
									5		1444	156	4801 - 6244 6245 - 6400	05/05/2016
									4		1600		3201 - 4800	13/12/2013
									3		1600		1601 - 3200	21/06/2011
									2	1600			1 - 1600	01/01/2009
									1	Número de celdas			Número total de celdas: 15612	
Lado:	42	40	38	36	34	32	30	28		1600	12412	1600		

Ilustración 11. Morfologías del modelo. Definición de Morfología 3.

Morfología 4. Altura de capa 3 metros. Con cobertura. Densidad 900 kg/m3.														
X:	0	1	2	3	4	5	6	7	Capa	Drenaje	Residuo	Sellado	Orden de llenado	Finalización
									10			1024	11469 - 12492	31/12/2029
									9		1024		10445 - 11468	29/03/2028
									8		1024	132	9289 - 10312 10313 - 10444	15/03/2026
									7		1156	288	7845 - 9000 9001 - 9288	30/12/2023
									6		1444		6401 - 7844	24/04/2021
									5		1444	156	4801 - 6244 6245 - 6400	10/06/2018
									4		1600		3201 - 4800	12/05/2015
									3		1600		1601 - 3200	06/03/2012
									2	1600			1 - 1600	01/01/2009
									1	Número de celdas			Número total de celdas: 12492	
Lado:	42	40	38	36	34	32	30	28		1600	9292	1600		

Ilustración 12. Morfologías del modelo. Definición de Morfología 4.

Morfología 5. Altura de capa 5 metros. Sin cobertura. Densidad 700 kg/m3.														
X:	0	1	2	3	4	5	6	7	Capa	Drenaje	Residuo	Sellado	Orden de llenado	Finalización
									8			784	9001 - 9784	31/12/2029
									7		784	372	7845 - 8628 8629 - 9000	20/08/2029
									6		1156	288	6401 - 7556 7557 - 7844	30/07/2026
									5		1444	156	4801 - 6244 6245 - 6400	22/08/2022
									4		1600		3201 - 4800	28/02/2018
									3		1600		1601 - 3200	31/07/2013
									2	1600			1 - 1600	01/01/2009
									1	Número de celdas			Número total de celdas: 9784	
Lado:	42	40	38	36	34	32	30	28		1600	6584	1600		

Ilustración 13. Morfologías del modelo. Definición de Morfología 5.

Morfología 6. Altura de capa 5 metros. Sin cobertura. Densidad 900 kg/m3.														
X:	0	1	2	3	4	5	6	7	Capa	Drenaje	Residuo	Sellado	Orden de llenado	Finalización
									7			900	7401 - 8300	31/12/2029
									6		900	256	6245 - 7144 7145 - 7400	28/09/2029
									5		1156	288	4801 - 5956 5957 - 6244	16/09/2025
									4		1444	156	3201 - 4644 4645 - 4800	24/08/2020
									3		1600		1601 - 3200	22/11/2014
									2	1600			1 - 1600	01/01/2009
									1	Número de celdas			Número total de celdas: 8300	
Lado:	42	40	38	36	34	32	30	28		1600	5100	1600		

Ilustración 14. Morfologías del modelo. Definición de Morfología 6.

Morfología 7. Altura de capa 5 metros. Con cobertura. Densidad 700 kg/m ³ .														
X:	0	1	2	3	4	5	6	7	Capa	Drenaje	Residuo	Sellado	Orden de llenado	Finalización
									8			1024	8713 - 9736	31/12/2029
									7		1024		7689 - 8712	08/11/2027
									6		1024	420	6245 - 7268 7269 - 7688	05/02/2025
									5		1444		4801 - 6244	13/06/2021
									4		1444	156	3201 - 4644 4645 - 4800	14/07/2017
									3		1600		1601 - 3200	21/04/2013
									2	1600			1 - 1600	01/01/2009
									1	Número de celdas			Número total de celdas: 9736	
Lado:	42	40	38	36	34	32	30	28		1600	6536	1600		

Ilustración 15. Morfologías del modelo. Definición de Morfología 7.

Morfología 8. Altura de capa 5 metros. Con cobertura. Densidad 900 kg/m ³ .														
X:	0	1	2	3	4	5	6	7	Capa	Drenaje	Residuo	Sellado	Orden de llenado	Finalización
									7			900	7401 - 8300	31/12/2029
									6		900	256	6245 - 7144 7145 - 7400	12/08/2028
									5		1156	288	4801 - 5956 5957 - 6244	13/10/2024
									4		1444	156	3201 - 4644 4645 - 4800	22/12/2019
									3		1600		1601 - 3200	15/07/2014
									2	1600			1 - 1600	01/01/2009
									1	Número de celdas			Número total de celdas: 8300	
Lado:	42	40	38	36	34	32	30	28		1600	5100	1600		

Ilustración 16. Morfologías del modelo. Definición de Morfología 8.

Hay un parámetro de ajuste en cada una de las morfologías que no aparece en dichas ilustraciones y es el espesor de la capa superior del modelo que está compuesta de celdas de tipo vertedero sellado. En la Tabla 22 se representan los espesores de la capa superior (incluyendo la cobertura de 1,2 m) así como el error absoluto obtenido por la configuración de cada morfología con respecto al volumen que era necesario verter: 3.665.584 m³ para las densidades de 700 kg/m³ y de 2.851.010 m³ para una densidad de 900 kg/m³.

Nombre de la morfología	Altura de capa de sellado (m)	Error absoluto (m ³)
Morfología 1	2,811	2,674
Morfología 2	3,319	1,013
Morfología 3	3,336	2,674
Morfología 4	3,529	1,013
Morfología 5	2,010	1,074
Morfología 6	1,589	0,613
Morfología 7	4,860	1,074
Morfología 8	3,289	0,613

Tabla 22. Morfologías del modelo. Altura de la capa de sellado y error absoluto.

Aunque se puede fijar el espesor de la última capa que se desee, no es posible eliminar por completo el error en la aproximación. Lo cierto es que el programa de simulación empleado (Modulo) permite definir el espesor de capa con una precisión máxima de 1 mm. La última capa tiene una superficie media de unos 90.000 m² que, multiplicando por 0,001 m da un volumen de 90 m³. La aproximación obtenida, por lo tanto, puede considerarse adecuada.

En la Tabla 23 se presentan las pendientes laterales y la superficie de la capa superior de sellado para cada una de las morfologías. Las pendientes laterales son mayores de lo deseado para garantizar la estabilidad geotécnica, pero se ha sacrificado este aspecto, que no tendrá influencia en la simulación, para obtener unas configuraciones lo más similares posible, de manera que la geometría del modelo no condicione los resultados obtenidos.

Nombre de la morfología	Pendiente lateral (x : z)	Superficie capa sellado (m ²)
Morfología 1	2,13 : 1	78.400
Morfología 2	2,88 : 1	78.400
Morfología 3	2,10 : 1	78.400
Morfología 4	2,04 : 1	102.400
Morfología 5	2,59 : 1	78.400
Morfología 6	2,78 : 1	90.000
Morfología 7	1,67 : 1	102.400
Morfología 8	2,58 : 1	90.000

Tabla 23. Morfologías del modelo. Pendientes laterales y superficie de la capa superior.

3.4.3.3. Sistemas de recirculación

Se contemplan tres variantes de recirculación. Modelo sin recirculación, modelo con recirculación por riego superficial y modelo de recirculación mediante pozos. La recirculación consiste en recoger el lixiviado que genera el vertedero a través de sus sistemas de recolección en la capa drenante y volverlo a introducir en el vertedero.

En los casos en que exista recirculación, se definirá un mecanismo de almacenamiento consistente en una balsa donde se irá almacenando el lixiviado excedente que no se recircule, con el objetivo de poder recircularlo posteriormente. A dicho mecanismo se le denominará balsa de lixiviados. Se ha modelizado una balsa de lixiviados sobredimensionada con suficiente capacidad (80.000.000 m³) para almacenar todo el lixiviado que le llegue. El objetivo es que no sea, en ningún caso, un factor de pérdida de lixiviados por excedente.

La recirculación por riego superficial consiste en ir vertiendo lixiviado sobre la superficie del vertedero de forma homogénea durante el periodo de explotación del vertedero. Esto implica que se aplicará de forma homogénea sobre todas aquellas celdas de tipo residuo que no tengan sobre ellas ninguna otra. Se realizará diariamente siempre que no existiera escorrentía superficial durante el día anterior y no se establecerá ninguna limitación en la cantidad a recircular salvo, lógicamente, el volumen de lixiviados disponibles ese día, suma de lo generado por el sistema de recolección de lixiviados más el volumen almacenado anteriormente en la balsa de lixiviados.

La recirculación por pozos es similar a la anterior con dos salvedades. La primera es que no se aplica únicamente a la superficie sino que se inyecta el lixiviado en pozos excavados en el vertedero que afectan a varias capas del mismo. Los pozos consisten en tubos de 0,15 metros de radio con una superficie lateral perforada del 30 %. La segunda salvedad es que no se realiza solo durante el periodo de explotación sino también durante el periodo de posclausura.

En la Ilustración 17 se señalan las celdas afectadas por la recirculación por riego superficial. En todas las morfologías serán todas las capas de residuo a excepción de la primera.

★ Recirculación por riego superficial

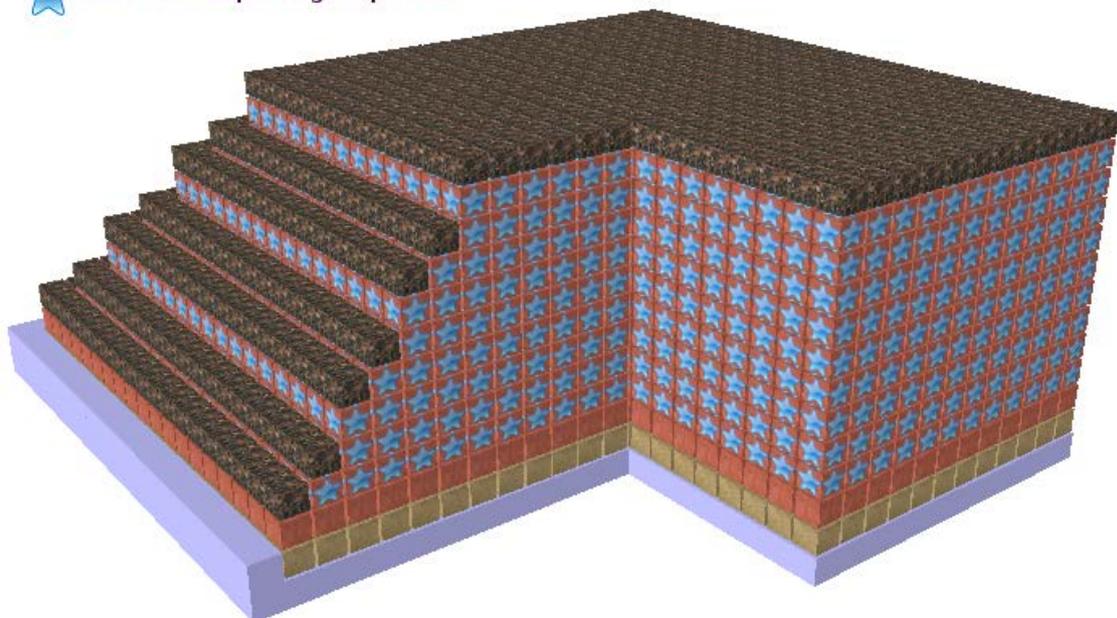


Ilustración 17. Modelos de recirculación. Capas afectadas por riego superficial.

En la Ilustración 18 se muestra la ubicación de los pozos de recirculación. Se muestra una vista en planta del vertedero donde se representa la capa superior de vertedero sellado y la ubicación de los pozos en la misma. La separación entre pozos es de 30 a 40 m y su distribución es la misma en todas las morfologías.

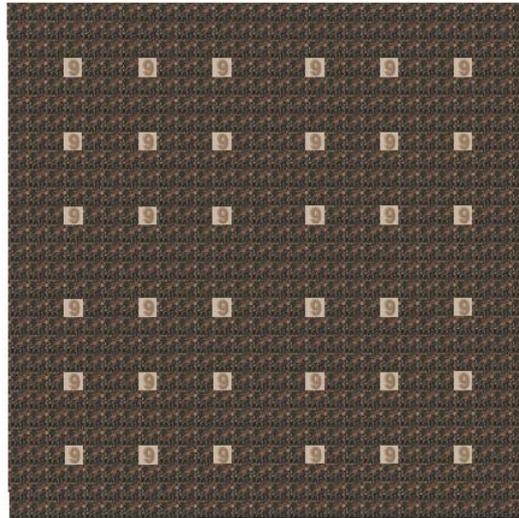


Ilustración 18. Modelos de recirculación. Distribución de los pozos en planta.

En cuanto a profundidad, los pozos siempre arrancan en la tercera capa de residuo vertida para todas las morfologías como se puede apreciar en la Ilustración 19.

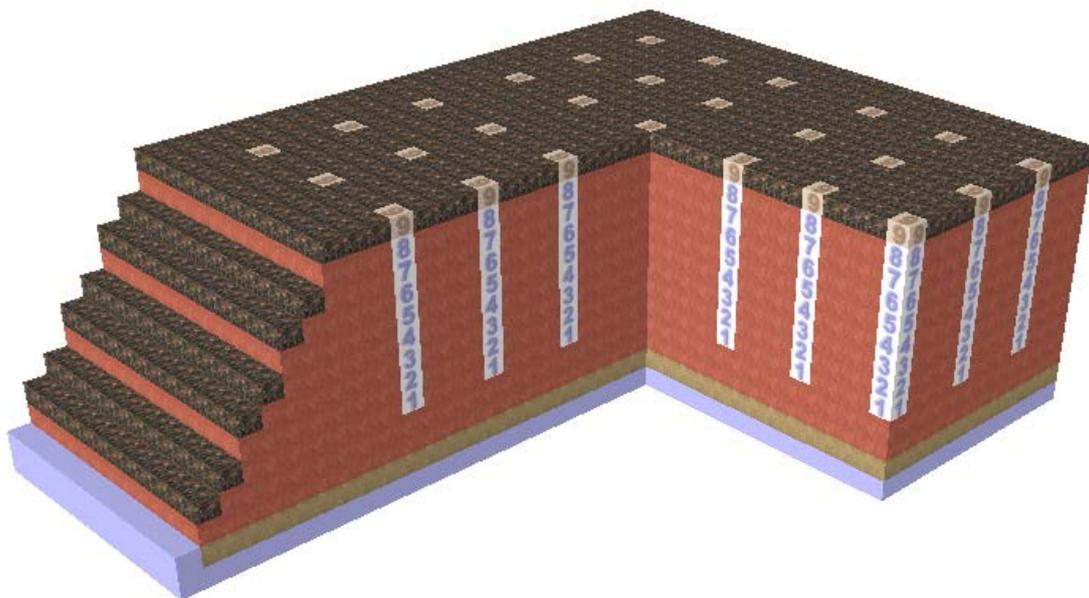


Ilustración 19. Modelos de recirculación. Profundidad de los pozos.

3.4.4. Relación final de las variantes del modelo

Exceptuando la recirculación, a cada variable de diseño se le asignan dos posibles valores según se representa en la Tabla 24.

Variable de diseño	Valor 1	Valor 2
Altura de capa	3 metros	5 metros
Densidad	700 kg/m ³	900 kg/m ³
Cobertura	Sin cobertura	Con cobertura de 0,3 metros
Aislamiento durante la explotación	Sin aislamiento	Con aislamiento
Sellado posterior a la clausura	Poco permeable	Impermeable

Tabla 24. Valores de las variables de diseño.

Combinando las variables de diseño anteriores obtenemos 32 variantes del modelo, que se denominarán variantes básicas. El nombre que se asigna a cada una de estas variantes intenta ser una representación concisa de los valores de las variables de diseño que representa, por ejemplo, 3_700_00_1_0. El formato es el siguiente: capa_densidad_cobertura_aislamiento_sellado, donde capa puede ser 3 ó 5, densidad 700 o 900, cobertura 00 (sin cobertura) ó 03 (con cobertura), aislamiento 0 (sin aislamiento) ó 1 (con aislamiento) y sellado 0 para poco permeable y 1 para impermeable.

Cada una de las variantes básicas tendrá su propio tipo de celda residuo (de las 8 posibles), su tipo de celda residuo sellado (de las 4 posibles) y su morfología (de las 8 posibles) según se planteo en apartados anteriores.

Aplicando los casos de estudio de climatología (cantábrico y mediterráneo) y de generación de residuos (europeo y americano) a las variantes básicas obtenemos 128 variantes. A la nomenclatura de la variante básica añadiremos 'C' para cantábrico, 'M' para mediterráneo, 'E' para europeo y 'A' para americano según el siguiente formato 3_700_00_1_0_CE o 3_700_00_1_0_MA.

Aplicando los tres tipos de recirculación: sin recirculación (R0), con recirculación por riego superficial (RS) y con recirculación por pozos (RP) obtenemos 384 variantes. La recirculación se incluirá en la parte inicial del nombre de la variante de la siguiente forma R0_3_700_00_1_0_CE o bien RP_3_700_00_1_0_CA.

Dado que para obtener algunos parámetros de control es necesario realizar simulaciones parciales solo durante el periodo de explotación (2009-2029) mientras que las simulaciones totales abarcan todo el periodo (2009-2059) obtenemos realmente un total de 768 simulaciones.

En la Tabla 25 se representan las variantes básicas y los valores de las variables de diseño que corresponden a cada una de ellas.

Variante	Capa	Densidad	Cobertura	Aislamiento	Sellado
3_700_00_0_0	3 metros	700 kg/m ³	Sin cobertura	Sin aislamiento	Poco permeable
3_700_00_0_1	3 metros	700 kg/m ³	Sin cobertura	Sin aislamiento	Impermeable
3_700_00_1_0	3 metros	700 kg/m ³	Sin cobertura	Con aislamiento	Poco permeable
3_700_00_1_1	3 metros	700 kg/m ³	Sin cobertura	Con aislamiento	Impermeable
3_700_03_0_0	3 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Sin aislamiento	Poco permeable
3_700_03_0_1	3 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Sin aislamiento	Impermeable
3_700_03_1_0	3 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Con aislamiento	Poco permeable
3_700_03_1_1	3 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Con aislamiento	Impermeable
3_900_00_0_0	3 metros	900 kg/m ³	Sin cobertura	Sin aislamiento	Poco permeable
3_900_00_0_1	3 metros	900 kg/m ³	Sin cobertura	Sin aislamiento	Impermeable
3_900_00_1_0	3 metros	900 kg/m ³	Sin cobertura	Con aislamiento	Poco permeable
3_900_00_1_1	3 metros	900 kg/m ³	Sin cobertura	Con aislamiento	Impermeable
3_900_03_0_0	3 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Sin aislamiento	Poco permeable
3_900_03_0_1	3 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Sin aislamiento	Impermeable
3_900_03_1_0	3 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Con aislamiento	Poco permeable
3_900_03_1_1	3 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Con aislamiento	Impermeable
5_700_00_0_0	5 metros	700 kg/m ³	Sin cobertura	Sin aislamiento	Poco permeable
5_700_00_0_1	5 metros	700 kg/m ³	Sin cobertura	Sin aislamiento	Impermeable
5_700_00_1_0	5 metros	700 kg/m ³	Sin cobertura	Con aislamiento	Poco permeable
5_700_00_1_1	5 metros	700 kg/m ³	Sin cobertura	Con aislamiento	Impermeable
5_700_03_0_0	5 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Sin aislamiento	Poco permeable
5_700_03_0_1	5 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Sin aislamiento	Impermeable
5_700_03_1_0	5 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Con aislamiento	Poco permeable
5_700_03_1_1	5 metros	700 kg/m ³	0,3 metros	Con aislamiento	Impermeable
5_900_00_0_0	5 metros	900 kg/m ³	Sin cobertura	Sin aislamiento	Poco permeable
5_900_00_0_1	5 metros	900 kg/m ³	Sin cobertura	Sin aislamiento	Impermeable
5_900_00_1_0	5 metros	900 kg/m ³	Sin cobertura	Con aislamiento	Poco permeable
5_900_00_1_1	5 metros	900 kg/m ³	Sin cobertura	Con aislamiento	Impermeable
5_900_03_0_0	5 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Sin aislamiento	Poco permeable
5_900_03_0_1	5 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Sin aislamiento	Impermeable
5_900_03_1_0	5 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Con aislamiento	Poco permeable
5_900_03_1_1	5 metros	900 kg/m ³	0,3 metros	Con aislamiento	Impermeable

Tabla 25. Variantes básicas del modelo. Relación con las variables de diseño.

Para implementar los distintos valores de las variables de diseño, vimos anteriormente que se definían tipos de celda y morfologías diferentes. En la Tabla 26 se presentan las variantes básicas del modelo y los tipos de celda y morfologías que implementa cada una.

Variante del modelo	Tipo celda residuo	Tipo celda residuo sellado	Morfología
3_700_00_0_0	Vertedero 1	Sellado 1	Morfología 1
3_700_00_0_1	Vertedero 1	Sellado 2	Morfología 1
3_700_00_1_0	Vertedero 2	Sellado 1	Morfología 1
3_700_00_1_1	Vertedero 2	Sellado 2	Morfología 1
3_700_03_0_0	Vertedero 3	Sellado 1	Morfología 3
3_700_03_0_1	Vertedero 3	Sellado 2	Morfología 3
3_700_03_1_0	Vertedero 4	Sellado 1	Morfología 3
3_700_03_1_1	Vertedero 4	Sellado 2	Morfología 3
3_900_00_0_0	Vertedero 5	Sellado 3	Morfología 2
3_900_00_0_1	Vertedero 5	Sellado 4	Morfología 2
3_900_00_1_0	Vertedero 6	Sellado 3	Morfología 2
3_900_00_1_1	Vertedero 6	Sellado 4	Morfología 2
3_900_03_0_0	Vertedero 7	Sellado 3	Morfología 4
3_900_03_0_1	Vertedero 7	Sellado 4	Morfología 4
3_900_03_1_0	Vertedero 8	Sellado 3	Morfología 4
3_900_03_1_1	Vertedero 8	Sellado 4	Morfología 4
5_700_00_0_0	Vertedero 1	Sellado 1	Morfología 5
5_700_00_0_1	Vertedero 1	Sellado 2	Morfología 5
5_700_00_1_0	Vertedero 2	Sellado 1	Morfología 5
5_700_00_1_1	Vertedero 2	Sellado 2	Morfología 5
5_700_03_0_0	Vertedero 3	Sellado 1	Morfología 7
5_700_03_0_1	Vertedero 3	Sellado 2	Morfología 7
5_700_03_1_0	Vertedero 4	Sellado 1	Morfología 7
5_700_03_1_1	Vertedero 4	Sellado 2	Morfología 7
5_900_00_0_0	Vertedero 5	Sellado 3	Morfología 6
5_900_00_0_1	Vertedero 5	Sellado 4	Morfología 6
5_900_00_1_0	Vertedero 6	Sellado 3	Morfología 6
5_900_00_1_1	Vertedero 6	Sellado 4	Morfología 6
5_900_03_0_0	Vertedero 7	Sellado 3	Morfología 8
5_900_03_0_1	Vertedero 7	Sellado 4	Morfología 8
5_900_03_1_0	Vertedero 8	Sellado 3	Morfología 8
5_900_03_1_1	Vertedero 8	Sellado 4	Morfología 8

Tabla 26. Variantes básicas del modelo. Relación con tipos de celda y morfologías.

A cada variante básica del modelo le podemos aplicar uno de los tres casos de recirculación analizados (sin recirculación, recirculación por riego superficial o recirculación por pozos) así como cualquiera de los casos de climatología (cantábrica o mediterránea) y de generación de residuos (americano o europeo). Por tanto, para una variante básica del modelo, se obtienen las variantes que se presentan en la Tabla 27.

Variante del modelo	Recirculación	Clima	Generación
RO_3_700_00_0_0_CA	Ninguna	Cantábrico	Americano
RO_3_700_00_0_0_CE	Ninguna	Cantábrico	Europeo
RO_3_700_00_0_0_MA	Ninguna	Mediterráneo	Americano
RO_3_700_00_0_0_ME	Ninguna	Mediterráneo	Europeo
RS_3_700_00_0_0_CA	Riego superficial	Cantábrico	Americano
RS_3_700_00_0_0_CE	Riego superficial	Cantábrico	Europeo
RS_3_700_00_0_0_MA	Riego superficial	Mediterráneo	Americano
RS_3_700_00_0_0_ME	Riego superficial	Mediterráneo	Europeo
RP_3_700_00_0_0_CA	Pozos	Cantábrico	Americano
RP_3_700_00_0_0_CE	Pozos	Cantábrico	Europeo
RP_3_700_00_0_0_MA	Pozos	Mediterráneo	Americano
RP_3_700_00_0_0_ME	Pozos	Mediterráneo	Europeo

Tabla 27. Variantes básicas del modelo. Casos estudiados de una variante básica.

3.5. Metodología de análisis de resultados

3.5.1. Introducción

Una vez obtenidos los valores de los parámetros de control para las diferentes combinaciones de los valores de las variables de diseño, es necesario establecer una metodología de análisis para estudiar la relación entre ellos. Dada la gran cantidad de datos, no es viable estudiarlos de forma individual. Es necesario un mecanismo que permita obtener de forma sistemática la siguiente información:

- En qué parámetros de control influye una variable de diseño y en cuales no influye apreciablemente.
- Si esa influencia es positiva o negativa para el parámetro de control.
- La magnitud estimada de la influencia de la variable de diseño en el parámetro de control.

Una vez obtenida esta información, es posible estudiar y sacar conclusiones sobre el efecto que cada variable de diseño tiene en el vertedero. Además, para una relación priorizada de parámetros de control objetivo, es posible obtener la mejor combinación posible de valores de las variables de diseño.

Para cumplir con estos objetivos se propone utilizar dos técnicas de análisis de datos: modelos de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados y árboles de decisión. De esta forma se podrá automatizar en gran medida el análisis de los datos. No obstante, es necesario verificar que estas técnicas son efectivas en su aplicación al conjunto de datos de estudio.

Se introducen, a continuación, los conceptos básicos de regresión lineal y de árboles de decisión utilizados en este trabajo con una concisa explicación de los mismos y una aplicación práctica que justifique su eficacia para el análisis de los datos. Así mismo, se presentan las herramientas que se van a emplear para realizar los cálculos de los modelos de regresión y de los árboles de decisión indicando que resultados genera.

Posteriormente, en el apartado de análisis de resultados, se pondrá de manifiesto la adecuación de cada uno de los métodos al dominio del problema y cuáles son sus ventajas e inconvenientes.

3.5.2. Modelo de regresión lineal

Dada una variable predictora (x) y una variable de respuesta (y) el modelo de regresión lineal establece una ecuación lineal que relaciona ambas variables de la forma:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

Donde β_0 y β_1 son los parámetros o coeficientes del modelo y ε es el error o indeterminación del modelo.

Esta ecuación es para la población total, es decir, el modelo supone que existen unos valores constantes de β_0 y β_1 que satisfacen a todos los posibles valores de x e y. En un caso real se dispone únicamente de una muestra de la población total. Dependiendo de la muestra que se tome, se obtendrán unos valores de β_0 y β_1 ligeramente diferentes. Por ello, se utilizan dos estadísticos denominados b_0 y b_1 para estimar los parámetros de la población total. Estos estadísticos se obtendrán (y por tanto dependen) de la muestra seleccionada. Se define, por tanto, la ecuación de regresión estimada de la siguiente forma:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x$$

Para una muestra x e y determinada, a la diferencia $y - \hat{y}$ se la denomina error en la estimación o error residual. La regresión por mínimos cuadrados proporciona unos coeficientes b_0 y b_1 que minimizan la suma de los cuadrados de los errores residuales para todos los pares x e y de los que se disponga. Existen otros métodos para definir dichos coeficientes pero el método de los mínimos cuadrados es el más utilizado.

Para calcular los valores de b_0 y b_1 suponiendo que tenemos n observaciones

$$y_i = b_0 + b_1 x_i + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, n$$

es necesario minimizar la suma de los errores cuadrados

$$SSE_p = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$$

A través del cálculo diferencial llegamos a las siguientes expresiones:

$$b_1 = \frac{\sum x_i y_i - [(\sum x_i)(\sum y_i)]/n}{\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2/n}$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}$$

donde \bar{x} es el valor medio de la variable predictora, \bar{y} es el valor medio de la variable de respuesta y todos los sumatorios son entre 1 y n.

Es necesario establecer cuál es la bondad del ajuste por mínimos cuadrados a la hora de aproximar la relación lineal entre las dos variables: predictora y de respuesta.

Si no se tuviera en cuenta la variable predictora la mejor aproximación que se puede hacer de la variable de respuesta a partir de una muestra es calculando su media, es decir, \bar{y} . Para cuantificar el error en ese caso se define la suma total de cuadrados SST de la siguiente forma:

$$SST = \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2$$

El valor de SST también refleja la variabilidad de la variable de respuesta en la muestra considerada.

Si, en cambio, se tiene en cuenta la variable predictora, a través del modelo de regresión lineal, el error cometido en ese caso se puede cuantificar por la suma de los cuadrados de los errores SSE de la siguiente forma:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2$$

Si se compara SSE con SST es posible calcular cuánto mejora la predicción al considerar la variable predictora frente a no considerarla. Cuanto más pequeño sea SSE frente a SST, más información aporta la variable predictora.

Se define la suma de cuadrados de la regresión SSR para medir la mejora total en la predicción cuando se usa el modelo de regresión lineal de la siguiente forma:

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2$$

Se deduce, por tanto, la siguiente relación entre las tres sumas de cuadrados:

$$SST = SSR + SSE$$

Se puede considerar a SST como la variabilidad total en la variable de respuesta. A SSR como la cantidad de dicha variabilidad que es explicada por el modelo de regresión (por la variable predictora). Y a SSE como la variabilidad que no explica el modelo de regresión y que puede tener diversos orígenes como otras variables predictoras no tenidas en cuenta, errores aleatorios, etc.

Se define el coeficiente de determinación r^2 de la siguiente forma:

$$r^2 = \frac{SSR}{SST}$$

El coeficiente r^2 representa la proporción de la variabilidad en la variable de respuesta que es explicada por el modelo de regresión, es decir, por la relación lineal entre las variables predictoras y de respuesta. Mide, por tanto, la bondad del ajuste de la regresión a los datos. El valor de r^2 estará comprendido entre 0 y 1. Cuanto más próximo a 1, mejor se ajusta la regresión a los datos.

Se define el error cuadrado medio MSE según la siguiente ecuación:

$$MSE = \frac{SSE}{n - m - 1}$$

donde m indica el número de variables predictoras (que para la regresión lineal simple es 1) y n es el número de mediciones realizadas.

El estadístico s denominado el error estándar de la estimación se define según la siguiente ecuación:

$$s = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{SSE}{n - m - 1}}$$

Es estadístico s es una medición del error típico de la estimación, es decir, de la diferencia típica entre el valor de respuesta predicho y el real. Representa, por tanto, la precisión de las predicciones generadas por la ecuación de regresión estimada. Cuanto menor sea s mejor.

En un modelo de regresión lineal simple, se aproxima la relación existente entre una variable respuesta y una predictora mediante una ecuación que representa una recta. En un modelo de regresión lineal múltiple, se aproxima la relación existente entre una variable respuesta y un conjunto de variables predictoras mediante una superficie lineal como un plano o un hiperplano. La ecuación de regresión estimada en este caso es la siguiente:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m$$

donde m es el número de variables predictoras y $b_0 \dots b_m$ los parámetros del modelo. Todos los conceptos básicos presentados para el modelo de regresión lineal simple son aplicables al modelo de regresión múltiple.

3.5.2.1. Aplicación a un subconjunto de resultados

Se presenta, a continuación, un ejemplo de aplicación del modelo de regresión lineal a un subconjunto reducido de los resultados para detallar la metodología empleada.

- Se consideran las siguientes variables de diseño:
 - Altura de capa (ca): 3 o 5 m.
 - Compactación del residuo (den): 700 o 900 kg/m³
 - Espesor de cobertura (co): 0 o 0,3 m.
 - Aislamiento durante la explotación (ais): Con o sin aislamiento.
 - Sellado posterior a la clausura (se): Poco permeable o impermeable.
- Se considera un único parámetro de control:
 - Volumen total de lixiviados recogido por los sistemas de recolección de lixiviados durante todo el periodo (VTotal) expresado en m³.
- Se considera un único escenario consistente en:
 - Clima mediterráneo
 - Residuo de tipo europeo
 - No existe recirculación

En la Tabla 29 se presentan los datos correspondientes a este subconjunto de resultados.

Un paso previo a generar el modelo de regresión lineal es la normalización de los datos. Vamos a normalizar cada uno de los datos en un intervalo de 0 a 1. Los valores normalizados de las variables de diseño se presentan en la Tabla 28 y los datos normalizados del subconjunto de resultados en la Tabla 30.

Variable de diseño	Valor 1	Normalizado	Valor 2	Normalizado
Altura de capa	3 m	0	5 m	1
Compactación del residuo	700 kg/m ³	0	900 kg/m ³	1
Espesor de cobertura	0 m	0	0,3 m	1
Aislamiento	Sin aislamiento	0	Con aislamiento	1
Sellado	Poco permeable	0	Impermeable	1

Tabla 28. Ejemplo de regresión. Normalización de las variables de diseño.

Modelo	Capa	Densidad	Cobertura	Aisla	Sellado	VTotal
R0_3_700_00_0_0_CE	3	700	0	No	Poco perme.	3.567.874
R0_3_700_00_0_1_CE	3	700	0	No	Impermeable	2.870.889
R0_3_700_00_1_0_CE	3	700	0	Si	Poco perme.	1.248.844
R0_3_700_00_1_1_CE	3	700	0	Si	Impermeable	549.926
R0_3_700_03_0_0_CE	3	700	0,3	No	Poco perme.	2.679.634
R0_3_700_03_0_1_CE	3	700	0,3	No	Impermeable	1.980.758
R0_3_700_03_1_0_CE	3	700	0,3	Si	Poco perme.	833.446
R0_3_700_03_1_1_CE	3	700	0,3	Si	Impermeable	212.916
R0_3_900_00_0_0_CE	3	900	0	No	Poco perme.	3.747.362
R0_3_900_00_0_1_CE	3	900	0	No	Impermeable	3.051.437
R0_3_900_00_1_0_CE	3	900	0	Si	Poco perme.	1.347.449
R0_3_900_00_1_1_CE	3	900	0	Si	Impermeable	650.878
R0_3_900_03_0_0_CE	3	900	0,3	No	Poco perme.	2.985.357
R0_3_900_03_0_1_CE	3	900	0,3	No	Impermeable	2.259.775
R0_3_900_03_1_0_CE	3	900	0,3	Si	Poco perme.	1.113.348
R0_3_900_03_1_1_CE	3	900	0,3	Si	Impermeable	386.002
R0_5_700_00_0_0_CE	5	700	0	No	Poco perme.	3.977.949
R0_5_700_00_0_1_CE	5	700	0	No	Impermeable	3.354.398
R0_5_700_00_1_0_CE	5	700	0	Si	Poco perme.	1.281.381
R0_5_700_00_1_1_CE	5	700	0	Si	Impermeable	655.778
R0_5_700_03_0_0_CE	5	700	0,3	No	Poco perme.	2.749.904
R0_5_700_03_0_1_CE	5	700	0,3	No	Impermeable	2.073.246
R0_5_700_03_1_0_CE	5	700	0,3	Si	Poco perme.	951.593
R0_5_700_03_1_1_CE	5	700	0,3	Si	Impermeable	365.695
R0_5_900_00_0_0_CE	5	900	0	No	Poco perme.	4.015.911
R0_5_900_00_0_1_CE	5	900	0	No	Impermeable	3.361.879
R0_5_900_00_1_0_CE	5	900	0	Si	Poco perme.	1.460.345
R0_5_900_00_1_1_CE	5	900	0	Si	Impermeable	805.001
R0_5_900_03_0_0_CE	5	900	0,3	No	Poco perme.	3.083.146
R0_5_900_03_0_1_CE	5	900	0,3	No	Impermeable	2.364.801
R0_5_900_03_1_0_CE	5	900	0,3	Si	Poco perme.	1.274.488
R0_5_900_03_1_1_CE	5	900	0,3	Si	Impermeable	554.173

Tabla 29. Ejemplo de regresión. Subconjunto de resultados.

Modelo	Capa	Densidad	Cobertura	Aislamiento	Sellado	VTotal
RO_3_700_00_0_0_CE	0	0	0	0	0	0,88
RO_3_700_00_0_1_CE	0	0	0	0	1	0,70
RO_3_700_00_1_0_CE	0	0	0	1	0	0,27
RO_3_700_00_1_1_CE	0	0	0	1	1	0,09
RO_3_700_03_0_0_CE	0	0	1	0	0	0,65
RO_3_700_03_0_1_CE	0	0	1	0	1	0,46
RO_3_700_03_1_0_CE	0	0	1	1	0	0,16
RO_3_700_03_1_1_CE	0	0	1	1	1	0,00
RO_3_900_00_0_0_CE	0	1	0	0	0	0,93
RO_3_900_00_0_1_CE	0	1	0	0	1	0,75
RO_3_900_00_1_0_CE	0	1	0	1	0	0,30
RO_3_900_00_1_1_CE	0	1	0	1	1	0,12
RO_3_900_03_0_0_CE	0	1	1	0	0	0,73
RO_3_900_03_0_1_CE	0	1	1	0	1	0,54
RO_3_900_03_1_0_CE	0	1	1	1	0	0,24
RO_3_900_03_1_1_CE	0	1	1	1	1	0,05
RO_5_700_00_0_0_CE	1	0	0	0	0	0,99
RO_5_700_00_0_1_CE	1	0	0	0	1	0,83
RO_5_700_00_1_0_CE	1	0	0	1	0	0,28
RO_5_700_00_1_1_CE	1	0	0	1	1	0,12
RO_5_700_03_0_0_CE	1	0	1	0	0	0,67
RO_5_700_03_0_1_CE	1	0	1	0	1	0,49
RO_5_700_03_1_0_CE	1	0	1	1	0	0,19
RO_5_700_03_1_1_CE	1	0	1	1	1	0,04
RO_5_900_00_0_0_CE	1	1	0	0	0	1,00
RO_5_900_00_0_1_CE	1	1	0	0	1	0,83
RO_5_900_00_1_0_CE	1	1	0	1	0	0,33
RO_5_900_00_1_1_CE	1	1	0	1	1	0,16
RO_5_900_03_0_0_CE	1	1	1	0	0	0,75
RO_5_900_03_0_1_CE	1	1	1	0	1	0,57
RO_5_900_03_1_0_CE	1	1	1	1	0	0,28
RO_5_900_03_1_1_CE	1	1	1	1	1	0,09

Tabla 30. Ejemplo de regresión. Subconjunto de resultados normalizado.

Para evaluar la adecuación de modelo de regresión al análisis de los datos se analizan, en primer lugar, las tres variables de diseño: capa, cobertura y aislamiento de forma independiente. Para ello se crea un modelo de regresión lineal simple para cada una de ellas ignorando la existencia de las restantes. En la Tabla 31 se presentan los cálculos correspondientes a cada uno de los tres modelos a los que se denominará "capa", "cobertura" y "aislamiento".

Se ha intentado seleccionar un caso cuyo resultado sea evidente a priori para poder verificar los resultados de las simulaciones y para poner a prueba la aplicación del modelo de regresión lineal con el que se pretende analizar de forma sistemática todo el conjunto de resultados.

A priori, por sentido común, se puede deducir que el aislamiento superficial durante la explotación va a tener una gran influencia sobre el volumen total de lixiviados emitido por el vertedero. La presencia de cobertura puede tener una ligera influencia ya que puede obstaculizar o ralentizar el paso de lixiviados. Pero en cualquier caso, mucho menor que el aislamiento que impide su infiltración en superficie. Por último, la altura de capa no parece que vaya a tener ninguna influencia apreciable en un mayor o menor volumen de lixiviados.

Regresión lineal simple	Modelo capa	Modelo cobertura	Modelo aislamiento
Ecuación	$y=0,429+0,047x$	$y=0,535-0,166x$	$y=0,735-0,566x$
SST	3,150	3,150	3,150
SSR	0,017	0,220	2,562
SSE	3,132	2,930	0,588
r^2	0,006	0,070	0,813
s	0,323	0,313	0,140

Tabla 31. Ejemplo de regresión. Regresión lineal simple.

Los coeficientes b_1 correspondientes a la variable de diseño en la ecuación de regresión estimada indican la influencia de dicha variable en el volumen total de lixiviados. En los casos de la cobertura y el aislamiento tiene signo negativo, lo que indica que la presencia de ambos disminuye el volumen de lixiviados. En el caso de la capa tiene signo positivo, lo que indica que a mayor altura de capa, mayor volumen de lixiviados. El coeficiente b_1 del aislamiento (-0,566) es mayor que el de la cobertura (-0,166) y este último mayor que el de la capa (0,047).

La variabilidad total de la variable de respuesta estudiada (volumen total de lixiviados) es común en los tres modelos y se puede cuantificar mediante la suma total de cuadrados SST que en este caso es de 3,150.

El coeficiente de determinación r^2 mide la variabilidad total de los datos (SST) que es capaz de explicar el modelo de regresión (SSR) o, dicho de otra forma, la bondad con la cual el modelo se ajusta a los datos de la muestra. En el ejemplo vemos como el coeficiente es bastante satisfactorio para el modelo aislamiento (esta cerca de 1) y bastante pequeño para el modelo capa y cobertura.

Por último, el estadístico s o error estándar mide la precisión del modelo de regresión a la hora de realizar predicciones. En el caso del modelo capa y cobertura es grande (0,323 y 0,313) y en el modelo aislamiento es más razonable (0,140).

Se puede integrar el análisis de todas las variables de diseño del ejemplo mediante un modelo de regresión lineal múltiple. Dicho modelo tiene en cuenta a todas ellas como variables predictoras que influyen de forma lineal sobre la variable de respuesta volumen total de lixiviados. La ecuación de regresión estimada para dicho modelo es la siguiente:

$$VT_{total} = 0,858 + 0,047 ca + 0,051 den - 0,166 co - 0,566 ais - 0,178 se$$

Para este modelo se obtienen los estadísticos que se presentan en la Tabla 32.

Regresión lineal múltiple	Valor
SST	3,150
SSR	3,073
SSE	0,077
r^2	0,976
s	0,054
F	207
df	26
alfa	4,4E-20

Tabla 32. Ejemplo de regresión. Regresión lineal múltiple.

En los coeficientes de la ecuación se aprecia, en primer lugar, la gran influencia del aislamiento. En segundo lugar una influencia similar de la cobertura y el sellado posclausura. Es necesario tener en cuenta que los valores del sellado posclausura no indican que exista o no exista, sino que sea poco permeable (0) o impermeable (1). Y en tercer lugar, una influencia mínima de la densidad y de la altura de capa.

El coeficiente de determinación (0,976) indica que el ajuste del modelo a los datos es bastante bueno con un error estándar de 0,054.

Se han añadido unos estadísticos nuevos:

- F - Estadística F o valor F observado.
- df - Grados de libertad del modelo.
- alfa - Probabilidad de que un valor F elevado se produzca por azar.

Estos estadísticos permiten determinar si los resultados anteriores, con un valor de r^2 tan alto, se produjeron por azar. Suponiendo que no existiera relación entre las variables de diseño y el parámetro de control, se podría haber extraído una muestra peculiar de datos que hiciera que el análisis mostrara de forma errónea dicha relación.

El término "alfa" se utiliza para medir la probabilidad de llegar a la conclusión errónea de que existe una relación. Habitualmente se emplea un valor de alfa de 0,05 como valor crítico. En el caso de estudio, el valor alfa es de $4,4E-20$ indicando que la relación entre las variables no se ha producido por azar.

En este trabajo, se plantea el análisis de dos valores típicos para cada una de las variables de diseño a estudiar, por ejemplo, para el grado de compactación o densidad se aplican dos valores 700 y 900 kg/m^3 . Esto justifica el ajuste mediante un modelo de regresión lineal. Hubiera sido posible estudiar varios valores para una variable de diseño, por ejemplo, densidades de 700, 750, 800, 850 y 900 kg/m^3 . En ese caso, si bien podría ser válido el modelo de regresión lineal, también sería conveniente probar con otro tipo de regresiones como la polinómica que quizás ajustaran mejor los datos.

En cuanto a la normalización de los datos, para mantener la sencillez del ejemplo anterior, se ha realizado de forma directa a los valores del volumen total de lixiviados. En el análisis de los datos final, las normalizaciones se realizarán de forma directa o inversa dependiendo de si un dato mayor en el parámetro de control es mejor o peor en cuanto al impacto en el vertedero. Por ejemplo, el volumen total de lixiviados generado es mejor cuanto menor sea, de esta forma se aplicará a la normalización directa la fórmula $1-x$. De esta forma siempre valoraremos más un parámetro de control normalizado cuanto mayor sea su valor.

A la hora de evaluar cuantitativamente el impacto de las variables de diseño se tendrá en cuenta el coeficiente correspondiente en las ecuaciones de regresión estimada para cada uno de los parámetros de control. De esta forma, los coeficientes aportan las diferencias relativas entre las variables de diseño. Pero es necesario tener en cuenta que el coeficiente de la densidad indica el impacto en el parámetro de control cuando la densidad pasa de 700 a 900 kg/m^3 , mientras que el coeficiente de cobertura indica el impacto entre no poner cobertura o poner una cobertura de 0,3 m. ¿Es equivalente la diferencia entre compactar a 700 o 900 o entre poner cobertura o no ponerla? Para el presente estudio se han buscado dos valores razonables para cada variable de diseño que permitan analizarlas. Se podría dar un paso más e intentar valorizar cada uno de los intervalos de las variables de diseño para poder compararlos entre sí. Quizás asignando un valor económico a cada una de las opciones. Después de un análisis se podría concluir qué incremento de la compactación es, en base a costes, equivalente a poner una cobertura de 0,3 m con las características que se definen. Esto llevaría a corregir el coeficiente que se toma correspondiente a la compactación de forma que correspondiera con dicho incremento y no con el incremento de 700 a 900. Esta operación sería sencilla ya que se trata de obtener el incremento de y correspondiente al nuevo incremento de x en el modelo de regresión lineal. Lo que resultaría bastante más costoso es la labor de valorización en un modelo teórico como el actual.

Así mismo se podrían valorizar los parámetros de control asignando unos costes a cada uno de ellos, por ejemplo, coste de gestionar los lixiviados generados, ingresos por generación de energía a partir del biogás, etc. De esta forma con ayuda del modelo de regresión y la valorización de todas las variables que intervienen se podrían obtener resultados más precisos.

Quizás esta ampliación de la metodología sea más adecuada para el análisis de un vertedero real y sus criterios de diseño. Para cumplir con los objetivos de este trabajo se entiende suficiente el análisis cualitativo y cuantitativo del impacto de las variables de diseño en el vertedero asumiendo que cada una de ella presenta dos opciones típicas. Y que la diferencia entre las dos opciones de una variable de diseño es equivalente a la diferencia entre las dos opciones de la otra.

Para el cálculo de los modelos de regresión lineal múltiple para cada parámetro de control se utiliza la herramienta Microsoft Excel 2007. Dicha herramienta proporciona de forma directa todos los resultados mediante la fórmula ESTIMACION.LINEAL a excepción de el valor de alfa que se obtiene mediante la fórmula DISTR.F(F ;(n-df-1);df). La Ilustración 20 muestra como presenta Excel los resultados para el ejemplo anterior.

Sellado	Aisla	Cobertura	Densidad	Capa	Constante
b_5	b_4	b_3	b_2	b_1	b_0
s_5	s_4	s_3	s_2	s_1	s_0
r_2	s				
F	df				
SSR	SSE				

Sellado	Aisla	Cobertura	Densidad	Capa	Constante
-0,178	-0,566	-0,166	0,051	0,047	0,858
0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,024
0,976	0,054				
207	26				
3,073	0,077				

Ilustración 20. Regresión lineal múltiple en Microsoft Excel.

Como conclusión, se ha presentado un ejemplo de aplicación de la regresión lineal múltiple para el análisis de un subconjunto de resultados. El ajuste del modelo de regresión al conjunto de datos ha sido satisfactorio. A través de los coeficientes de la ecuación de regresión estimada se ha establecido la influencia de cada una de las variables de diseño en el parámetro de control contrastando la interpretación de dicha influencia con el razonamiento lógico y verificando la utilidad de dicho modelo de regresión para realizar el análisis.

3.5.3. Árboles de decisión

De forma complementaria a la regresión lineal múltiple se plantea otra técnica de análisis consistente en la utilización de árboles de decisión. La idea de un árbol de decisión es dividir los datos de forma recursiva en subconjuntos. Para el análisis de un determinado parámetro de control, se evalúa cada una de las variables de diseño para establecer cuál de ellas influencia más dicho parámetro. A continuación se dividen los casos en dos subconjuntos para cada uno de los valores de la variable de diseño seleccionada y se vuelve a aplicar el algoritmo recursivamente a cada uno de los subconjuntos.

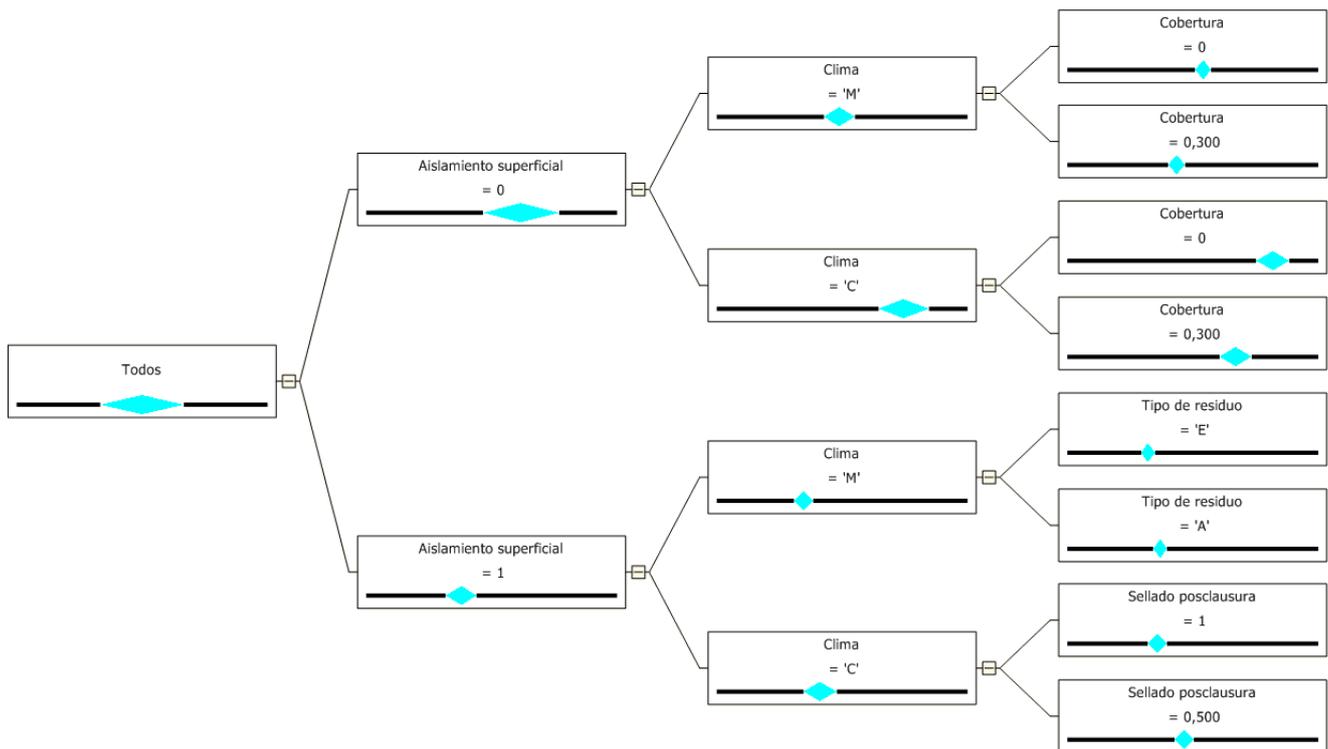


Ilustración 21. Ejemplo de árbol de decisión.

En la Ilustración 21 se muestra un ejemplo de árbol de decisión para el parámetro de control volumen total de lixiviados emitidos por el vertedero (VTotal). Para obtener dicho árbol se han evaluado los datos de las simulaciones sin recirculación para cualquier clima y tipo de residuo. El nodo raíz "Todos" contiene, por tanto, 128 simulaciones o casos. La variable de diseño más influyente es el aislamiento superficial de forma que se dividen los 128 casos en dos subconjuntos: sin aislamiento superficial (64 casos) y con aislamiento superficial (64 casos). Se aplica, a continuación, el proceso de forma recursiva en cada subconjunto. En este caso, tanto el clima como el tipo de residuo se han incluido como dos variables de diseño adicionales. Así, tanto para los casos con aislamiento como sin aislamiento la siguiente variable que más influye es el clima.

En la parte inferior de cada nodo del árbol, se presenta una línea negra con un diamante azul. El diamante está centrado en el valor medio del parámetro de control para los casos incluidos en el nodo. Su anchura representa la variabilidad del parámetro en los casos expresada como el doble de la desviación estándar. En el ejemplo de la Ilustración 21 los casos del nodo "Todos" tienen una media de 1.582.294. El nodo de aislamiento superficial = 0 tiene una media de 2.351.934 mientras que la de aislamiento superficial = 1 es de 812.654. Esto indica la clara reducción en el lixiviado emitido cuando existe aislamiento. Se aprecia también cómo al existir aislamiento superficial la variabilidad de los casos es menor que cuando no existe. Esto indica que cuando no existe aislamiento existen otros factores o escenarios que influyen considerablemente en el valor del parámetro de control.

Anteriormente se aplicó en un ejemplo un modelo de regresión lineal múltiple al estudio del volumen de lixiviados. Las conclusiones que se obtuvieron de los coeficientes de regresión fueron que la variable con más influencia era el aislamiento superficial seguida de lejos por la cobertura y el sellado posclausura (todas ellas reduciendo el volumen de lixiviados emitidos). Si bien dicho modelo incluía solamente casos para tipo de residuo europeo y clima mediterráneo, la aplicación a otro clima o tipo de residuo ofrecería resultados similares.

El análisis mediante árboles de decisión ofrece esas mismas conclusiones: El factor más importante es el aislamiento seguido en un segundo nivel por la cobertura y el sellado. Pero además ofrece matices que no es posible deducir en un modelo de regresión: la diferente influencia de ciertas variables de diseño ante diferentes valores de otras variables. Algunas de las conclusiones de segundo orden que se obtienen del árbol de decisión anterior son las siguientes:

- El clima juega un papel importante cuando no existe aislamiento.
- La cobertura es un factor importante cuando no existe aislamiento y principalmente en el clima cantábrico.
- La humedad del tipo de residuo cobra importancia en climas mediterráneos cuando existe aislamiento.
- Cuando existe aislamiento en climas de tipo cantábrico la existencia de sellado posclausura pasa a ser un valor determinante en el volumen total.

Se ha intentado plantear un ejemplo sencillo para poder contrastar las conclusiones con el sentido común. Dichas conclusiones de "segundo orden" plantean una información muy valiosa que ayuda a validar y complementa los resultados de los modelos de regresión.

Para la elaboración de los árboles de decisión se ha utilizado la herramienta SQL Server 2008 R2 Business Intelligence Development Studio. El algoritmo aplicado es "Microsoft Decision Trees". Las variables de diseño se modelizan como atributos de entrada de tipo discreto y los parámetros de control como atributos predecibles de tipo continuo. En estos últimos no se aplica ninguna normalización. Como parámetros para el algoritmo se mantienen los que vienen por defecto. Esto incluye la utilización del método "Equivalente Dirichlet bayesiano con prioridad uniforme" para calcular el resultado de la división (SCORE_METHOD) y un número mínimo de casos de 10 para poder generar un nuevo nodo (MINIMUM_SUPPORT).

Si en la creación del árbol de decisión incluimos las variables de diseño como atributos de entrada continuos (p.e. mediante una normalización entre 0 y 1), el algoritmo "Microsoft Decision Trees" además de crear el árbol, utiliza los atributos de entrada como regresores para calcular una ecuación de regresión lineal para los casos incluidos en cada nodo del árbol. Este modelo puede ser de gran utilidad a la hora de obtener un sistema de predicción para nuevos casos. Se han tomado los 384 casos (para cualquier tipo de recirculación, clima y residuo) y se han extraído de forma aleatoria un 30% de ellos como subconjunto de pruebas. Con el resto se ha entrenado un modelo de árbol de decisión con regresores y, finalmente, se ha utilizado dicho modelo para predecir el resultado de los casos de prueba. En la Ilustración 22 se presenta el resultado de dichos casos de prueba para el VTotal. Cada caso es un punto representado en abscisas por el valor "real" obtenido de la simulación y en el eje de ordenadas por el valor que predice el modelo de árbol de decisión.

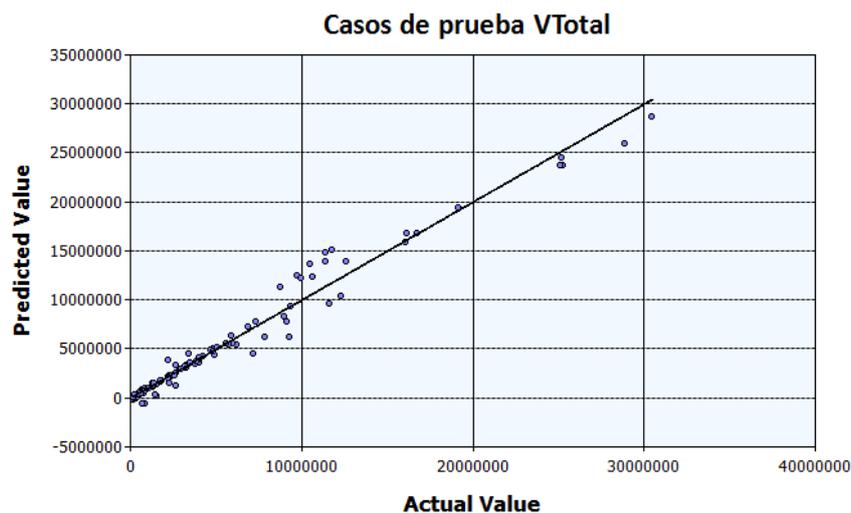


Ilustración 22. Árbol de decisión con regresores. Casos de prueba VTotal.

La predicción ideal es cuando ambos valores coinciden y se representa en el gráfico por una línea recta.

En la Ilustración 23 se presentan los casos de prueba para la energía total generada en el vertedero y en la Ilustración 24 los casos de prueba para el asentamiento máximo producido en la superficie del vertedero.

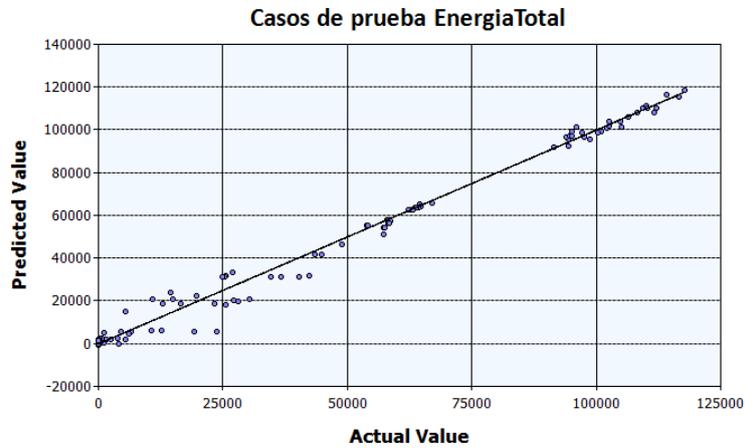


Ilustración 23. Árbol de decisión con regresores. Casos de prueba EnergiaTotal.

A la hora de generar el modelo de árboles de decisión con regresores se han ignorado un 30% de los casos, lo que indudablemente conduce a una cierta imprecisión. Aun así, se garantiza la independencia de los casos de prueba y se constata la validez del modelo para representar y predecir este tipo de escenarios. Para el análisis de datos de esta tesis no se utilizarán regresores en los árboles de decisión y se tratarán los atributos de entrada de forma discreta en ellos. Aun así se quería comprobar y poner de manifiesto las posibilidades de esta técnica de análisis aplicada al ámbito de estudio.

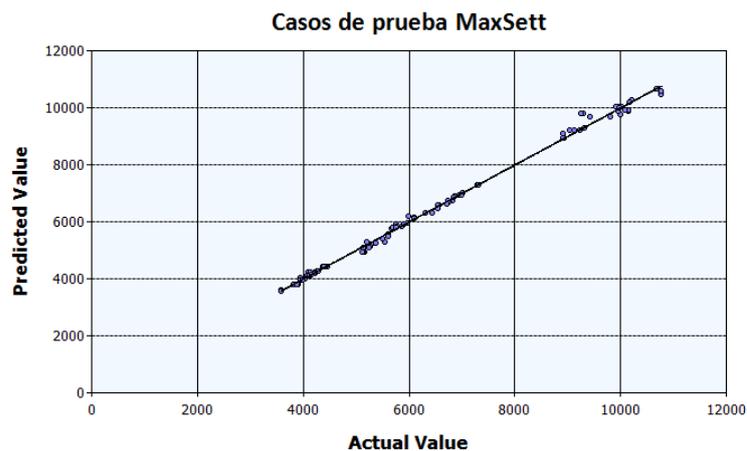


Ilustración 24. Árbol de decisión con regresores. Casos de prueba MaxSett.

Capítulo 4. Herramienta de simulación

4.1. Antecedentes

Para la consecución del presente trabajo es fundamental disponer de una herramienta de simulación de vertederos que cumpla con los siguientes requisitos:

- **Integración de todos los sub-modelos de cálculo** necesarios para la simulación y obtención de los parámetros de control de interés: generación de residuos, hidrología superficial, flujos de agua en el interior del vertedero, biodegradación, asentamientos y, por último, almacenamiento, tratamiento y recirculación de lixiviados.
- **Facilidad para definir y gestionar** un apreciable número de modelos diferentes de vertedero, con ciertos elementos en común, correspondientes a las combinaciones de los valores de las variables de diseño objeto de estudio.
- Capacidad de **realizar un elevado número de simulaciones** correspondientes a todas las variantes de diseño y a todos los casos de uso estudiados en un tiempo razonable.
- Facilidad para el **análisis de la gran cantidad de resultados** obtenidos de las simulaciones que permita extraer los valores de los parámetros de control necesarios.

El Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA) de la Universidad de Cantabria lleva desde el año 1998 desarrollando una herramienta denominada Moduelo (en sus versiones 1, 2 y 3) para la simulación dinámica de vertederos. A diferencia de otros productos en el mercado, esta herramienta es capaz de simular los diferentes aspectos que intervienen en el diseño y la explotación de los vertederos de forma integrada. Desde este punto de vista cumple perfectamente con el primero de los cuatro requisitos anteriormente mencionados. Respecto a los tres apartados siguientes, la herramienta tiene limitaciones funcionales y de arquitectura importantes que invalidan la posibilidad de utilizarla (en su versión 3) en este estudio.

Se describen, a continuación, dichos factores limitantes:

- La herramienta solo es capaz de gestionar simultáneamente un modelo de vertedero. Para trabajar sobre otro modelo es necesario cerrar el actual y abrir el nuevo. Esto implica que los modelos son, entre sí, completamente independientes no siendo posible trabajar de forma conjunta con varios de ellos ni reutilizar de forma directa elementos comunes a los mismos.
- No existe posibilidad de generalización sobre los elementos del modelo, es decir, para algunos elementos solo se puede definir un tipo, y elementos que intervienen en un modelo no se pueden reutilizar en otro. En un modelo de vertedero se permiten definir las características del tipo de celda vertedero, del tipo de celda vertedero sellado, de dos tipos de celda relleno y de dos tipos de celda dren. No se permiten definir diversos tipos de celda vertedero, vertedero sellado, etc. Además, el concepto de tipo de celda no está generalizado, sino que se encuentra totalmente vinculado al modelo donde se define. Esto impide la reutilización de los tipos de celda para varios modelos y, al tener que repetir su definición en cada modelo, puede provocar errores a la hora de modificar tipos de celda comunes a varios modelos.
- Lo expuesto anteriormente para el tipo de celda es extrapolable a otros elementos que conforman la definición del modelo como, por ejemplo, los sistemas de drenaje, los sistemas de recirculación de lixiviados, las características de la balsa de lixiviados, etc.
- El programa utiliza como repositorio para el almacenamiento de los modelos y de los resultados de las simulaciones ficheros de texto. El formato que utiliza es propio y no responde ni se asemeja a ningún estándar de codificación del mercado resultando muy complejo explotar los datos de dichos ficheros de forma externa al programa. Utiliza un fichero para la climatología, uno para la generación de residuos y otro para el modelo morfológico del vertedero. En un momento determinado, el programa tiene cargado un fichero de cada uno de estos tres tipos conformando el modelo sobre el que se realizará la simulación, volcando los resultados también a otro fichero de texto.
- La interface de usuario es poco intuitiva y no se ajusta a los estándares para aplicaciones en entornos Windows. Por otro lado, la edición de la morfología del vertedero se realiza en una cuadrícula bidimensional de tamaño fijo que convierte la visualización y navegación por el modelo en una experiencia ardua y costosa para usuarios poco familiarizados con el programa.

- La herramienta con la que se ha venido desarrollando Moduelo v1, v2 y v3 a lo largo de los últimos años es Borland C++ Builder Versión 1.0. Dicha herramienta salió al mercado en el año 1997 y, dado que no se ha ido migrando a las nuevas versiones que han aparecido en estos 14 años, actualmente no es una plataforma viable para el desarrollo y la evolución de un programa de ese nivel de complejidad.
- El programa, aparentemente, en sus inicios carecía de una arquitectura y un diseño de objetos adecuados. Ha sufrido, a lo largo de los años, una gran evolución con modificaciones de los modelos de cálculo que implementaba y adición de nuevos modelos, todo ello de la mano de diversos programadores sin criterios de diseño comunes a la hora de extender la funcionalidad o implementar nuevas mejoras.
- Fruto de la evolución histórica del programa, éste actualmente es inestable, produciendo habitualmente cierres del programa inesperados. Además, para la realización de ciertas tareas es necesario conocer la secuencia exacta de acciones a realizar por parte del usuario. Desviaciones en dichas secuencias pueden dar lugar a situaciones inestables o errores en el programa.

Todo lo expuesto anteriormente no deslegitima el magnífico trabajo realizado por el grupo GIA en los últimos años. La herramienta Moduelo v3 desarrollada supone un importante avance en la modelización y simulación dinámica de vertederos, principalmente debido al desarrollo y optimización de los modelos de cálculo que implementa y a la capacidad de integración de todos esos modelos en una única herramienta.

Se consideran en este punto dos posibilidades, modificar y adaptar la herramienta existente Moduelo v3 o crear desde cero un nuevo programa en una nueva plataforma. Se toma la decisión de desarrollar desde cero un nuevo programa, heredero del existente en cuanto a su concepto de modelizado del vertedero y a los modelos de cálculo empleados en las simulaciones. El objetivo, básicamente, es subsanar las deficiencias detectadas relacionadas con el área de la ingeniería de software, para poder servir de herramienta para el presente trabajo y para otros trabajos futuros en vertederos reales, teóricos o casos de laboratorio.

El autor de esta tesis ha diseñado y desarrollado el nuevo programa denominado Moduelo v4 colaborando estrechamente con el Grupo de Ingeniería Ambiental (GIA). La aportación multidisciplinar del equipo de trabajo ha dado como fruto una herramienta de simulación dinámica de vertederos escalable, con capacidad de gestionar y simular gran cantidad de escenarios, desarrollada en una plataforma de uso extendido y con proyección de futuro, con una amplia funcionalidad, mantenibilidad y facilidad de uso por parte del usuario y con una alta integración de todos los modelos de cálculo necesarios.

En los siguientes apartados se describen diversos aspectos sobre el proceso de creación y las mejoras introducidas en la nueva herramienta Moduelo v4 así como las adaptaciones necesarias para el desarrollo de la metodología objeto de esta tesis.

4.2. Plataforma y metodología de desarrollo

El programa Moduelo v4 actualmente se desarrolla con Visual Studio 2010 sobre la plataforma .Net de Microsoft utilizando el lenguaje de programación C#. Utiliza una base de datos relacional SQL Server 2008 R2 como repositorio para almacenar los datos de los modelos y los resultados de las simulaciones.

Si bien su desarrollo comenzó en Visual Studio 2005 y SQL Server 2005, se ha ido adaptando a las nuevas versiones de la plataforma en un intento por implementar en cada momento la última tecnología disponible.

La plataforma .Net de Microsoft ha ido ganando cuota de mercado progresivamente desde su aparición en el año 2003, siendo hoy en día una de las apuestas tecnológicas más seguras a medio plazo. Entre sus ventajas está la gran cantidad de productos y soluciones que incorpora e integra de forma homogénea así como el hecho de compartir base tecnológica con otras tecnologías de Microsoft como los sistemas operativos Windows y la suite de Office, que son programas de uso muy extendido.

Tradicionalmente, las metodologías más empleadas en el desarrollo de software dependen de planificaciones concienzudas y detalladas previas al comienzo del desarrollo. Dichas planificaciones habitualmente exigen gran cantidad de documentación referente a requisitos funcionales, casos de uso, documentos de diseño, de arquitectura, de modelo de objetos, de modelo de datos, etc. No se comienza a escribir una sola línea de código hasta que todo está completamente planificado, diseñado y enmarcado en hitos y cronogramas que definen perfectamente la duración del proyecto. El cliente (entendiendo para este caso al usuario final del programa) participa en todo este proceso inicial de planificación del proyecto y, una vez definido, es ajeno al mismo hasta las pruebas que realizará en la etapa final. Desde este punto de vista, se concibe el desarrollo de software de un modo paralelo a la construcción de un edificio, un puente o cualquier otra obra de ingeniería. Se pretende diseñar y cuantificar a priori el proyecto para, una vez conocidos los costes y el tiempo necesario, abordar su construcción de forma mecánica.

Este tipo de metodologías han mostrado claramente sus limitaciones en numerosos proyectos y han dado lugar a una corriente crítica que se enmarca dentro de las denominadas "metodologías ágiles". Las metodologías consideradas ágiles, dentro de las cuales se puede destacar "Extreme Programming" y "SCRUM", defienden una aproximación radicalmente diferente al desarrollo de software. Se resume su filosofía citando al Manifiesto Ágil (Beck, et al. 2001):

"Estamos poniendo al descubierto mejores métodos para desarrollar software, haciéndolo y ayudando a otros a que lo hagan. Con este trabajo hemos llegado a valorar:

- *A los individuos y su interacción, por encima de los procesos y las herramientas.*
- *El software que funciona, por encima de la documentación exhaustiva.*
- *La colaboración con el cliente, por encima de la negociación contractual.*
- *La respuesta al cambio, por encima del seguimiento de un plan.*

Aunque hay valor en los elementos de la derecha, valoramos más los de la izquierda."

Para el desarrollo de Moduelo v4 se han seguido algunos de los principios presentes en este tipo de metodologías. Al comienzo del desarrollo no se crearon documentos de planificación de ningún tipo. Simplemente se definieron las líneas maestras de la arquitectura del sistema y se comenzó con el desarrollo. El objetivo era disponer de una versión operativa del programa en periodos de entre una semana y un mes. Desarrollando versiones sucesivas que fueran incrementándose en funcionalidad.

Al inicio de cada periodo se definían los objetivos para el mismo (objetivos evidentemente a corto plazo) en colaboración con los especialistas en vertederos y los potenciales usuarios finales. Se procedía al desarrollo de las funcionalidades y, una vez que finalizaba el periodo y se obtenía una versión operativa, se presentaba ésta a los especialistas y usuarios para ver si cumplía adecuadamente con sus expectativas. En algunos de los periodos, debido a nuevas funcionalidades, era necesario recapitular y realizar reorganizaciones de código o re-ingeniería de ciertos procesos, considerando estos trabajos como algo natural e inherente al proceso evolutivo del programa.

Este método de trabajo ofrece varias ventajas:

- Desde el primer momento se comienza a escribir código útil que funciona, siendo está la principal medida de progreso.
- El cliente o usuario final participa activamente en todo el desarrollo y no solo dando su opinión al final del mismo, cuando ya puede resultar extremadamente costoso realizar ciertos cambios de fondo. Con periodos cortos es fácil solventar situaciones donde no se ha captado bien la intencionalidad del cliente o usuario final o donde el programador ha realizado interpretaciones poco afortunadas.
- Se potencia la adaptación al cambio. La construcción incremental de versiones operativas que van incluyendo nueva funcionalidad favorece la adaptación progresiva del diseño y potencia la mantenibilidad del programa en el futuro ante la aparición de nuevos requisitos.

Otro de los principios que ha resultado de gran utilidad es la creación de test unitarios. Los test unitarios consisten en crear pruebas para verificar el correcto funcionamiento de cada parte del código que se va desarrollando. Dichas pruebas se escriben mediante código y deben garantizar que, si son positivas, el código al que afectan cumple correctamente con su función. La parte del código que queda "cubierto" por test unitarios recibe un alto aseguramiento de la calidad. Además, cuando en el futuro se realicen cambios, se pueden ejecutar todos los test unitarios existentes para comprobar si dichos cambios han inducido a errores en algún lugar del código.

Los test unitarios resultaron de gran utilidad en las fases iniciales del desarrollo, si bien, a medida que el programa aumentó en complejidad, resultó cada vez más difícil respetar la disciplina necesaria para definirlos y, fundamentalmente, para mantener los existentes ante cambios de cierta envergadura. Esto no debe atribuirse a una falta de eficacia del método de los test unitarios, sino más bien a los ajustados recursos con los que se acometió el desarrollo. Una de las tareas futuras a abordar es el desarrollo de los test unitarios que faltan para dar cobertura total al código del motor de simulación.

4.3. Índice de mantenibilidad

Dentro del área de la ingeniería de software, se han desarrollado diversos métodos para evaluar cuantitativamente la calidad del código de un programa. Una de ellas, denominada índice de mantenibilidad del código (MI), es una medida compuesta que incorpora algunas de las métricas tradicionalmente utilizadas en un solo número que representa la "mantenibilidad relativa".

El MI se usa para determinar si un código tiene un alto, medio o bajo nivel de dificultad para mantenerlo. La medición y el seguimiento de la mantenibilidad se utilizan para reducir o invertir la tendencia de un programa a la "entropía de código" o a la degradación de su integridad, y para indicar cuándo resulta más rentable y/o menos arriesgado rescribir el código por completo en lugar de intentar modificarlo.

Esta métrica introducida por (Oman, Hagemester y Ash 1991) ha evolucionado en diversas variantes y se ha aplicado con éxito en numerosos sistemas de software de diferente complejidad a lo largo de dos décadas. La ecuación polinomial utilizada para su cálculo es la siguiente:

$$MI = 171 - 5,2 \ln(HV) - 0,23(CC) - 16,2 \ln(LOC)$$

Las métricas que intervienen en su cálculo son las siguientes:

HV (Halstead Volume). Introducido por Maurice H. Halstead (Halstead 1977), evalúa la complejidad de un código en base a los operadores y operandos presentes en el mismo. Dados los siguientes valores:

- $n1$ - el número de operadores distintos
- $n2$ - el número de operandos distintos
- $N1$ - el número total de operadores
- $N2$ - el número total de operandos

Se puede calcular el HV mediante la siguiente fórmula:

$$HV = (N1 + N2)(\log_2(n1 + n2))$$

CC (Cyclomatic Complexity o conditional complexity). Desarrollado por Thomas J. McCabe (McCabe 1976) para evaluar la complejidad de un código en base al número de rutas linealmente independientes que puede seguir su ejecución. Se puede calcular a partir de un gráfico de control de flujo que refleje la topología del programa. A partir de los siguientes valores del gráfico:

- E - número de conectores del gráfico
- N - número de nodos del gráfico
- P - número de componentes conectados

Se puede calcular la CC mediante la siguiente fórmula:

$$CC = E - N + P$$

LOC (Lines of code). Líneas de código de un programa, como contador del número total de líneas de código ejecutables. Esta métrica, aunque fue ampliamente utilizada en el pasado, en muchos casos no refleja fielmente la complejidad de un código ya que no tiene en cuenta diversos factores como la calidad del diseño implementado en un programa.

El número de líneas de código también se ha utilizado en algunos casos para evaluar la productividad de los programadores. Respecto a esta idea Bill Gates manifestó con acierto: “*Medir la productividad de software mediante el número de líneas de código es como medir el progreso en un avión por cuanto pesa*”.

Otros autores como Frederick P. Brooks, en su libro sobre ingeniería de software "The Mythical Man-Month" (Brooks 1975) defienden que independientemente del lenguaje de programación seleccionado, un desarrollador profesional debería escribir, de media, 10 líneas de código al día. A priori puede parecer una cantidad ridícula pero en la actualidad un orden de magnitud de entre 10 y 100 líneas de código de media al día sería bastante acertado.

Volviendo al índice de mantenibilidad. Según la fórmula original, el MI de un código puede estar entre 171 y un número negativo no limitado. Cuanto más bajo sea el MI peor será la mantenibilidad del código. Microsoft, en su herramienta Visual Studio 2008 y 2010, realiza una ligera adaptación del MI considerando que cuando el MI se aproxima a cero o está por debajo de cero la mantenibilidad es nula (no tiene mucho sentido práctico cuál es el valor exacto). De esta forma simplifica la escala para que sea lo más clara posible tratando cualquier valor menor que cero como cero y trasladando la escala del rango 0 - 171 al rango 0 - 100. La fórmula adaptada sería la siguiente:

$$MI_{VS} = \text{MAX}(0, (171 - 5,2 \ln(HV) - 0,23(CC) - 16,2 \ln(LOC)) * 100/171)$$

A la hora de considerar qué valores del MI son deseables o aceptables podemos citar diversas fuentes. Microsoft tiene una aproximación muy poco conservadora proporcionando los siguientes rangos en la escala entre 0 y 100:

- 0 a 9 - Poco mantenible.
- 10 a 19 - Moderadamente mantenible.
- 20 a 100 - Buena mantenibilidad.

Estos rangos intentan eliminar ruido de fondo resaltando solamente el código que claramente está por debajo de los umbrales de mantenibilidad mínimos. Por su parte Verifysoft (Verifysoft Technology 2011) proporciona los siguientes rangos que, aunque son para un cálculo de MI ligeramente modificado para tener en cuenta también comentarios en el código, podemos considerar válidos para nuestra comparativa. Adaptados a la escala entre 0 y 100 son los siguientes:

- < 38 - Poco mantenible.
- 38 a 50 - Moderadamente mantenible.
- 50 a 100 - Buena mantenibilidad

En 1994 los empleados de Hewlett Packard Don Coleman y Dan Ash (Coleman, y otros 1994) ante una decisión de compra de dos posibles programas de una cierta complejidad (un cuarto de millón de líneas de código) encargaron a los ingenieros de software que analizaran ambos códigos para dar un veredicto. Paralelamente, llevaron a cabo un estudio calculando los MI de cada uno de los programas. Los ingenieros calificaron uno de los programas como poco mantenible y el otro como altamente mantenible. Los correspondientes MI fueron (trasladados a la escala 0 a 100) de 52 y 72 respectivamente.

Se ha aplicado el cálculo de MI al nuevo programa desarrollado Moduelo v4 mediante la herramienta "Visual Studio 2010 Ultimate". El resultado promedio para todo el sistema ha sido de 80 (según la fórmula adaptada de Microsoft en la escala entre 0 y 100). Si solo se tiene en cuenta el motor de simulación de Moduelo v4 el resultado es de 86. Dada la complejidad de lógica presente en el simulador, se considera un índice de mantenibilidad altamente satisfactorio.

Se ha evaluado también el MI de la versión anterior de Moduelo v3 mediante la herramienta "Krakatau Professional for C/C++ v2.11.003" de la empresa PowerSoftware (PowerSoftware 2012) y el resultado en la escala entre 0 y 100 ha sido de 40 para todo el programa y de 36 para el motor de simulación. No se ha evaluado con Visual Studio 2010 debido a que no soporta el código Borland C/C++ con el cual está desarrollada la versión 3 de Moduelo.

Dichos resultados demuestran, de forma objetiva, que la decisión de re-escribir el programa Moduelo completamente para poder afrontar el presente trabajo y ofrecer una proyección de futuro en nuevas líneas de investigación fue una decisión acertada. La adaptación y/o evolución de la versión Moduelo v3 hubiera resultado inviable.

También resulta de interés esta aplicación práctica de métricas de código a un caso concreto del cual se conocía a priori un orden de magnitud cualitativo de la mantenibilidad de cada uno de los códigos, basado en el análisis subjetivo del autor de este trabajo.

Al igual que en el caso presentado de Coleman y Ash, las métricas no han hecho sino confirmar, con bastante precisión, los análisis subjetivos previos.

4.4. Modelo de datos

El modelo entidad-relación (ER) originalmente propuesto por (Chen 1976) es una de la herramientas más utilizadas actualmente para la modelización conceptual de sistemas de información. Un modelo ER define las entidades principales del dominio de estudio así como las relaciones que existen entre ellas. El objetivo es alcanzar un modelo teórico ideal de los datos con independencia de dónde se vayan a almacenar éstos físicamente y cómo vayan a ser usados.

Para la simulación dinámica de vertederos un primer paso necesario es definir un modelo ER consistente que tendrá utilidad con independencia de la plataforma tecnológica que lo implemente o de las herramientas que hagan uso de él. Si su diseño es correcto podrá soportar sin modificaciones apreciables diferentes requisitos funcionales que pueden ir apareciendo a lo largo de la evolución de un programa.

A partir del modelo ER se puede obtener una implementación física en una base de datos. Así mismo, como se presenta más adelante, se pueden obtener las entidades de negocio, que actuarán como ejes principales de la arquitectura en tres capas propuesta.

En la versión anterior del programa (Moduelo v3) no se utilizaba ninguna base de datos ni existía ningún tipo de modelizado ER. La gestión de los datos se realizaba sobre ficheros de texto donde se almacenaban o leían datos para su utilización en el programa. En este sentido, la definición del modelo conceptual de datos ha supuesto un avance significativo en Moduelo v4.

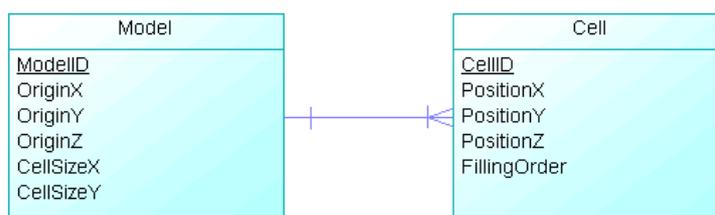


Ilustración 25. Modelo ER. Ejemplo de representación conceptual.

Para la representación del modelo ER propuesto se utiliza una vista conceptual del mismo como se puede apreciar en la Ilustración 25 donde se muestra un ejemplo muy sencillo formado por dos entidades.

Las entidades se representan en rectángulos cuyo título es el nombre de la entidad. Dentro de las entidades se representan los diferentes atributos o propiedades de las mismas. En el ejemplo se presenta la entidad Modelo (de vertedero) con unos atributos que representan las coordenadas UTM de su origen local de coordenadas así como el tamaño de las celdas en X e Y (que es común para todo el modelo). También aparece la entidad Celda con su posición en el modelo (coordenadas de celda locales) y su orden de llenado relativo.

Los extremos de las líneas de relación muestran la cardinalidad de la relación. La cardinalidad especifica el máximo y el mínimo número de instancias de la Entidad A en relación con la Entidad B en un extremo y de la Entidad B con la Entidad A en el otro extremo. En el ejemplo, la interpretación de dicha relación consiste en que una celda pertenece a un modelo (no puede pertenecer a varios ni puede existir sin que exista uno) y que un modelo puede contener una o varias celdas (tampoco tiene sentido un modelo sin celdas).

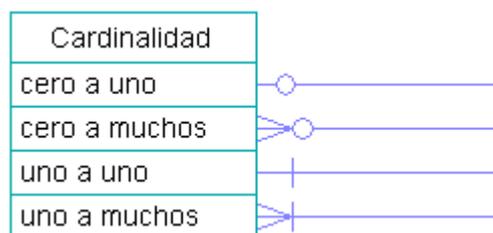


Ilustración 26. Modelo ER. Símbolos para la cardinalidad de las relaciones.

Los diferentes símbolos utilizados para representar la cardinalidad en las líneas de relación se presentan en la Ilustración 26.

La interpretación de dichos símbolos es la siguiente:

- Cero a uno. Indica que una instancia de la entidad en el extremo opuesto tiene relación con un mínimo de cero y un máximo de una instancia de la entidad en dicho extremo (una o ninguna).
- Cero a muchos. Indica que una instancia de la entidad en el extremo opuesto tiene relación con cero o varias instancias de la entidad.
- Uno a uno. Indica que una instancia de la entidad en el extremo opuesto tiene relación con una y solo una instancia de la entidad.
- Uno a muchos. Indica que una instancia de la entidad en el extremo opuesto tiene relación con una o varias instancias de la entidad.

A continuación se presentan los diagramas correspondientes a los diseños ER realizados para Moduelo v4. Los nombres que aparecen en los mismos están en inglés. Toda la semántica utilizada en Moduelo v4 tanto en diseño, programación o interface de usuario está en inglés. Se adoptó esta decisión en la fase inicial del trabajo para lograr una herramienta de uso internacional.

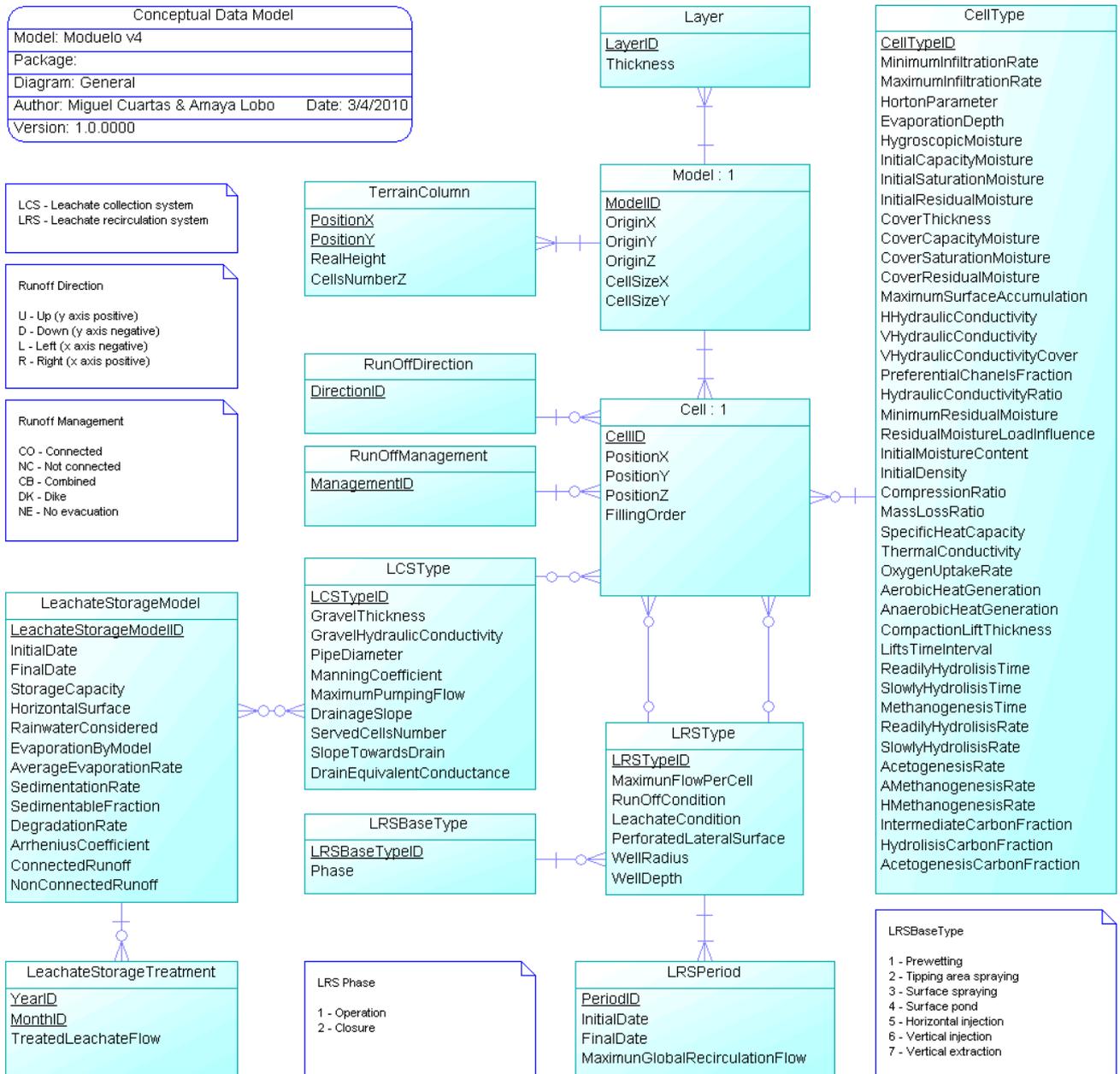


Ilustración 27. Modelo ER. Definición del vertedero.

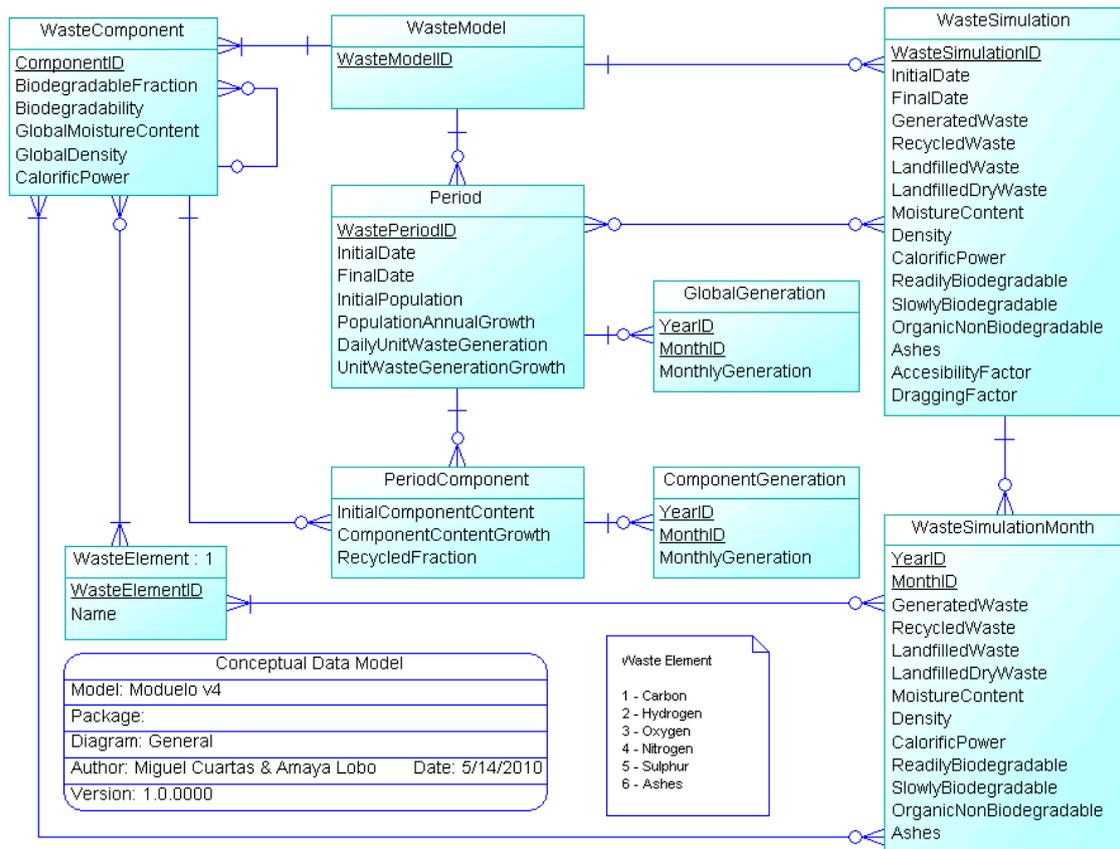


Ilustración 28. Modelo ER. Generación de residuos.

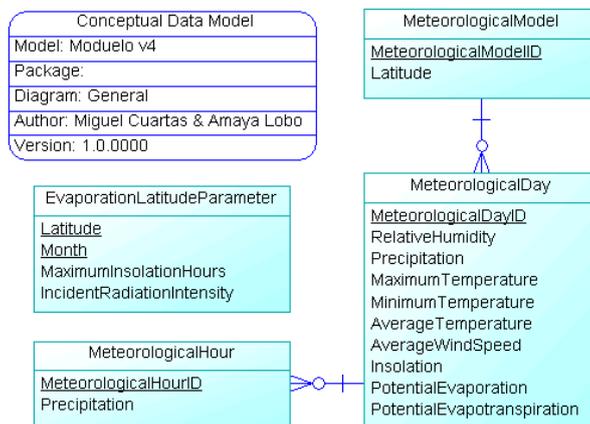


Ilustración 29. Modelo ER. Climatología.

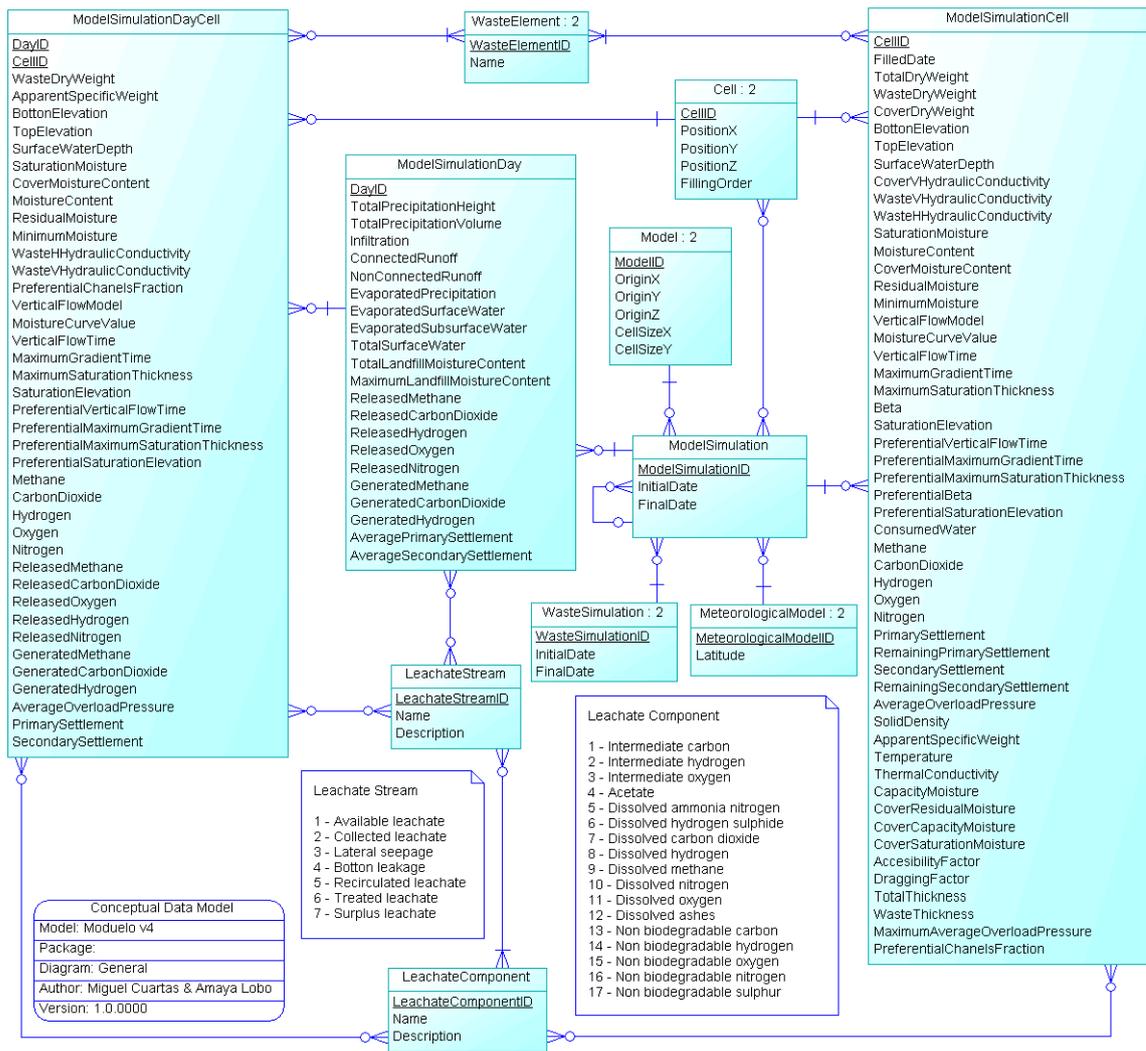


Ilustración 30. Modelo ER. Simulaciones y resultados.

4.5. Especificaciones funcionales

El programa modeliza la morfología realizando una discretización del vertedero en tres dimensiones, de forma que se descompone el vertedero en celdas de forma cúbica. En planta (ejes x-y) se definen el número de celdas y el tamaño de las mismas, y en alzado (eje z) se define el número de capas y el espesor de cada capa.

Se puede definir el terreno, sobre el que se asentará posteriormente el vertedero, de forma manual mediante el diseñador de modelos. El diseñador de modelos es una herramienta de diseño con visualización tridimensional que nos permite visualizar y editar el modelo. También es posible importar el terreno, de forma automática, desde ficheros .dxf que contengan información de sus líneas de nivel.

Una vez definido el terreno se irán colocando las celdas del vertedero según el orden de llenado de las mismas. El orden de llenado es un número incremental asignado a cada celda que refleja la estrategia de explotación que se desea seguir para ir construyendo el vertedero. A cada celda se le asignará además un tipo de celda. Los tipos de celdas permiten definir las características del vertedero en los siguientes aspectos:

- Características del residuo
- Características de la cobertura
- Modelo de infiltración superficial
- Modelo de evapotranspiración
- Modelo de escorrentía
- Modelo de flujos preferenciales
- Modelo de variación de la humedad residual
- Modelo de biodegradación
- Modelo de temperaturas
- Modelo de asentamientos

Una vez definida la morfología del vertedero y las características de sus celdas, se le añaden al modelo los sistemas de recolección de lixiviados y de tratamiento de la escorrentía superficial. Esto se hace definiendo primeramente dichos tipos y sus características y localizándolos posteriormente dentro del vertedero, mediante el diseñador de modelos.

El programa permite definir varios tipos de recirculación de lixiviados con sus características: Pre humectación, regado en el frente de vertido, regado superficial, laguna superficial, inyección horizontal, inyección vertical mediante pozos, etc. Para todos ellos permite definir también un modelo de almacenaje de lixiviados (balsa de almacenaje) .Cuando los tipos de recirculación necesarios ya están definidos, es necesario localizarlos dentro del vertedero mediante el diseñador de modelos.

Una vez que se ha completado el modelo de vertedero es necesario crear un modelo climatológico que refleje los datos diarios y/o horarios de precipitación y los datos diarios de humedad relativa, temperaturas, velocidad del viento y horas de insolación durante el periodo de simulación. El programa permite importar dichos datos de hojas Excel.

Por último, queda definir el modelo de generación de residuos. El programa dispone de un modelo muy potente de generación de residuos. Es posible definir los componentes básicos del residuo que se desee (Cartón, Plástico, Vidrio, etc.) con las características de cada uno (composición química, biodegradabilidad, humedad, poder calorífico, etc.). Luego es necesario definir la cantidad de generación de residuos para lo cual existen diferentes mecanismos (por población, por generación mensual, componentes por población, etc.) que permiten obtener la evolución temporal de una generación de residuos teniendo en cuenta criterios como el crecimiento de la población o el grado de reciclaje. Es posible definir varios orígenes heterogéneos de residuos y aplicarlos a una misma generación de residuos para obtener el patrón final de llegada al vertedero.

A la hora de simular, se puede realizar una simulación aislada o una simulación a partir de otra existente (los periodos de tiempo deben de ser contiguos). En una simulación se pueden activar o desactivar los siguientes cálculos: cálculos hidrológicos en superficie, flujo vertical y flujo horizontal de lixiviados, biodegradación, asentamientos, almacenamiento de lixiviado y recirculación. Existen tres formas de realizar la simulación:

- La estándar, en la cual el programa realiza la simulación mostrando una barra de progreso y almacenando los resultados en la base de datos.
- La visual, en la cual se muestra visualmente una representación del vertedero donde se observa su evolución, permitiendo monitorizar durante la simulación las características de las celdas del modelo.
- La externa, donde el sistema exporta los datos necesarios para la simulación en ficheros, que pueden llevarse a otra plataforma más potente para realizar la simulación, importando al final los ficheros de resultados generados.

Durante una simulación, el programa realiza los siguientes cálculos:

- Cálculos diarios iniciales.
 - Generación de residuos. A partir del modelo de generación de residuos, se añaden al vertedero las celdas necesarias para modelizar los residuos vertidos en el día, según el orden de llenado establecido.
- Cálculos horarios en el día.
 - Cálculos hidrológicos en superficie. Se evalúa la precipitación de agua, la evaporación del agua en superficie, la evaporación de la humedad del vertedero, la infiltración, la escorrentía superficial y la altura de charcos.
 - Cálculos de flujo vertical entre celdas. Se evalúa la transmisión vertical de humedad y compuestos disueltos entre las celdas del vertedero y de estas con el terreno. Se tienen en cuenta los sistemas de recolección de lixiviados para el cálculo del lixiviado drenado.
 - Cálculos de flujo horizontal entre celdas. Se calcula la transmisión horizontal de humedad y compuestos disueltos entre celdas del vertedero y de estas con el terreno.
 - Cálculos de recirculación de lixiviados. Se calculan las variaciones de humedad y composición de las celdas debidas a la recirculación.
- Cálculos diarios finales.
 - Cálculos de biodegradación en las celdas. Se evalúa la evolución en la composición química de las celdas debida a la biodegradación de sus componentes.
 - Cálculos de almacenamiento de lixiviados. Se calcula la evolución de la balsa de almacenamiento de lixiviados debida a las entradas por elementos de drenaje y a las salidas por recirculación así como los fenómenos presentes en ella (influencia de la climatología, biodegradación, decantación, etc.).
 - Cálculos de asentamientos producidos en el vertedero. Se calculan los asientos primarios producidos por el peso de los residuos y los asientos secundarios originados por la biodegradación del mismo.

Al finalizar una simulación el programa puede facilitar los siguientes datos:

- Características finales de todas las celdas del vertedero.
- Serie de datos diarios globales del vertedero.
- Serie de datos diarios de cada sistema de recolección de lixiviados.
- Serie de datos diarios de diversos flujos de lixiviados presentes en el vertedero:
 - Lixiviado total recolectado por los sistemas de drenaje,
 - Fuga de lixiviado lateral hacia el terreno (o desde el terreno).
 - Fuga de lixiviado por el fondo hacia el terreno.
 - Lixiviado disponible (balsa de lixiviados)
 - Lixiviado excedente (balsa de lixiviados)
 - Lixiviado recirculado.
 - Lixiviado tratado.
- Serie de datos diarios de registro de las características de celdas seleccionadas.

4.6. Arquitectura del programa

El diseño del sistema es orientado a objetos y basado en componentes y su arquitectura, desde un punto de vista lógico, se divide en tres capas:

- Capa de acceso a datos.
- Capa de lógica de negocio.
- Capa de presentación.

Existen funcionalidades transversales a las tres capas, principalmente las comunicaciones, la seguridad y la configuración del sistema.

La comunicación entre capas se realiza a través de entidades de negocio.

La capa de acceso a datos se encarga de recuperar y guardar las entidades de negocio en las diferentes fuentes de datos. Para ello es capaz de gestionar las conexiones con las fuentes de datos de forma segura y fiable y de ejecutar operaciones CRUD (create, read, update and delete). Cada entidad de negocio tiene un componente de acceso a datos capaz de gestionar todas las operaciones que requiere.

La capa de lógica de negocio tiene varios cometidos. Se pueden destacar los siguientes:

- Proporciona a la capa de presentación las entidades de negocio requeridas gestionando su recuperación con la capa de acceso a datos y realizando integración de datos o transformaciones cuando sea preciso.
- Cachea ciertas entidades de forma que sea eficiente su recuperación mientras no sufran cambios.
- Valida la consistencia de las entidades de negocio antes de enviarlas para su almacenamiento en las fuentes de datos.
- Gestiona la lógica de procesos en los que intervienen una o varias entidades. Gestiona la lógica de comunicación con sistemas externos.
- Contiene el motor de simulación como un componente encapsulado que puede ser ejecutado con independencia del programa.

La capa de presentación se utiliza básicamente para presentar datos al usuario y obtener datos de este mostrando las entidades de negocio de una forma clara y atractiva. Además realiza las siguientes funciones:

- Proporciona asistencias en la introducción de datos con diferentes editores, dominios de otras entidades y validaciones básicas.

- Coordina la navegación entre los diferentes componentes de la interface de usuario.
- Gestiona el estado del cliente en cada momento en base a las acciones ejecutadas por el usuario.

En la Ilustración 31 se presenta un diagrama con los diferentes elementos de la arquitectura lógica.



Ilustración 31. Modulo. Arquitectura lógica.

La arquitectura propuesta permite la ejecución del programa en modo cliente servidor de forma que varios usuarios trabajen simultáneamente sobre una misma base de datos que actúa de repositorio de todos los modelos. Además, el hecho de utilizar una arquitectura en tres capas, permitirá en un futuro poder desarrollar clientes Web creando una nueva capa de presentación sin necesidad de modificar las otras dos capas, e incluso ofertar el motor de simulación como servicio en la red a través de una interface de Web Services. En el apartado de conclusiones y líneas futuras se exploran con más detalle estas posibilidades.

La implementación de esta arquitectura lógica da lugar a una distribución física en ensamblados. Esta implementación se muestra en la Ilustración 32.

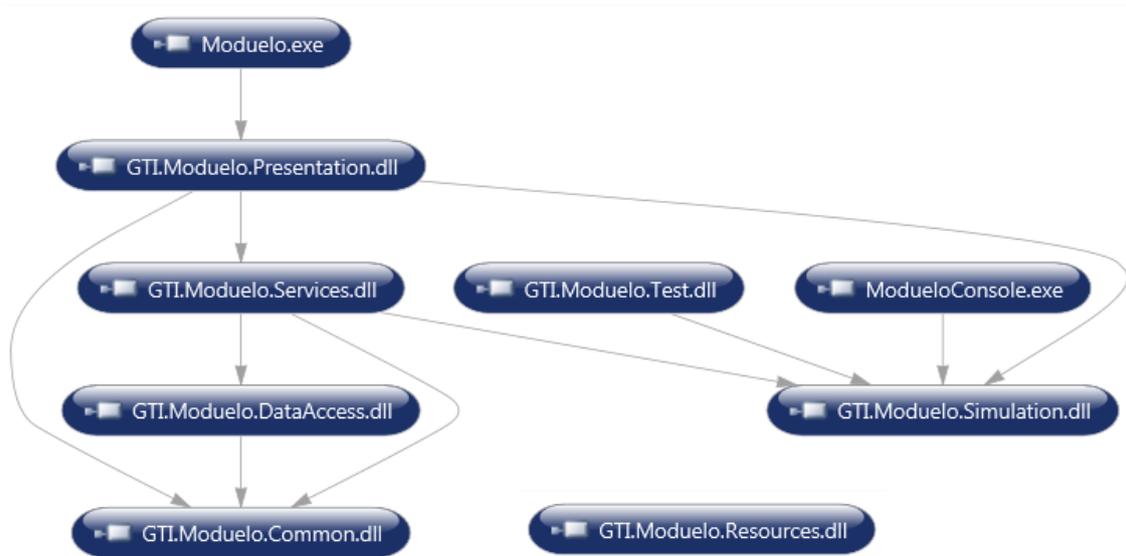


Ilustración 32. Módulo. Arquitectura física.

La capa de presentación no realiza operaciones directamente con la base de datos. Utiliza la capa de servicios, que a su vez utiliza la capa de acceso a datos. Estas tres capas hacen uso de las entidades de negocio contenidas en "GTI.Moduelo.Common" para transmitirse los datos necesarios entre una y otra. Este sistema tiene la ventaja de que no se dispersan por todo el código operaciones de lectura y/o escritura a la base de datos. Esto provocaría que, a la hora de realizar un cambio en el modelo de datos, fuera muy complicado localizar y modificar en el código todos los accesos a dichos datos. En lugar de ello, se centralizan todas estas operaciones en la capa de acceso a datos de forma que cualquier parte del código que necesite una determinada operación acude a un lugar común. Otra ventaja es que se aíslan tanto la capa de presentación como la capa de servicios del sistema de la base de datos que se utilice. Si en un futuro se cambia de gestor de base de datos, solo es necesario realizar cambios en la capa de acceso a datos.

El motor de simulación implementado en "GTI.Moduelo.Simulation" es totalmente independiente del resto del programa. Esto permite que además de la aplicación principal Moduelo v4 ("Moduelo.exe"), hagan uso de él "GTI.Moduelo.Test" que contiene los test unitarios y "ModueloConsole.exe" que es una versión reducida, no visual, de Moduelo v4 en modo Consola que solo se utiliza para realizar simulaciones. El origen y la utilidad de Moduelo Consola se discutirá en el siguiente apartado (Plataforma de simulación).

4.7. Interacción con el usuario

Otra de las aportaciones relevantes dentro del desarrollo de la nueva herramienta de modelizado y simulación Moduelo v4 es la concepción de su interface con el usuario. Los siguientes trabajos previos del autor

- Sistema para la prescripción, dispensación y administración de medicamentos por Unidosis para el Hospital Clínico Marqués de Valdecilla en Santander (2000).
- Gestión de ficheros maestros para la aplicación de almacén distribuido para Laboratorios Dr. Echevarne en Barcelona (2001).
- Marco de trabajo y clases básicas para el sistema integrado técnico - administrativo de Nuclenor, central nuclear de Santa María de Garoña en Burgos (2003)
- Gestión de laboratorios de análisis clínicos. EOLIS (Expert Open Laboratory Information System) para el Hospital Clínico San Carlos de Madrid y para St. Bernards Hospital de Gibraltar (2007).

permitieron el desarrollo de un marco de trabajo que se ha aplicado con éxito al presente proyecto para definir un entorno de trabajo intuitivo y productivo.

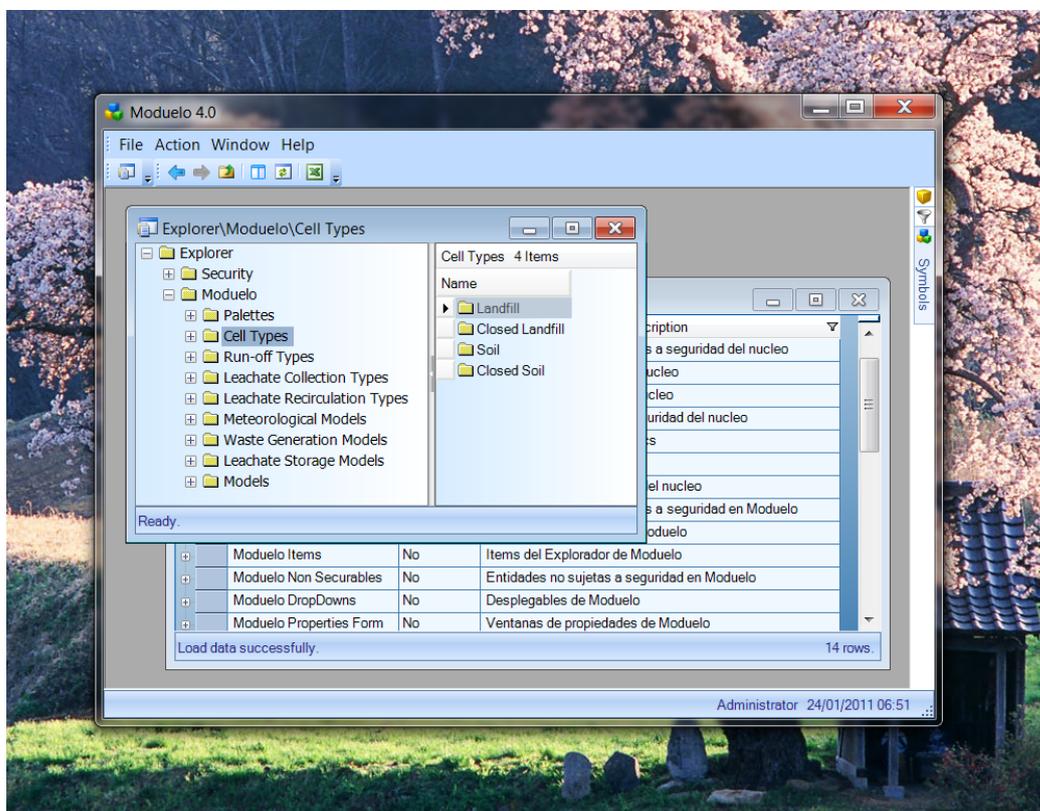


Ilustración 33. Interface de usuario. Entorno multidocumento.

El entorno de trabajo multidocumento (MDI o Multiple Document Interface) está formado por una ventana marco dentro de la cual se encuentra un espacio de trabajo donde se pueden abrir otras ventanas y herramientas para realizar tareas concretas. A pesar de haber sido un paradigma utilizado con éxito durante años, últimamente ha sido ignorado dentro de algunas tecnologías (las versiones actuales de los Frameworks de Microsoft WPF o Silverlight sorprendentemente no lo soportan de forma nativa). Esto puede ser debido a la proliferación en los últimos tiempos de multitud de dispositivos con diferentes tamaños de pantalla y resoluciones. Esta variedad de factores de forma unido a las interfaces táctiles probablemente no recomiende el uso de aplicaciones multidocumento para tales casos.

A pesar de ello, aplicaciones de referencia en la actualidad en lo que a productividad se refiere, como el entorno de desarrollo de Visual Studio o la suite de Microsoft Office apuestan por interfaces de tipo multidocumento. El caso de Office (por ejemplo Excel) es especialmente curioso ya que si bien en versiones anteriores abandonó el entorno multidocumento (MDI o Multiple Document Interface) en favor de un entorno de documento único (SDI o Single Document Interface) en las últimas versiones ha vuelto al modelo MDI.

En Moduelo también se ha optado por este planteamiento multidocumento según se aprecia en la Ilustración 33 ya que presenta, entre otras, las siguientes ventajas:

- Permite realizar simultáneamente diferentes tareas.
- Facilita comparar datos de diferentes elementos y copiar y pegar datos entre ellos con comodidad.
- Proporciona espacio para distribuir las herramientas necesarias para labores complejas, por ejemplo, para el diseño visual del vertedero o para la evaluación visual de resultados sobre el diseñador de vertedero.
- Permite al usuario mostrar, ocultar y configurar la distribución de las herramientas de trabajo según sus necesidades.

Otro de los aspectos fundamentales en Moduelo v4 es la gestión de los datos referentes a los modelos. El sistema debe permitir la consulta, creación, edición y borrado de entidades de forma homogénea e intuitiva para el usuario. Esto con independencia del tipo de entidad de que se trate (tipos de celdas, escalas de colores para las representaciones visuales, modelos meteorológicos, componentes de la generación de residuos, sistemas de recirculación, etc.).

La gestión de los datos se gestiona sobre tres componentes básicos: El "Explorador de datos", ventanas de tipo rejilla multinivel (del tipo Microsoft Excel) y el diseñador gráfico en tres dimensiones. Por el interés que presenta para la gestión organizada del gran volumen de datos de este trabajo se presenta a continuación el "Explorador de datos" con un cierto detalle.

El "Explorador" permite visualizar todos los datos que conforman el modelo de forma jerarquizada. Consiste en una ventana con un árbol a la izquierda y una vista de detalle a la derecha.

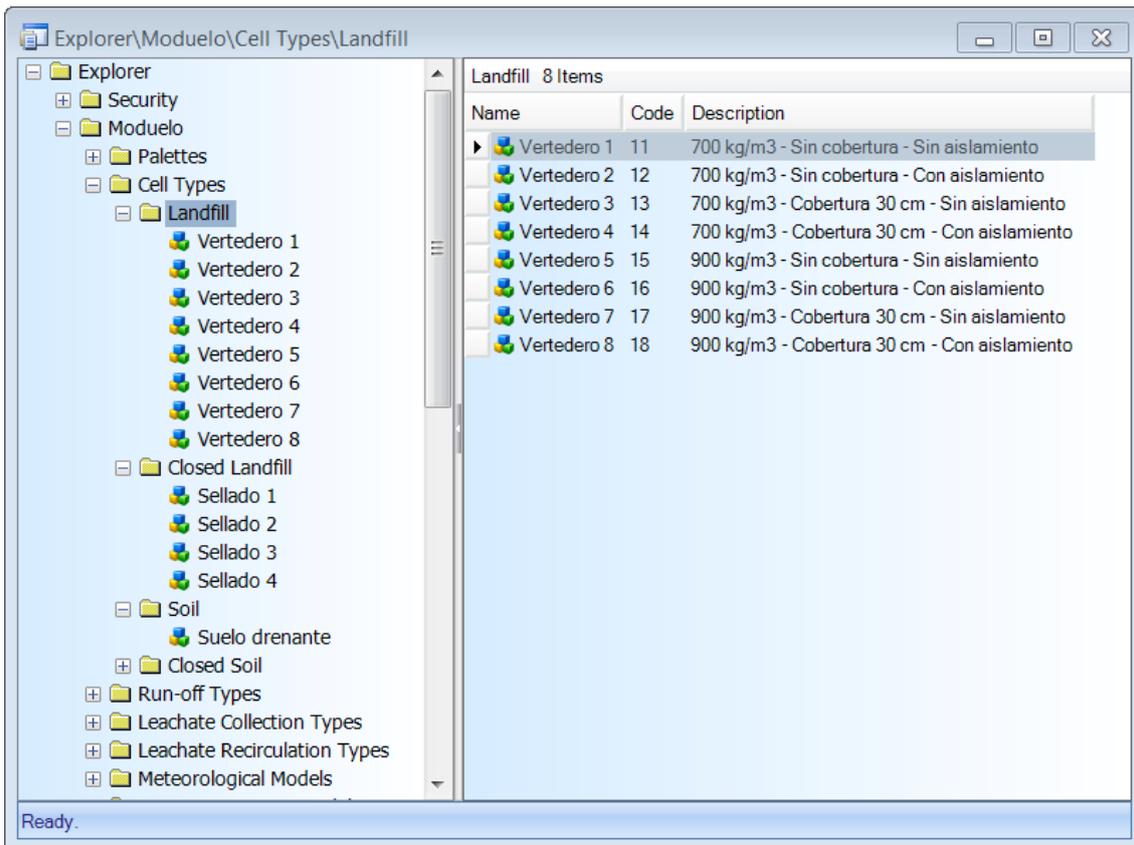


Ilustración 34. Interface de usuario. Explorador. Tipos de celda.

En el árbol se presenta una estructura jerárquica de carpetas representando contenedores de un determinado tipo de entidad. Colgando de cada contenedor se representan las instancias de las entidades de ese tipo. Por ejemplo, en la Ilustración 34 se puede apreciar el contenedor correspondiente a los tipos de celda denominado "Cell Types" y colgando de él otros contenedores para subtipos de celda que comparten características comunes: "Landfill", "Closed Landfill", "Soil" y "Closed Soil". A su vez, colgando de cada uno de estos contenedores se encuentran las instancias concretas de cada tipo de celda. En el ejemplo se presentan los tipos de celda definidos para este trabajo tal y como se comentará en el capítulo que trata sobre el modelo básico y las variantes de diseño.

En la parte derecha del Explorador se presenta una relación de detalle de los elementos descendientes del nodo actualmente seleccionado en el árbol. Se presenta al usuario el nombre del nodo seleccionado en el árbol, el número de elementos descendientes y una serie de atributos referentes a cada uno de dichos elementos.

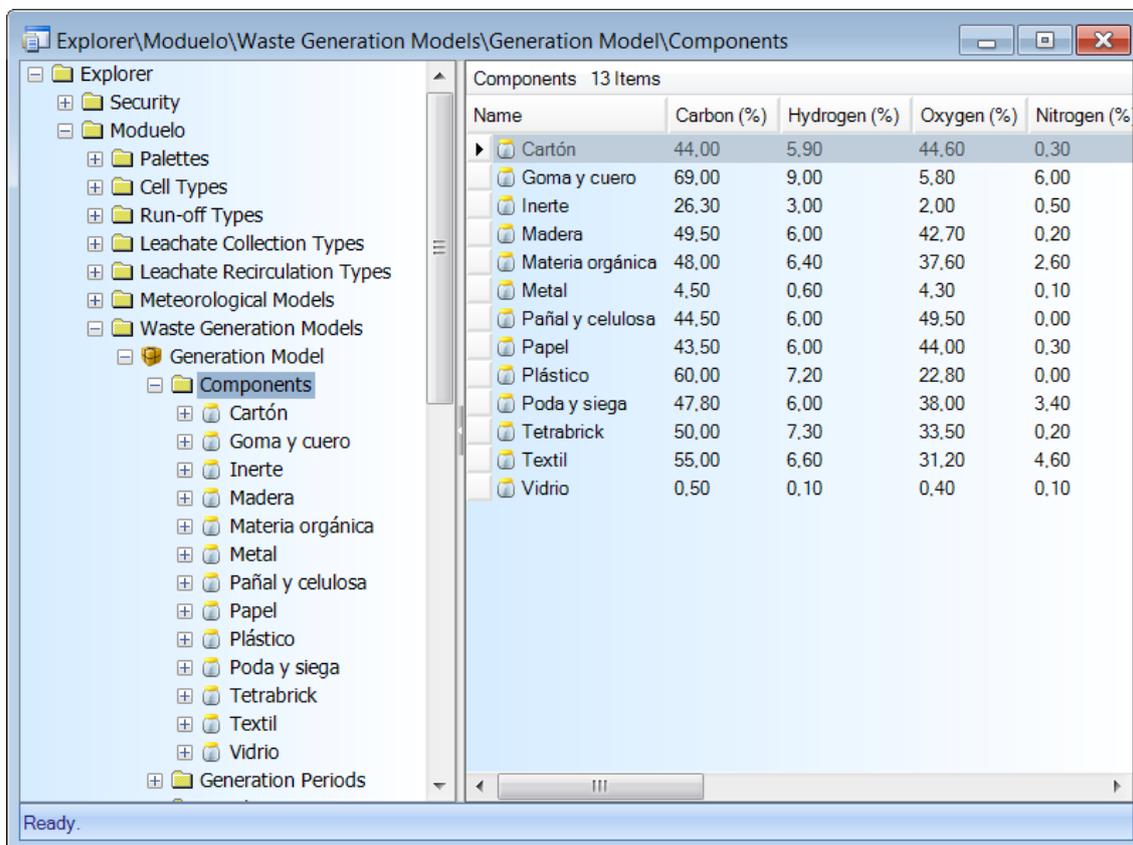


Ilustración 35. Interface de usuario. Explorador. Componentes del residuo.

En la Ilustración 35 se puede apreciar el contenedor de los modelos de generación de residuos "Waste Generation Models". Dentro de dicho contenedor se pueden definir varias instancias de modelos de generación de residuos. En el presente trabajo se ha definido un modelo denominado "Generation Model". A su vez, cada modelo tiene vinculados datos, por ejemplo, los componentes del residuo con sus características o la definición de periodos de generación. En la Ilustración 35 se presentan los componentes utilizados en el modelo de generación y sus características en cuanto a composición.

El sistema también permite definir componentes descendientes de otros componentes de forma que, por ejemplo, colgando del papel se podrían definir otros componentes como papel blanco, papel de periódico, papel de revista, etc con sus características correspondientes. Luego, en cada caso se puede utilizar el componente más general o más específico según la información de que se disponga.

Tanto en el ejemplo de los tipos de celda, como en el ejemplo de los modelos de generación, ninguno de ellos está vinculado explícitamente a un modelo de vertedero concreto. Esto implica que dichos elementos se puedan reutilizar para diferentes modelos de vertedero o incluso que para un mismo modelo de vertedero se puedan realizar diferentes simulaciones con diferentes modelos de generación de residuos.

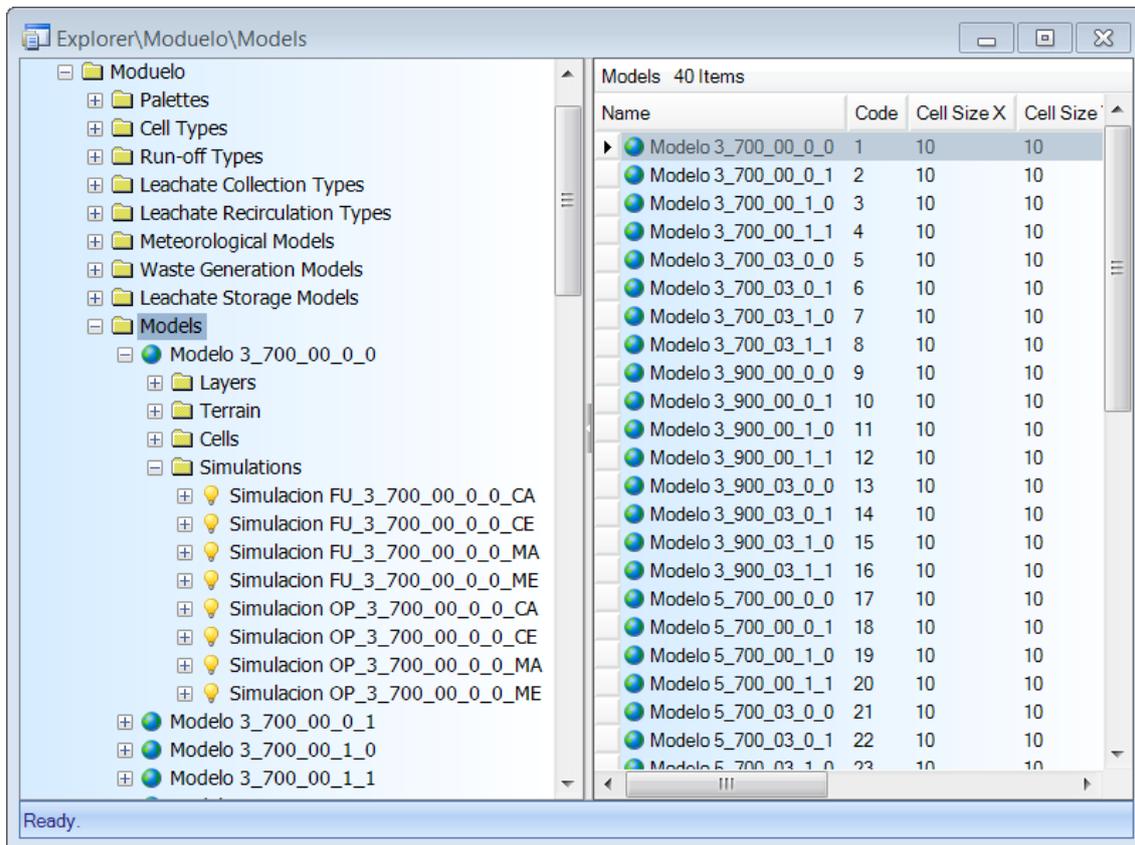


Ilustración 36. Interface de usuario. Explorador. Modelos y simulaciones.

En la Ilustración 36 se presenta el contenedor de modelos de vertedero. Colgando de él se encuentra la relación de modelos de vertedero a estudiar, en concreto para el presente trabajo, todos los modelos resultantes de las variantes de diseño. Se aprecia que para cada modelo existen varias carpetas con elementos del modelo (capas, terreno, celdas) y en concreto una carpeta que contiene las diferentes simulaciones del modelo. Para el presente trabajo esto implica diferentes simulaciones de un modelo para los diferentes escenarios (clima cantábrico o mediterráneo, residuo europeo o americano).

El objetivo que se persigue con la presentación de los tres ejemplos anteriores es, además de documentar visualmente la utilización de Moduelo v4 para el presente trabajo, mostrar como el componente de interface diseñado para la gestión de los datos maestros trata de forma uniforme para el usuario todos y cada uno de los aspectos relativos al modelado y simulación de los vertederos.

Para poder realizar acciones sobre los diferentes elementos del sistema, el usuario solo tiene que hacer click con el botón derecho del ratón sobre cualquiera de los elementos del Explorador (tanto en el árbol como en la vista de detalle). De esta forma aparecerá un menú contextual con las opciones relativas a dicho elemento.

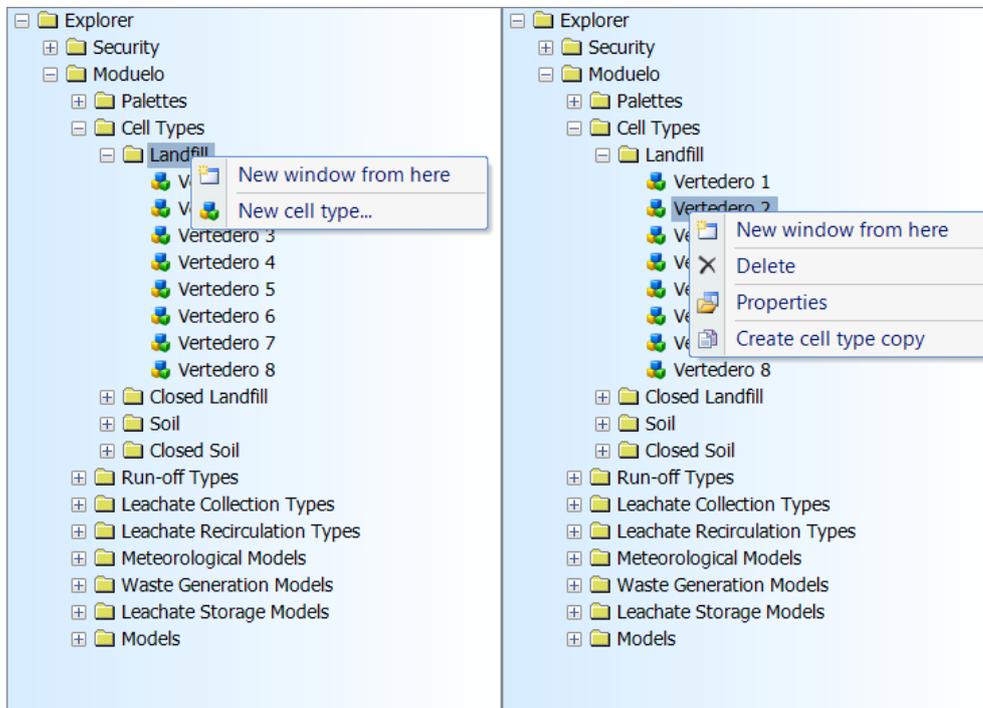


Ilustración 37. Interface de usuario. Menús contextuales. Tipos de celda.

Este mecanismo es simple, genérico e intuitivo para el usuario. De esta forma, si la vinculación de las acciones con los elementos del árbol sigue el sentido común, no es necesario ofrecer a el usuario una formación muy exhaustiva para poder gestionar los datos.

En la Ilustración 37 se presentan los menús contextuales correspondientes al nodo contenedor de tipos de celda vertedero y a un tipo de celda vertedero concreto. Se aprecia que sobre el contenedor aparece la acción de crear un nuevo tipo de celda. En cambio, sobre el tipo de celda concreto aparecen las acciones de borrar ese tipo, acceder a las propiedades del tipo o crear un nuevo tipo como copia de él.

La opción de crear nuevos elementos a partir de otros ya existentes es muy útil, especialmente cuando el elemento tiene muchos atributos. No solo se ahorra trabajo y se aumenta la productividad, sino que se evitan errores cuando se desea crear elementos parecidos. Un ejemplo claro es la generación de variantes de diseño en este trabajo donde existen muchas características comunes y solo alguna diferencia concreta entre unos elementos y otros.

En cualquier nodo del árbol existe también una opción de crear una nueva ventana desde aquí. Esto hace aparecer un nuevo componente equivalente al Explorador pero sin la vista de detalle, que tiene como nodo raíz el nodo sobre el que invocamos la acción. Podemos cambiar el tamaño de dicho componente y situarlo o anclarlo en cualquier lugar del espacio de trabajo para utilizar como origen de operaciones de arrastrar y soltar sobre otros componentes o simplemente para poder acceder a su contenido de forma cómoda. Cuando existen varios componentes además del Explorador, cualquier cambio en cualquiera de ellos se replica automáticamente al resto. Esta funcionalidad es el tipo de requerimiento que pone a prueba el diseño del modelo presentado.

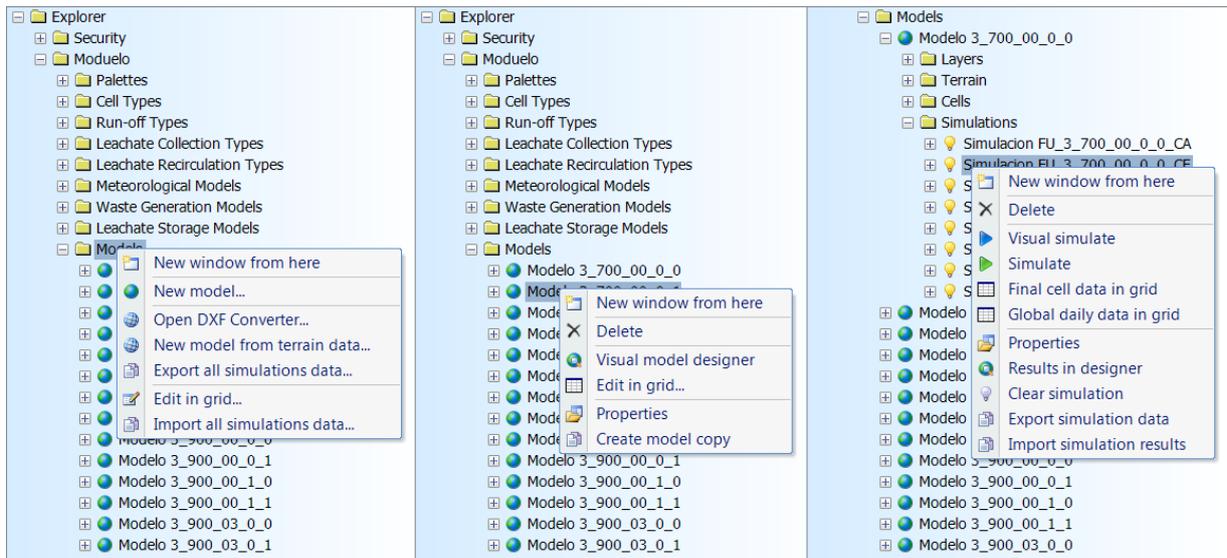


Ilustración 38. Interface de usuario. Menús contextuales. Modelos.

Existen otras acciones que son específicas para elementos concretos. En la Ilustración 38 se presentan los menús contextuales correspondientes a la carpeta contenedora de modelos, a un modelo y a una simulación de un modelo.

En el contenedor de modelos destacan las acciones vinculadas a generar un modelo desde datos de terreno contenidos en ficheros DXF o bien la capacidad de exportar los datos de todas las simulaciones e importar posteriormente los resultados para poder realizar dichas simulaciones en otra plataforma. En este trabajo se ha hecho uso extensivo de estas acciones para poder realizar las simulaciones en el super-computador Altamira según se describe en el apartado correspondiente de esta tesis. En un modelo concreto aparece la opción de editar de forma visual el modelo mediante el diseñador de modelos que se presentará más adelante. Y por último, vinculadas a un elemento simulación están las acciones de simular, simular visualmente, mostrar los resultados en diferentes formatos, etc.

En el CD adjunto a este trabajo, se presenta un video demostrativo de Modulo donde se explica con detalle la interacción del usuario con el programa.

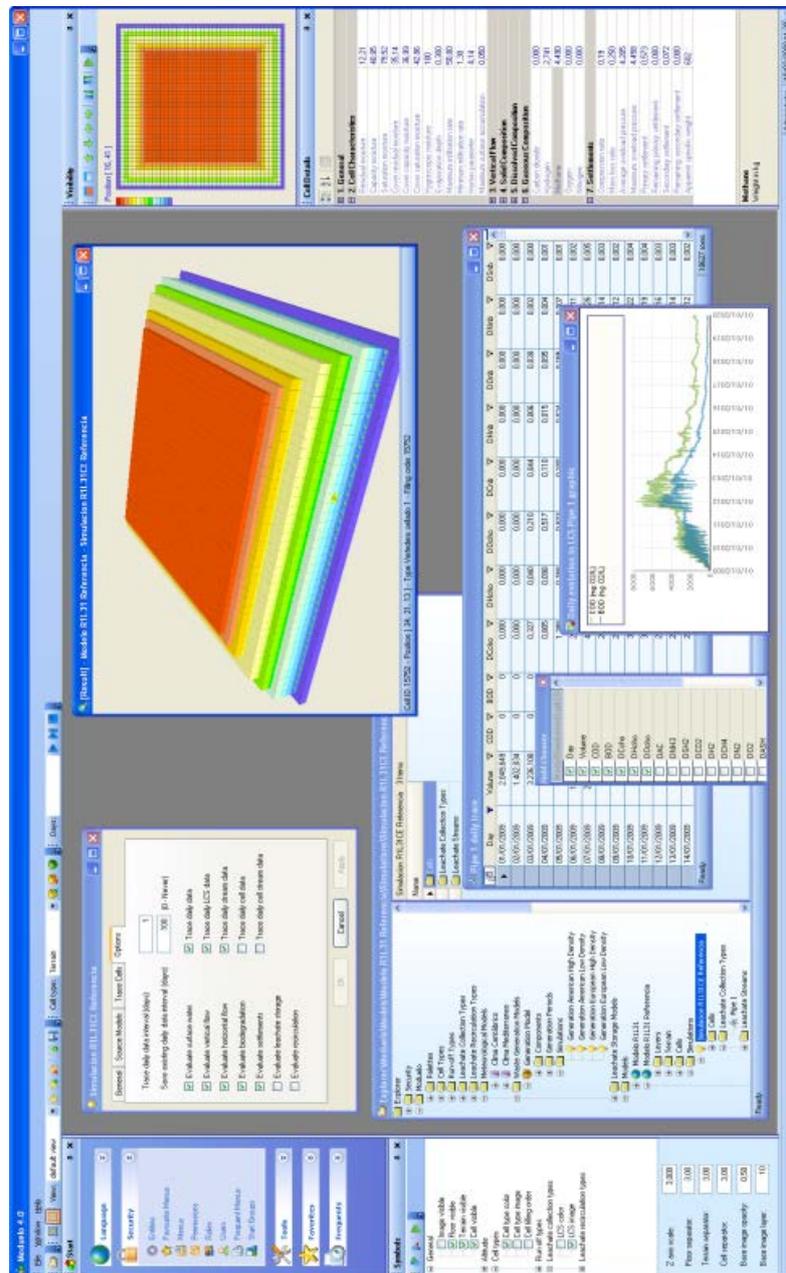


Ilustración 39. Herramienta de simulación Modulo v4.

4.8. Plataforma de simulación

Uno de los retos significativos a los que se enfrenta este trabajo de investigación es la necesidad de realizar un gran número de simulaciones de diferentes modelos. Una simulación típica, con todos los cálculos activados, de un vertedero con 15.000 celdas durante un periodo de 50 años puede tardar unas 14 horas en un procesador de última generación. El programa Moduelo v4 actualmente no soporta procesos de cálculo paralelo (multihilo) y su simulación es secuencial, haciendo uso de un único procesador.

Para la realización de las 768 simulaciones serían necesarias, en una primera aproximación, unas 10.750 horas o 448 días en un ordenador convencional de un solo procesador. Para solucionarlo, se contempla la posibilidad de utilizar el supercomputador Altamira que es uno de los seis nodos que forman parte de la Red Española de Supercomputación y se encuentra situado en la Universidad de Cantabria. Dicho computador, gestionado por el Instituto de Física de Cantabria IFCA (CSIC – UC), cuenta con 512 procesadores. Si bien una única simulación, al no admitir proceso paralelo, no mejoraría sus tiempos de ejecución, si es posible procesar varias simulaciones simultáneamente reduciendo así el tiempo total.

La problemática reside en que el programa Moduelo v4 está desarrollado en la plataforma .Net orientada a entornos Windows y el supercomputador Altamira utiliza el sistema operativo SUSE Linux donde, a priori, no es compatible la ejecución del programa. Además, el gestor de base de datos SQL Server tampoco era compatible con SUSE Linux.

En los últimos años ha surgido con fuerza una iniciativa patrocinada por Novell para implementar, a través de código abierto, el entorno .Net de Microsoft sobre otras plataformas diferentes de Windows, entre ellas SUSE Linux. Dicha iniciativa denominada MONO parece una forma viable de lograr la ejecución de Moduelo en el computador Altamira.

La solución adoptada consiste en extraer el motor de simulación de Moduelo v4 adaptándolo para su ejecución como programa de consola sin interface visual con la posibilidad de entrada de datos iniciales y salida de resultados finales a través de ficheros de texto. A dicho programa de consola lo denominaremos "Moduelo v4 Consola".

En el programa estándar ejecutando en Windows se definen los modelos a simular exportándolos posteriormente a un fichero de texto. Luego se ejecuta el programa de consola en Altamira utilizando como entrada dicho fichero de texto y generando otros ficheros de texto de salida con los resultados. Finalmente se importan los datos a Moduelo v4 en Windows desde los ficheros de texto para su proceso final una vez almacenados en la base de datos SQL Server y utilizando, si fuera necesario, el apoyo de las herramientas visuales de análisis de Moduelo v4. Para que todo ello tenga éxito, es necesario comprobar que la ejecución del programa adaptado Moduelo v4 Consola en Altamira, sobre la plataforma MONO, funciona correctamente.

La metodología utilizada para la adaptación de Moduelo v4 para su ejecución en el supercomputador Altamira tiene las siguientes fases:

- Adaptación de Moduelo v4 para generar ficheros de texto con los datos iniciales de las simulaciones y cargar datos de ficheros de texto con los resultados finales de las mismas.
- Extracción del motor de simulación y adaptación del mismo para poder ejecutarlo como un módulo independiente consistente en una aplicación de consola sin interface visual con entradas y salidas a través de ficheros de texto.
- Pruebas de simulaciones con Moduelo v4 Consola en sistemas operativos Windows validando los resultados de dichas simulaciones.
- Pruebas de simulaciones con Moduelo v4 Consola en una máquina virtual de VMWare con el sistema operativo SUSE Linux validando los resultados y el rendimiento de dichas simulaciones.
- Pruebas de simulaciones en Altamira evaluando los resultados y el rendimiento de las mismas.

Una vez verificado que los resultados de las simulaciones eran idénticos en todas las plataformas (enumeradas en la Tabla 33 se realizó un análisis comparativo de tiempos empleados para una simulación en cada una de ellas según se muestra en la Tabla 34. El test realizado consiste en la simulación de un vertedero compuesto por 15.000 celdas durante un periodo de 9.375 días (unos 25 años).

Plataforma	Procesador	Virtual	Sistema operativo	Framework
MS Visual	Intel Core 2 T7200 2.0 GHz	No	Windows XP	.Net 3.5
MS Console	Intel Core 2 T7200 2.0 GHz	No	Windows XP	.Net 3.5
VMware	Intel Core 2 T7200 2.0 GHz	VMware	OpenSUSE 11.0	Mono 2.0
Altamira	IBM PowerPC 970 FX 2.2 GHz	No	SUSE Linux 2.6.5	Mono 2.0

Tabla 33. Plataformas para tests de rendimiento de las simulaciones.

	MS Visual	MS Console	VMware	Altamira
Tiempo total (horas)	10,5	10,5	16,5	46,5
Segundos/día simulado	4,00	3,99	6,33	17,86

Tabla 34. Resultados de los tests de rendimiento en las plataformas.

‘MS Visual’ representa la ejecución de Moduelo v4 estándar (visual) en un PC con sistema operativo Windows. ‘MS Console’ representa la ejecución del motor de simulación adaptado en modo consola en un PC con sistema operativo Windows. ‘VMware’ representa la ejecución de Moduelo v4 Consola en una máquina virtual con sistema operativo OpenSUSE ejecutando sobre un PC con sistema operativo Windows y Altamira representa la ejecución sobre Altamira.

Si bien es cierto que una única simulación es más rápida en entorno Windows que en el supercomputador Altamira, la capacidad de Altamira de poner en cola y procesar simultáneamente hasta 512 simulaciones hacen de este supercomputador una opción imprescindible para poder realizar la gran cantidad de simulaciones requeridas para este estudio.

Es necesario agradecer al personal del IFCA toda la asesoría y el apoyo que han proporcionado para la adaptación del programa Moduelo v4 a la plataforma de Altamira y para la consecución con éxito de las simulaciones.

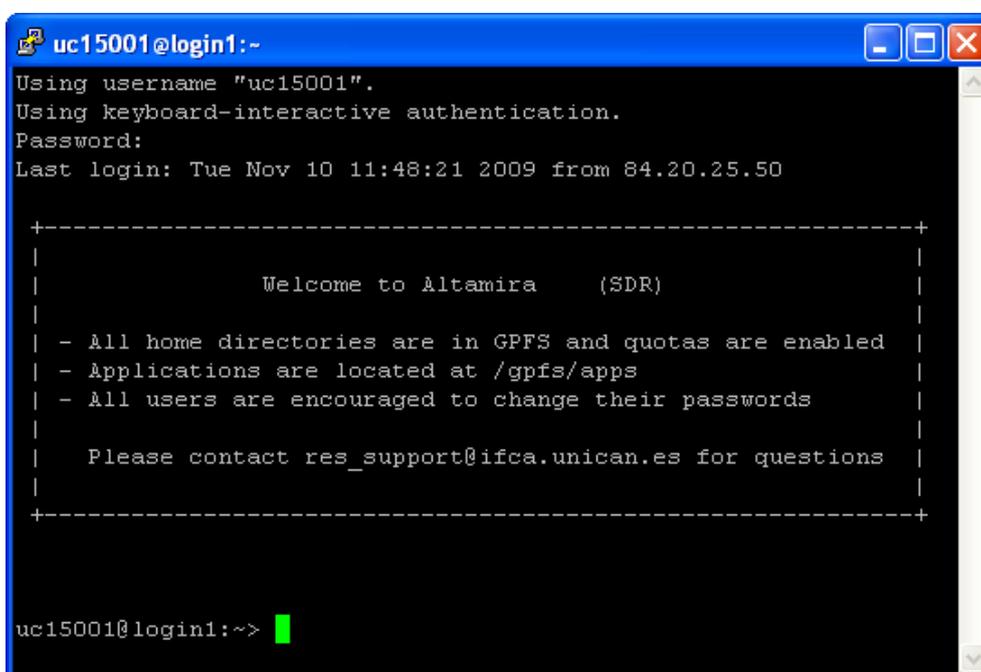


Ilustración 40. Interface de bienvenida al supercomputador Altamira.

Capítulo 5. Análisis de resultados

5.1. Introducción

En el Anexo I se presentan las tablas con todos los resultados de las simulaciones. Cada tabla representa el conjunto de simulaciones correspondiente a un escenario (un tipo de recirculación, un clima y un tipo de residuo). Para cada simulación se muestra el valor de un conjunto de parámetros de control. Las simulaciones de una determinada tabla representan la combinación de las variables de diseño (altura de capa, densidad, cobertura, aislamiento y sellado) según se refleja en su nombre con el formato: capa_densidad_cobertura_aislamiento_sellado.

En el Anexo II se presentan los modelos de regresión lineal múltiple que se han obtenido para cada uno de los parámetros de control. En cada modelo se presentan los coeficientes de la ecuación de regresión estimada: el coeficiente constante y los coeficientes para cada una de las variables de diseño. Así mismo se incluyen el coeficiente de determinación r^2 , el error estándar s y la probabilidad “*alfa*” como indicadores de la bondad del ajuste del modelo.

Se ha decidido crear un conjunto de modelos de regresión para los escenarios en los que no se realiza recirculación y otro segundo conjunto de modelos para incluir también los escenarios en los que se realiza recirculación.

En los escenarios sin recirculación, se han generado modelos para todos los parámetros de control. En los escenarios con recirculación, se han omitido los parámetros de control relativos a la cantidad y calidad del lixiviado emitido. Al comparar modelos sin recirculación y con recirculación no es equivalente el concepto de lixiviados emitidos ya que en el caso de recirculación, estos lixiviados se vuelven a introducir en el vertedero creando un circuito, mientras que en el caso sin recirculación éstos salen directamente del sistema.

Para los modelos sin recirculación, se normalizaron los datos en el ámbito del escenario contemplado, es decir, para un determinado clima y tipo de residuo. A continuación, se generaron los modelos de regresión en ese ámbito. Se puede afirmar que tanto las simulaciones como el análisis de los datos en un escenario son completamente independientes al de otro escenario. Esto permite, además de sacar las conclusiones correspondientes sobre el comportamiento de las variables de diseño en cada escenario, verificar que no se han cometido errores en el proceso para ninguno de los escenarios (al cotejar los resultados en cada uno de ellos).

A la hora de normalizar el valor de los parámetros de control, para todos se calculó de forma inversa (mejor cuanto más pequeño) excepto el metano y la energía generados y los asentamientos mínimo, máximo, medio y medio durante la explotación que se calcularon de forma directa (mejor cuanto más grande). Asumiendo que se desea aprovechar la energía generada por el biogás, se interpreta que cuanto más metano y más energía mejor. Respecto a los asentamientos, se interpreta que cuanto mayores sean éstos durante la explotación y posclausura del vertedero, menores serán en el futuro, ya que se habrán compactado y estabilizado los residuos. En cualquier caso, la normalización directa o inversa no va a afectar al análisis cuantitativo de la influencia de las variables de diseño, sino en todo caso al signo del mismo.

En cuanto a los escenarios con recirculación, la normalización y los modelos de regresión se crearon también en el ámbito del escenario (para cada combinación de clima y de tipo de residuo). La recirculación se incorporó en los modelos de regresión como dos variables predictoras adicionales: Recirculación por riego superficial (Riego) y recirculación por pozos (Pozos). Cada una de estas dos variables, una vez normalizadas, puede tener el valor de 0 (No) o 1 (Sí).

En el cálculo de los modelos de regresión para los escenarios con recirculación, se omitieron las simulaciones que teniendo recirculación por riego superficial, tienen también aislamiento superficial durante la explotación, ya que dicha combinación no tiene sentido. Se han simulado los modelos por simetría y consistencia pero no es adecuado incluir los resultados en el cálculo de los modelos de regresión.

Un primer análisis indica qué parámetros de control se pueden ajustar correctamente con el modelo de regresión lineal y cuáles no. El motivo por el cual algunos no se ajustan puede ser que existan otros factores distintos de las variables predictoras utilizadas (variables de diseño) que influyen en el parámetro de control, que un modelo lineal no es el adecuado para modelizar la influencia de las variables predictoras en esos parámetros y/o que existan errores en el cálculo de dichos parámetros.

En el análisis de resultados no se tendrán en cuenta los parámetros de control con un bajo coeficiente de determinación. Puede ser objeto de otro estudio más detallado el motivo por el cual se produce dicho desajuste. En cualquier caso, para cada efecto a estudiar (cantidad de lixiviados, calidad del lixiviado, asentamientos, etc.) se han definido inicialmente varios parámetros, de forma que el hecho de prescindir de alguno de ellos no interfiera en el análisis de resultados. Se podría haber optado por eliminarlos por completo de este estudio, pero se ha preferido dejar constancia de su presencia y de su falta de ajuste como guía para posteriores trabajos.

	Coeficiente de determinación				Error estándar			
	CE	CA	ME	MA	CE	CA	ME	MA
VTotal	0,98	0,98	0,96	0,96	0,05	0,05	0,07	0,07
VTotalExp	0,97	0,98	0,95	0,96	0,07	0,06	0,08	0,07
VTotalPos	0,99	1,00	0,90	0,98	0,04	0,02	0,11	0,05
VMaxDia	0,92	0,91	0,99	0,93	0,09	0,10	0,04	0,07
VMaxMes	0,89	0,88	0,92	0,90	0,12	0,12	0,09	0,12
CODTotal	0,92	0,90	0,93	0,92	0,10	0,10	0,08	0,08
CODTotalExp	0,97	0,96	0,93	0,94	0,08	0,08	0,10	0,09
CODTotalPos	0,85	0,86	0,66	0,81	0,13	0,13	0,16	0,13
CODMaxMes	0,90	0,93	0,96	0,92	0,11	0,09	0,07	0,09
NH4Total	0,89	0,89	0,90	0,91	0,11	0,12	0,10	0,09
NH4TotalExp	0,95	0,94	0,92	0,93	0,08	0,08	0,10	0,09
NH4TotalPos	0,85	0,86	0,66	0,81	0,13	0,13	0,15	0,14
NH4MaxMes	0,86	0,90	0,95	0,92	0,12	0,11	0,08	0,09
CH4Generado	0,96	0,95	0,99	0,97	0,06	0,09	0,04	0,07
EnergiaTotal	0,86	0,97	0,81	0,99	0,16	0,07	0,19	0,06
MinSett	0,97	0,95	0,97	0,95	0,06	0,07	0,06	0,07
MaxSett	0,97	0,95	0,96	0,95	0,06	0,07	0,06	0,07
AvgSett	0,97	0,95	0,97	0,95	0,06	0,07	0,06	0,07
AvgSettExp	0,97	0,96	0,97	0,96	0,06	0,07	0,06	0,07
SolidCarExp	0,98	0,95	0,98	0,97	0,05	0,08	0,04	0,07
TotalCarExp	0,98	0,95	0,98	0,97	0,05	0,08	0,04	0,07
SolidCarPos	0,91	0,90	0,96	0,95	0,09	0,11	0,07	0,09
TotalCarPos	0,91	0,90	0,96	0,95	0,09	0,11	0,07	0,09
HumedadMax	0,91	0,94	0,93	0,94	0,10	0,09	0,09	0,09
HumedadFinal	0,94	0,94	0,94	0,95	0,08	0,09	0,09	0,09
CODMaxConMes	0,59	0,86	0,56	0,87	0,18	0,12	0,16	0,11
NH4MaxConMes	0,59	0,85	0,58	0,86	0,18	0,12	0,16	0,11
CH4Residual	0,60	0,72	0,69	0,86	0,18	0,15	0,16	0,14
DiffSett	0,58	0,56	0,34	0,50	0,19	0,18	0,22	0,20
FinalCellNH4	0,73	0,67	0,92	0,92	0,17	0,20	0,11	0,11

Tabla 35. Coeficientes de determinación y errores estándar de los modelos de regresión.

En la Tabla 35 se presentan, a modo de resumen, los coeficientes de determinación y los errores estándar de los modelos de regresión para los casos sin recirculación. Se presentan de forma independiente para cada uno de los escenarios CE, CA, ME, MA donde C es clima cantábrico, M clima mediterráneo, E residuo tipo europeo y A residuo tipo americano.

Los cinco últimos parámetros de control se descartan del análisis por su bajo coeficiente de determinación.

En la Tabla 36 se presentan, a modo de resumen, los coeficientes de regresión para las variables de diseño altura de capa, grado de compactación y presencia o no de cobertura. Dichos coeficientes se han calculado para cada uno de los parámetros de control distinguiendo entre los diferentes escenarios. Aunque existen coeficientes de regresión en todas las celdas de la tabla, se han omitido por claridad aquellos que son significativamente despreciables. La relación completa de todos ellos se puede encontrar en el Anexo II.

En la Tabla 37 se presentan a su vez los coeficientes de regresión para las variables de diseño aislamiento superficial durante la explotación y sellado posclausura.

En la discusión posterior sobre los resultados se hará referencia a los coeficientes de regresión recogidos en estas tablas.

Por último, en el Anexo III se presentan los árboles de decisión generados para cada uno de los parámetros de control. Igual que en el caso de la regresión, se han generado para el conjunto de datos sin recirculación. En ellos se ha incluido el clima y el tipo de residuo como dos atributos de entrada más, de forma que puedan analizarse la variación del efecto de las variables de diseño para diferente clima y tipo de residuo.

	Capa				Densidad				Cobertura			
	CE	CA	ME	MA	CE	CA	ME	MA	CE	CA	ME	MA
VTotal							-0,09		0,17	0,16	0,28	0,27
VTotalExp							-0,10		0,18	0,19	0,27	0,28
VTotalPos									0,09	0,06	0,29	0,21
VMaxDia	-0,18	-0,15	0,05	0,19	-0,25	-0,19	-0,60	-0,19	0,11	0,09	0,12	0,29
VMaxMes	-0,16	-0,14	-0,25	-0,29	-0,13		-0,24				0,12	0,14
CODTotal			0,11	0,14	-0,19	-0,17	-0,28	-0,21		-0,14		-0,14
CODTotalExp		0,09	0,10	0,14	-0,19	-0,16	-0,27	-0,20		-0,10		-0,11
CODTotalPos							-0,18	-0,14				
CODMaxMes			0,09	0,13	-0,20	-0,14	-0,26	-0,15	-0,12	-0,26		-0,26
NH4Total			0,12	0,15	-0,16	-0,14	-0,26	-0,17	-0,12	-0,23		-0,22
NH4TotalExp		0,11	0,10	0,15	-0,16	-0,12	-0,23	-0,15	-0,08	-0,21		-0,22
NH4TotalPos							-0,18	-0,13		-0,12		-0,13
NH4MaxMes			0,10	0,16	-0,17	-0,10	-0,25	-0,13	-0,18	-0,34		-0,33
CH4Generado					0,18		0,24		0,52	0,67	0,58	0,77
EnergiaTotal					0,23		0,30		0,67	0,82	0,63	0,87
MinSett	-0,39	-0,40	-0,40	-0,43	-0,43	-0,39	-0,43	-0,41	-0,14		-0,13	
MaxSett	-0,39	-0,40	-0,40	-0,43	-0,43	-0,39	-0,43	-0,40	-0,14		-0,13	
AvgSett	-0,39	-0,40	-0,40	-0,43	-0,43	-0,39	-0,43	-0,41	-0,14		-0,13	
AvgSettExp	-0,39	-0,42	-0,40	-0,43	-0,42	-0,41	-0,42	-0,41	-0,16		-0,15	
SolidCarExp	-0,11	-0,09	-0,12	-0,10	0,21	0,11	0,23	0,11	0,43	0,58	0,47	0,64
TotalCarExp	-0,11	-0,09	-0,12	-0,10	0,20	0,11	0,23	0,11	0,43	0,58	0,47	0,64
SolidCarPos	-0,08	-0,07	-0,10	-0,08	0,15	0,14	0,19	0,15	0,44	0,53	0,54	0,66
TotalCarPos	-0,08	-0,07	-0,10	-0,08	0,15	0,14	0,19	0,15	0,44	0,53	0,54	0,65
HumedadMax					0,24	0,25	0,26	0,27	-0,48	-0,57	-0,53	-0,60
HumedadFinal					0,21	0,21	0,22	0,22	-0,53	-0,61	-0,58	-0,64

Tabla 36. Coeficientes de regresión destacados para las variables de diseño capa, densidad y cobertura.

	Aislamiento				Sellado			
	CE	CA	ME	MA	CE	CA	ME	MA
VTotal	0,57	0,56	0,52	0,52	0,18	0,18	0,09	0,10
VTotalExp	0,69	0,69	0,59	0,59				
VTotalPos	0,09	0,04	0,18	0,07	0,81	0,88	0,49	0,66
VMaxDia	0,43	0,49	0,21	0,26				
VMaxMes	0,56	0,57	0,43	0,57				
CODTotal	0,35	0,32	0,43	0,36	0,40	0,40	0,19	0,22
CODTotalExp	0,70	0,65	0,61	0,56				
CODTotalPos	-0,16	-0,17			0,52	0,53	0,34	0,44
CODMaxMes	0,50	0,53	0,54	0,44	0,12	0,07		
NH4Total	0,25	0,21	0,38	0,30	0,46	0,47	0,21	0,24
NH4TotalExp	0,65	0,57	0,57	0,50				
NH4TotalPos	-0,15	-0,16			0,51	0,54	0,34	0,44
NH4MaxMes	0,45	0,45	0,50	0,40	0,17	0,10		
CH4Generado					-0,16	-0,12	-0,08	-0,06
EnergiaTotal	-0,13		-0,11					
MinSett								
MaxSett								
AvgSett								
AvgSettExp								
SolidCarExp	-0,32	-0,23	-0,26	-0,16				
TotalCarExp	-0,32	-0,23	-0,26	-0,16				
SolidCarPos	-0,11	-0,10	-0,11	-0,08	-0,24	-0,21	-0,12	-0,09
TotalCarPos	-0,11	-0,10	-0,11	-0,08	-0,24	-0,21	-0,12	-0,09
HumedadMax								
HumedadFinal					0,16	0,12	0,12	0,08

Tabla 37. Coeficientes de regresión destacados para las variables de diseño aislamiento y sellado.

5.2. Análisis de los parámetros de control

5.2.1. Cantidad de lixiviado

Para ilustrar y poder contrastar los resultados de la regresión lineal y de los árboles de decisión, se presenta en la Ilustración 41 la evolución de la suma anual del volumen total de lixiviados recogidos por el sistema de drenaje medidos en m^3 . Se presentan cuatro gráficas, todas ellas para casos sin recirculación, con altura de capa de 3 m y densidad de compactación del residuo de 700 kg/m^3 . Las dos de arriba corresponden a clima cantábrico y las dos de abajo a clima mediterráneo. Las dos de la izquierda a residuo de tipo europeo y las dos de la derecha a residuo de tipo americano. En cada gráfica se presenta el caso base (sin cobertura ni aislamiento ni sellado), el caso con sólo cobertura, el caso con sólo aislamiento, el caso con sólo sellado y por último el caso que incluye todos ellos. La línea vertical de color gris en cada gráfica indica la separación entre el periodo de explotación y el periodo posclausura.

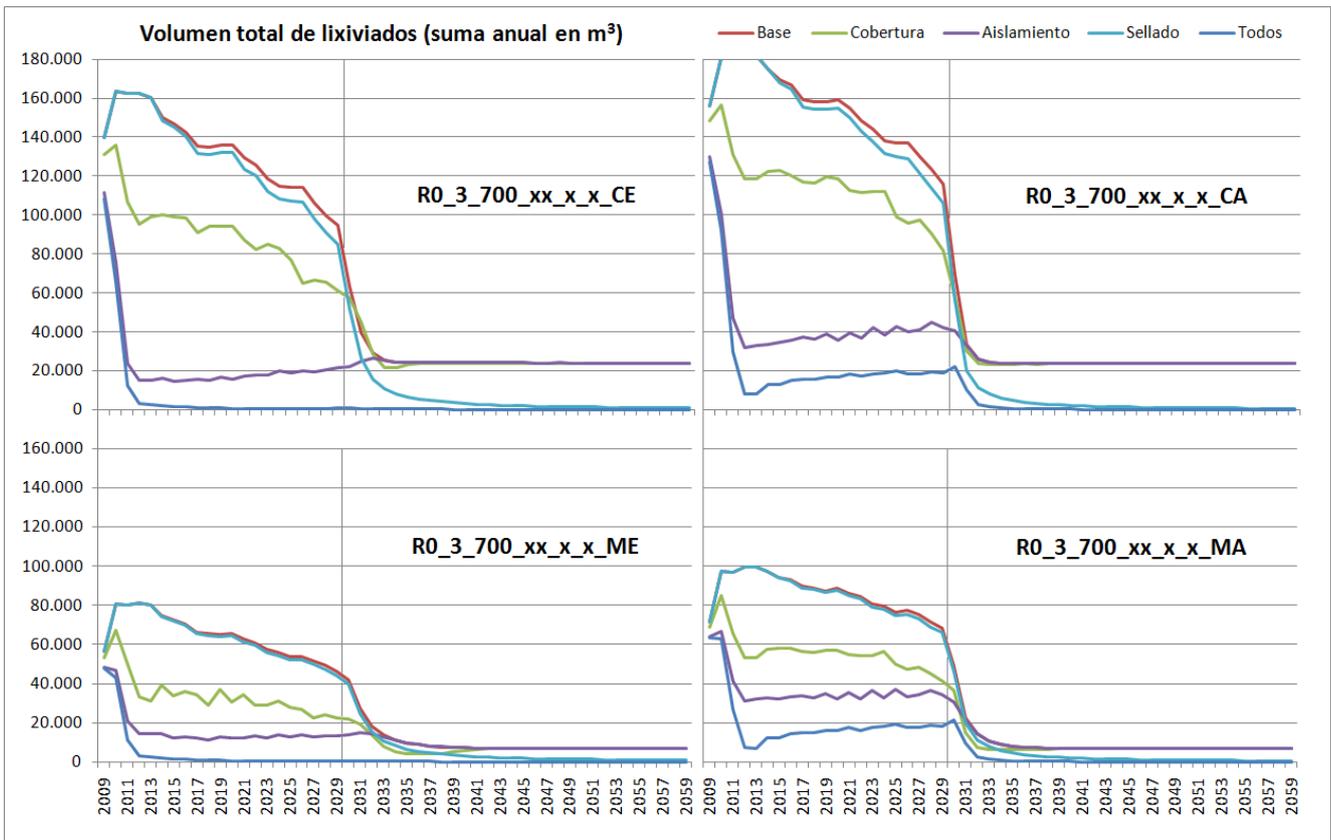


Ilustración 41. Evolución del volumen total de lixiviados emitidos.

Existe un fenómeno no deseado que es necesario tener en cuenta a la hora de analizar los datos sobre cantidad de lixiviados emitidos. Se ha contabilizado la cantidad de lixiviados emitidos desde el primer día del periodo de explotación del vertedero. La base del vertedero es una capa drenante y la siguiente capa (primera capa de residuo sobre la capa drenante) no termina de colocarse hasta entre 2 y 4 años después del inicio de la explotación (según la morfología correspondiente). Durante este tiempo, la precipitación que cae sobre la parte descubierta de la capa drenante pasa directamente a los sistemas de recolección de lixiviados. Este efecto se puede apreciar claramente en la Ilustración 41, principalmente en los casos donde existe aislamiento superficial (línea morada), donde al principio existe una gran emisión de lixiviados que disminuye rápidamente pasando a estabilizarse en los primeros años. Dado que en el ejemplo propuesto existe aislamiento superficial sobre el residuo, la única justificación para ese incremento de lixiviados es la infiltración de precipitación que se produce directamente sobre la capa drenante.

Este es un efecto importante en vertederos reales. Por eso se tiende a separar la zona de explotación del resto del vaso de vertido, de manera que la lluvia que caiga sobre la zona no explotada pueda evacuarse independientemente del agua que pasa a través del residuo en la zona en explotación. Si no se hace así, los volúmenes de agua se incrementan mucho y con ellos el coste de explotación del vertedero.

Este efecto se podría haber evitado contabilizando el lixiviado a partir del cuarto año de explotación o bien impermeabilizando la capa drenante hasta el momento de colocar el lixiviado a la hora de definir el modelo. Dado que el efecto está localizado y se produce de forma similar en todas las simulaciones se puede considerar que no altera de forma significativa el resultado del análisis. En cualquier caso, se tendrá en cuenta a la hora de analizar los datos.

Otro efecto que llama la atención es la ligera diferencia que existe en la Ilustración 41 entre la línea roja (caso base) y la línea azul claro (sellado posclausura) durante el periodo de explotación. Parece razonable pensar que el sellado posclausura (sea impermeable o semipermeable) no tiene ningún efecto en el volumen de lixiviados durante la explotación. Realmente se produce el efecto por el orden de llenado del vertedero que se ha definido en el modelo (Ver Ilustración 4). Cuando se termina de colocar una capa de residuo, se procede a colocar un sellado en el perímetro sobre la capa inferior (zona de talud), para lograr una superficie plana en el vertedero. De esta forma podemos considerar que el talud se va sellando a medida que se rellena el vertedero y no al final. Esto origina la ligera diferencia entre el caso base y el de sellado posclausura impermeable durante el periodo de explotación.

5.2.1.1. Cantidad de lixiviado durante el periodo de explotación

Durante el periodo de explotación, la variable más importante es el aislamiento superficial. Con aislamiento superficial la emisión de lixiviados es mucho menor. Esto se aprecia en los altos coeficientes de regresión obtenidos, 0,59 para clima mediterráneo y 0,69 para clima cantábrico y también en el árbol de decisión (Ilustración 42) donde es la primera variable en importancia (nivel uno del árbol).

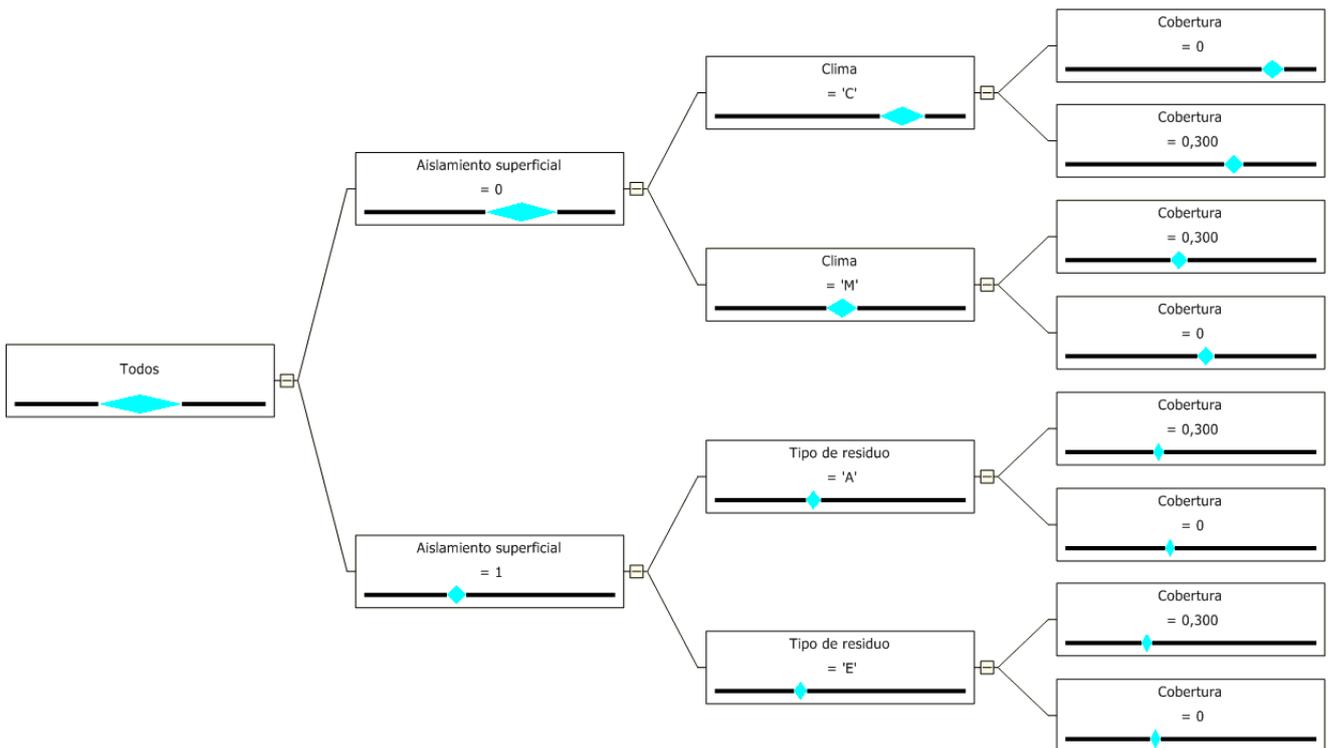


Ilustración 42. Árbol de decisión VTtotalExp.

Cuando existe aislamiento superficial, el tipo de residuo juega un papel importante ya que al no existir infiltración superficial de precipitación, la emisión de lixiviados depende principalmente de la humedad que tiene el residuo. El residuo americano es más húmedo que el europeo y por lo tanto origina un mayor caudal de lixiviados. Este efecto se puede observar en la Ilustración 41 con la línea morada (aislamiento) comparando los gráficos de la izquierda (residuo europeo) y los de la derecha (residuo americano).

Cuando no existe aislamiento superficial existe una mayor variabilidad en los casos según se aprecia en el nodo del árbol. El clima adquiere una especial importancia dado que la infiltración superficial es un factor más decisivo que la humedad del tipo de residuo. En clima cantábrico el volumen de lixiviados es mucho mayor que en clima mediterráneo. Este efecto se puede observar en la Ilustración 41 con la línea roja (base) comparando los gráficos superiores (clima cantábrico) e inferiores (clima mediterráneo).

La cobertura, después del aislamiento superficial, es la otra variable que influye apreciablemente en el volumen de lixiviados durante la explotación, reduciéndolos (coeficientes de regresión de 0,18 a 0,28 y presencia en todo el tercer nivel del árbol de decisión).

Cuando no existe aislamiento superficial, la presencia de cobertura juega un doble efecto de aislamiento parcial superficial (reduciendo la infiltración superficial) y de retén del flujo vertical (almacenando más humedad en el interior del vertedero) consiguiendo reducir la generación de lixiviados.

Cuando existe aislamiento superficial aparece también el efecto de la cobertura según se puede ver en el ramal correspondiente del árbol de decisión. Esto se debe al efecto de retén comentado: la cobertura actúa como freno en el flujo vertical dentro del vertedero y no permite que la humedad del residuo llegue a los sistemas de recolección de lixiviados quedando almacenada en su interior.

Este efecto es uno de los motivos principales por los que hoy en día se buscan materiales alternativos para la cobertura intermedia como se puede ver en (Haughey 2001). Al suponer un impedimento para la transmisión vertical del agua, las coberturas poco permeables pueden crear “niveles freáticos locales” o “acuíferos colgados” en las capas del vertedero que acaban saliendo al exterior como filtraciones laterales, difíciles de controlar. Por otro lado también potencian este freno al flujo aumentando la sobrecarga de los residuos, y reduciendo así su permeabilidad (Pacey, y otros 1999).

En la Ilustración 41 se pueden constatar todos estos fenómenos y en particular este último. Vemos la diferencia entre la línea morada (solo aislamiento) y la línea azul oscuro (todos) que implica aislamiento + cobertura. Esa diferencia indica el efecto de la cobertura cuando hay aislamiento. También es destacable la apenas existencia de lixiviados con aislamiento + cobertura cuando el residuo es de tipo europeo (gráficas de la izquierda) mientras que sí existe una cierta emisión con residuo de tipo americano (gráficas de la derecha). Este efecto queda recogido en el árbol de decisión, aunque no con la intensidad real que tiene, ya que la mayor cantidad de lixiviados en los primeros años debido a la capa drenante, amortigua el hecho de que apenas exista emisión de lixiviados con aislamiento + cobertura y residuo europeo (Ver diamante representativo de media y variabilidad en los nodos tipo de residuo = 'A' y tipo de residuo = 'E' en la Ilustración 42; no se aprecia gran diferencia en los valores).

Los coeficientes de regresión de la cobertura para el clima cantábrico son de 0,16 y 0,17 mientras que para el clima mediterráneo son de 0,27 y 0,28. Esta diferencia se debe, según se observa en la Ilustración 41, a que los efectos de la cobertura de aislamiento y retención de humedad son más pronunciados en el clima mediterráneo donde las precipitaciones son más bajas. Se aprecia en la gráfica que en el clima mediterráneo la cobertura, por sí sola, logra reducir el volumen de lixiviados casi en la mitad para residuo europeo y en un tercio para residuo americano. Mientras que en el clima cantábrico la reducción proporcionalmente es menor.

5.2.1.2. Cantidad de lixiviado durante el periodo posclausura

Durante el periodo posclausura, como era de esperar, la variable más importante es el sellado posclausura (permeable o semipermeable). Con sellado posclausura impermeable la emisión de lixiviados es significativamente menor. Esto se aprecia en los altos coeficientes de regresión 0,49 a 0,81 y también en el árbol de decisión, donde es la primera variable en importancia (nivel uno del árbol).

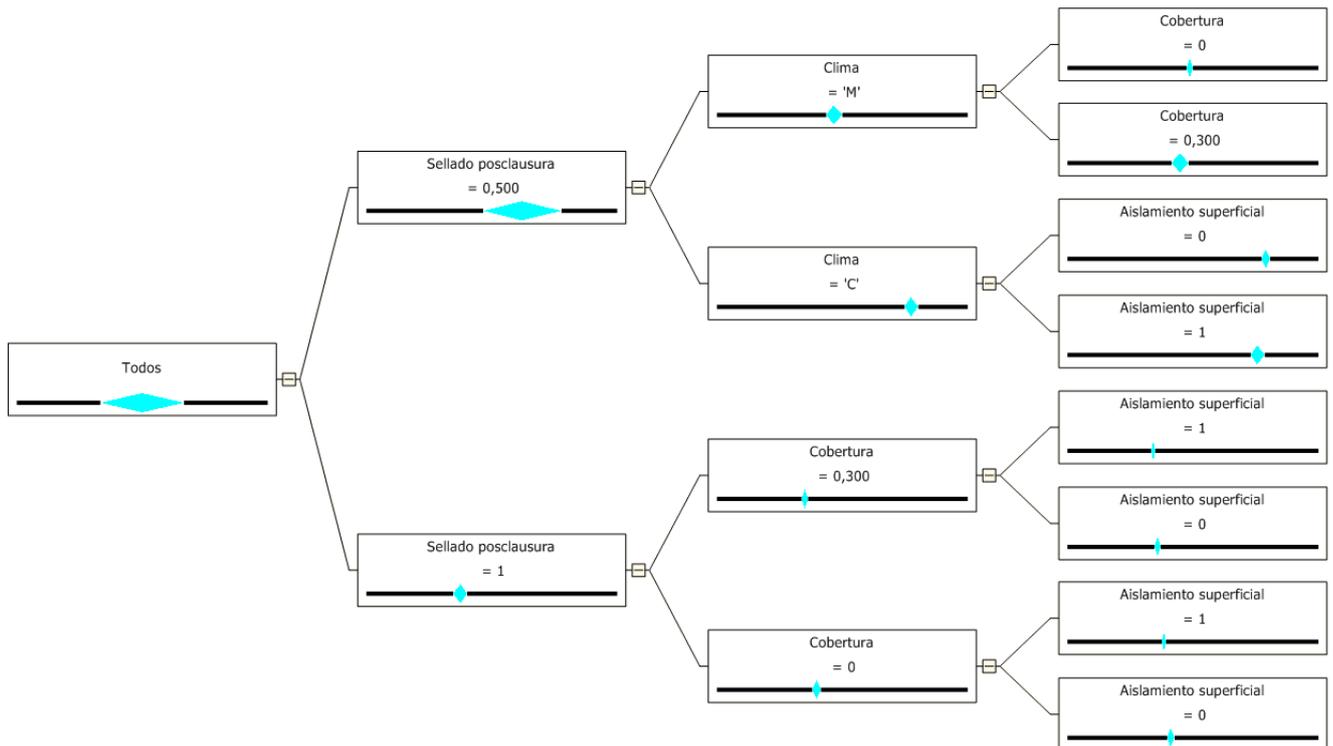


Ilustración 43. Árbol de decisión VTotalPos.

Sellado impermeable.

Cuando existe sellado posclausura impermeable, no se producen infiltraciones de precipitación en el periodo de posclausura. En esta situación la generación de lixiviados en dicho periodo viene condicionada parcialmente por lo que ocurre en el periodo de explotación. Si existió aislamiento superficial en el periodo de explotación, el vertedero retuvo menos humedad y el punto de partida en cuanto a generación de lixiviados en el periodo posclausura es menor que si no hubiera existido aislamiento superficial. Este efecto es más claro para residuos de tipo europeo que aportan poca humedad frente a residuos americanos que se colocan más húmedos. Pero en cualquier caso, el efecto del aislamiento en explotación se extiende sólo a los primeros años (entre dos y cuatro) del periodo posclausura.

Después de éstos, la evolución de la generación de lixiviados converge con el caso en el cual no hubo aislamiento durante la explotación.

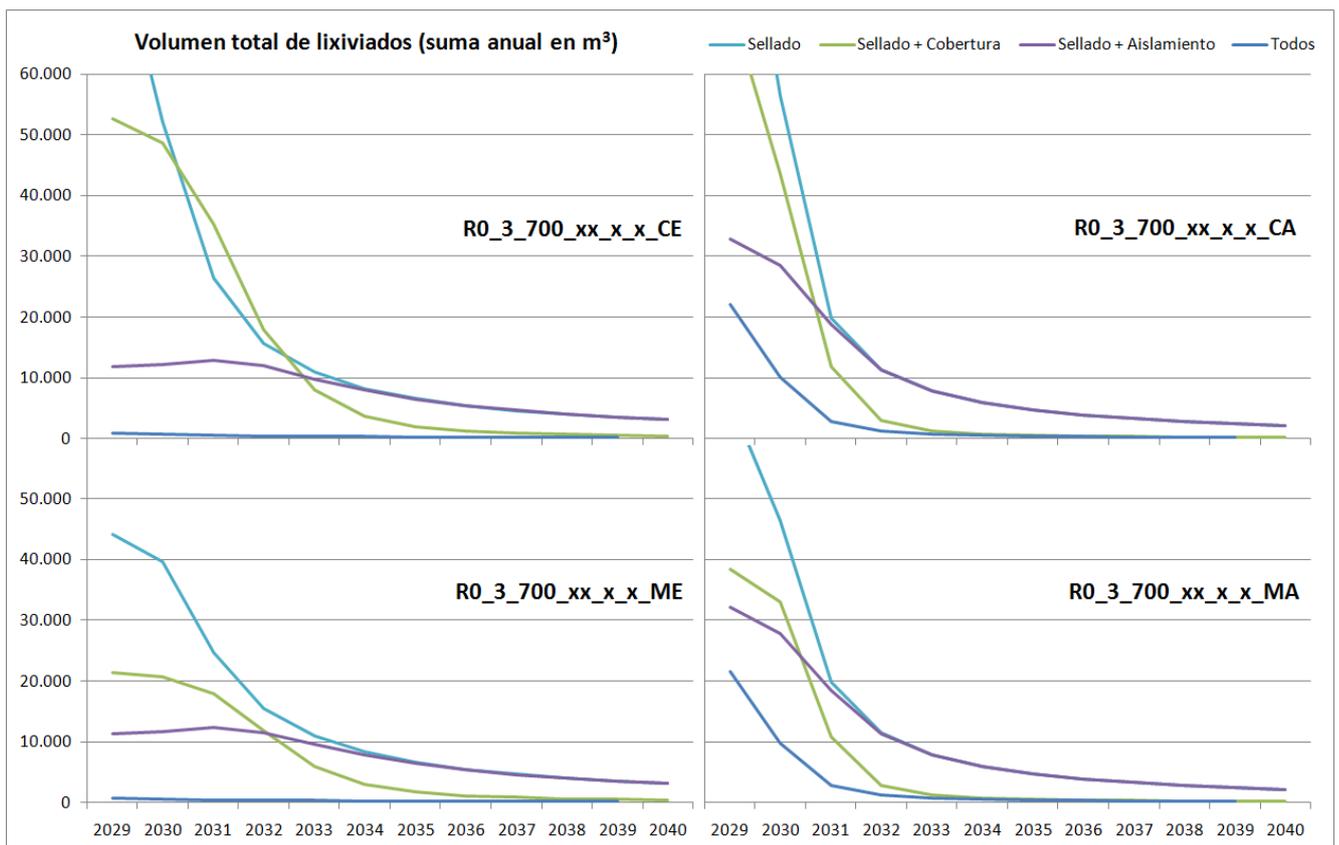


Ilustración 44. Evolución del volumen total de lixiviados emitidos en el periodo de posclausura.

En la Ilustración 44 se representa, para cada uno de los escenarios (combinación de clima y tipo de residuo), la evolución anual del volumen total de lixiviados en el periodo de posclausura para diferentes casos. Se puede analizar el efecto del aislamiento comparando las líneas de color azul claro (sellado) y morado (sellado + aislamiento).

Según el árbol de decisión, para el caso de sellado impermeable en el periodo de posclausura, el siguiente factor en importancia es la cobertura, antes que el aislamiento durante la explotación. La pequeña variabilidad que presenta dicho nodo del árbol (en contraposición con el nodo de sellado semipermeable) implica que las diferencias no son grandes en valor absoluto. Pero en cambio sí lo son en su evolución en el tiempo según vamos a ver a continuación.

El efecto de la cobertura durante el periodo de explotación también afecta al periodo posclausura. La cobertura ejerce el efecto de retención de humedad y esto origina que el punto de partida de la generación de lixiviados sea menor que si no existe cobertura. Este efecto es más significativo en clima mediterráneo que en clima cantábrico y en residuo europeo que en residuo americano. Esto indica, como habíamos visto antes, que cuanto menor sea la humedad que entra en juego, mayor es proporcionalmente el efecto de la cobertura.

No obstante, la cobertura ejerce su principal efecto durante el periodo de posclausura, reduciendo la generación de lixiviados (reteniendo la humedad en el vertedero) de forma que prácticamente llega a desaparecer el caudal de lixiviados a partir del octavo año para residuo de tipo europeo y del cuarto año para residuos de tipo americano.

Esta diferencia en el comportamiento de los residuos de tipo europeo y americano en presencia de cobertura, está relacionada con la mayor degradación de estos últimos. Varios autores (Powrie, Beaven y Hudson 2005) y (Hossain, Penmethsa y Hoyos 2009) observaron experimentalmente la relación entre la degradación de los residuos, su densidad y su permeabilidad: cuando se degrada el residuo, este se compacta reduciéndose su porosidad y su conductividad hidráulica. En Moduelo estos fenómenos se simulan por combinación de los modelos que interrelacionan pérdida de masa por degradación con asentamiento y densidad con permeabilidad.

Otros autores también han observado el efecto de reducción de la conductividad hidráulica con la compactación del residuo, que reduce asimismo la porosidad (Staub, y otros 2009). Sin embargo este último efecto (reducción de la porosidad), puede aumentar el flujo de agua, pues aumenta el grado de saturación del residuo para un mismo contenido de humedad. En los casos en los que existe una capa de cobertura intermedia, este aumento del grado de saturación incrementa la columna de agua sobre la misma facilitando los flujos.

Por tanto, la influencia global de la degradación en el movimiento del agua depende del balance entre los efectos de disminución de la conductividad hidráulica y la porosidad. Es uno de los temas pendientes para optimizar la explotación de vertederos (Reinhart, McCreanor y Townsend 2002).

El efecto de la cobertura se puede analizar en la Ilustración 44 mediante la línea verde (sellado + cobertura) comparándola con la de azul claro (solo sellado) y con la morada (sellado + aislamiento).

Sellado semipermeable.

Cuando no hay sellado impermeable, durante todo el periodo de posclausura existen unas ciertas filtraciones superficiales de precipitación. En este caso el clima es un factor determinante, según se puede apreciar en el ramal correspondiente del árbol de decisión. Este hecho provoca la gran variabilidad que hay en el nodo de sellado semipermeable. Para clima cantábrico el volumen de lixiviados es mucho mayor que para clima mediterráneo.

En esta situación, se discrimina claramente cuál es la segunda variable más importante. Para el clima cantábrico el aislamiento y para el clima mediterráneo la cobertura. Los efectos de ambas variables ya se han discutido anteriormente y se pueden analizar en la Ilustración 44. El efecto de la cobertura es mayor proporcionalmente en clima mediterráneo, según se aprecia en las gráficas superiores (cantábrico) e inferiores (mediterráneo).

Los coeficientes de regresión permiten sacar conclusiones generales sobre las variables de diseño. No hacen distinciones entre los casos con sellado posclausura permeable o impermeable. Pero, aun así, confirman que el efecto de la cobertura "en general" es mayor que el del aislamiento (coeficientes para el aislamiento entre 0,04 y 0,18 y para la cobertura entre 0,06 y 0,29). También confirman que el efecto de la cobertura es proporcionalmente mucho mayor en clima mediterráneo (0,27 y 0,28 para clima mediterráneo y 0,18 y 0,19 para clima cantábrico). Y por último, que la primera variable de diseño en importancia para este caso, el sellado posclausura, es especialmente importante en clima cantábrico (coeficientes 0,81 y 0,88) y significativo, pero en otro orden de magnitud, en clima mediterráneo (coeficientes 0,49 y 0,66).

5.2.1.3. Cantidad de lixiviado total

La cantidad de lixiviados total es la agregación de los lixiviados durante el periodo de explotación más los lixiviados durante el periodo posclausura. Desde este punto de vista los efectos de las variables de diseño son los explicados en los apartados anteriores. Estos efectos dependen de la proporción del volumen de cada uno de los periodos en el total. Claramente es mayor el volumen de lixiviados durante la explotación, según se aprecia en la Ilustración 41.

Según los coeficientes de regresión la variable de diseño más importante es el aislamiento superficial en explotación con unos coeficientes de 0,52 a 0,57, seguida por la cobertura con coeficientes 0,16 a 0,28 y por último el sellado posclausura con coeficientes de 0,09 a 0,18. La cobertura tiene una mayor influencia en clima mediterráneo (0,27 y 0,28) que en cantábrico (0,16 y 0,17) y el sellado una mayor influencia en clima cantábrico (0,18) que en mediterráneo (0,09 y 0,10).

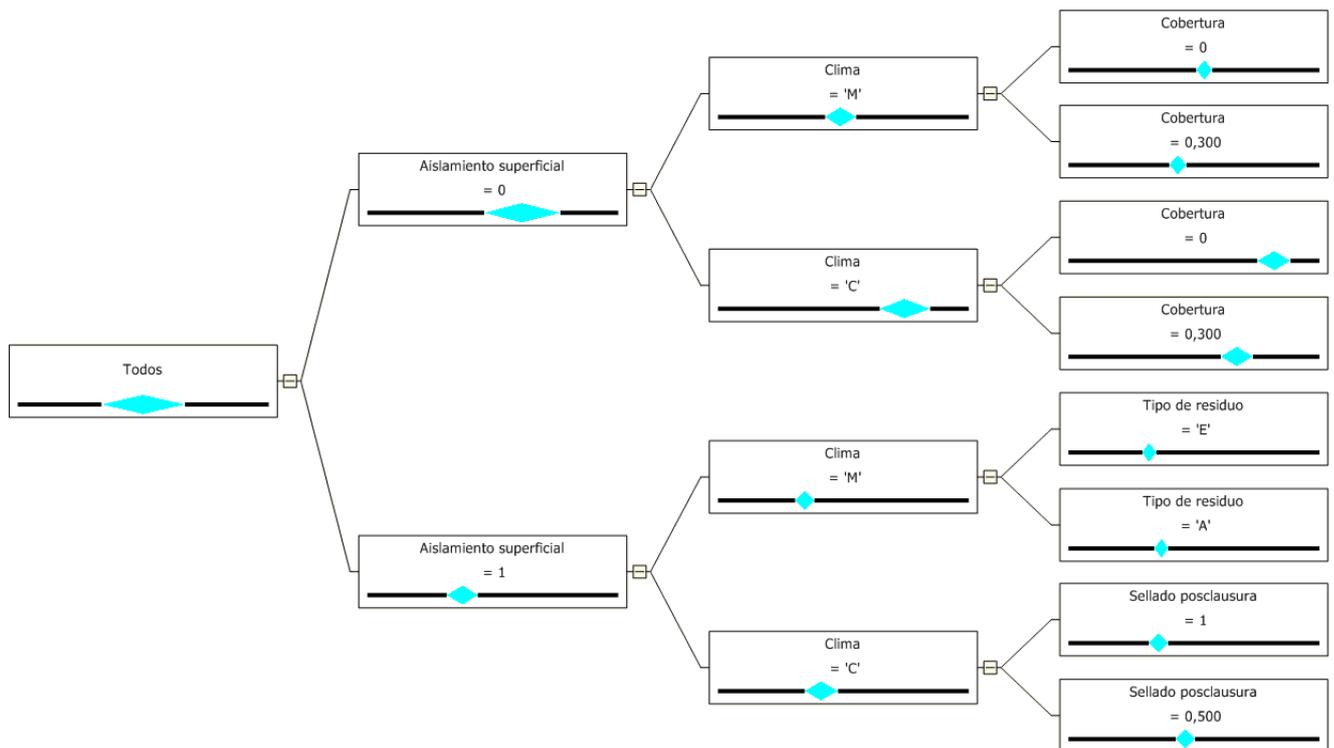


Ilustración 45. Árbol de decisión VTotal.

El árbol de decisión de la Ilustración 45 coincide con las conclusiones de los coeficientes de regresión pero aporta otros matices. En el primer nivel del árbol vemos que la variable principal es el aislamiento superficial. Con aislamiento menor volumen de lixiviados y menor variabilidad de los casos incluidos.

En el segundo nivel del árbol aparece el clima como segundo factor en importancia. Con clima mediterráneo, menor volumen de lixiviados. El efecto del clima es mucho más pronunciado cuando no existe aislamiento superficial.

En el tercer nivel del árbol, en los casos con aislamiento superficial, el tipo de clima discrimina cuál es el siguiente factor en importancia. Cuando el clima es cantábrico y existen más precipitaciones, el siguiente factor es el sellado posclausura impermeable que evite las infiltraciones superficiales. Cuando el clima es mediterráneo, el siguiente factor es el tipo de residuo. Al existir pocas precipitaciones cobra mayor importancia la humedad que pueda aportar el residuo de tipo europeo o americano que el sellado posclausura.

En el tercer nivel del árbol, en los casos sin aislamiento superficial, la siguiente variable de diseño en importancia es la cobertura, por encima del sellado posclausura. La posición de los diamantes en el árbol (su centro se ubica en el valor medio de los casos para el nodo) indica que la influencia de la cobertura es mayor para el clima cantábrico que para el mediterráneo. Y ello entra aparentemente en contradicción con los coeficientes de regresión que son mayores para la cobertura en el clima mediterráneo. Lo que ocurre, según se puede apreciar en la Ilustración 41, es que la diferencia en valor absoluto (de cuanto existe cobertura a cuando no existe) es mayor en el clima cantábrico, mientras que si ponderamos dicha diferencia con el total, es decir, la influencia proporcional de la cobertura, ésta es mayor en el clima mediterráneo.

El árbol de decisión maneja valores absolutos mientras que el modelo de regresión, que se ha calculado para cada escenario, describe la importancia relativa de cada variable de diseño dentro de ese escenario.

En cualquier caso se aprecia la coherencia de la estructura del árbol de decisión y la coincidencia de ambos sistemas de análisis en las conclusiones principales.

5.2.1.4. Volumen máximo diario y mensual de lixiviado

Dentro de los parámetros de control seleccionados para analizar la cantidad de lixiviados emitidos por los sistemas de drenaje, los tres primeros (VTotal, VTotalExp y VTotalPos) se utilizan para cuantificar los valores totales de lixiviados emitidos. Se crearon otros dos parámetros con el objetivo de medir la variabilidad de la cantidad de lixiviados emitidos a lo largo del tiempo. Estos parámetros son el volumen máximo diario (VMaxDia) y volumen máximo mensual (VMaxMes). La intención era cuantificar de alguna forma los máximos que se producen en la generación de lixiviados para poder dimensionar los sistemas necesarios para su transporte, almacenamiento, tratamiento, etc. Para el diseño del vertedero, es mejor cuanto menores sean esos máximos y también es mejor, cuanto menor sea la variabilidad de la generación de lixiviados. Si la variabilidad es grande, es necesario dimensionar los sistemas para los máximos aun cuando durante parte del tiempo estén funcionando con poco volumen de lixiviados. Si la variabilidad es pequeña, el dimensionamiento es más eficiente ya que puede obtenerse, al trabajar en condiciones constantes, un mejor rendimiento de las instalaciones.

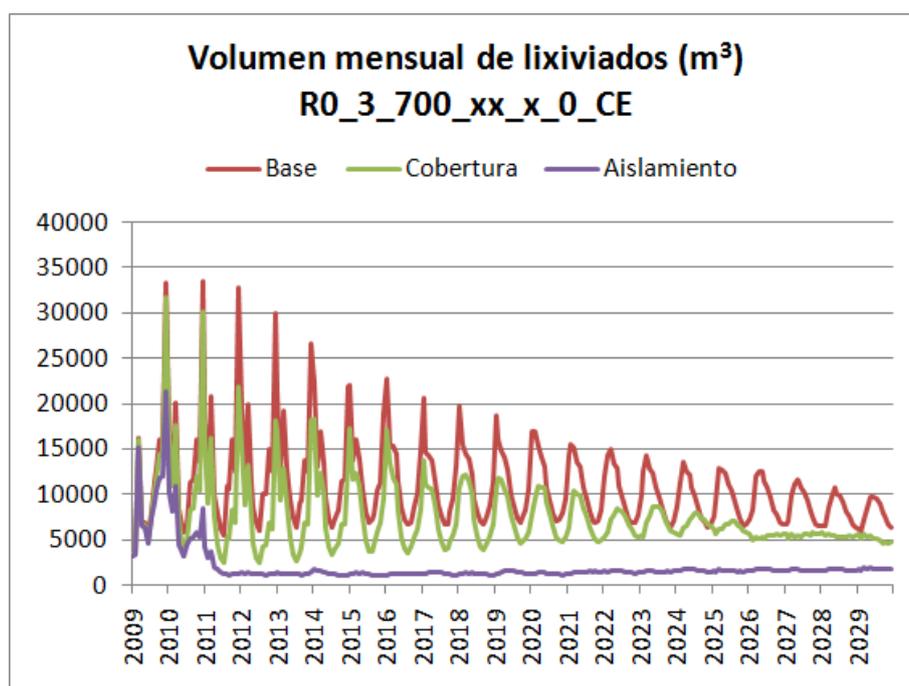


Ilustración 46. Evolución del volumen mensual de lixiviados.

A la vista de los resultados, la selección de estos parámetros de diseño no fue muy acertada. Debido al efecto en los primeros años de la capa drenante sin aislamiento que se ha comentado anteriormente, los máximos tanto diario como mensual se obtienen al principio del periodo de explotación, según se puede apreciar en la Ilustración 46.

En esa fase inicial, el máximo se obtiene debido a la infiltración directa de la precipitación en la capa drenante y a la transmisión de la humedad del residuo colocado también directamente sobre la capa drenante. Por ello, las variables de diseño del vertedero que se desean analizar, no tienen una influencia clara y directa sobre esos máximos que permita estudiar el flujo de lixiviados desde el punto de vista de la variabilidad, que es el objetivo que se perseguía.

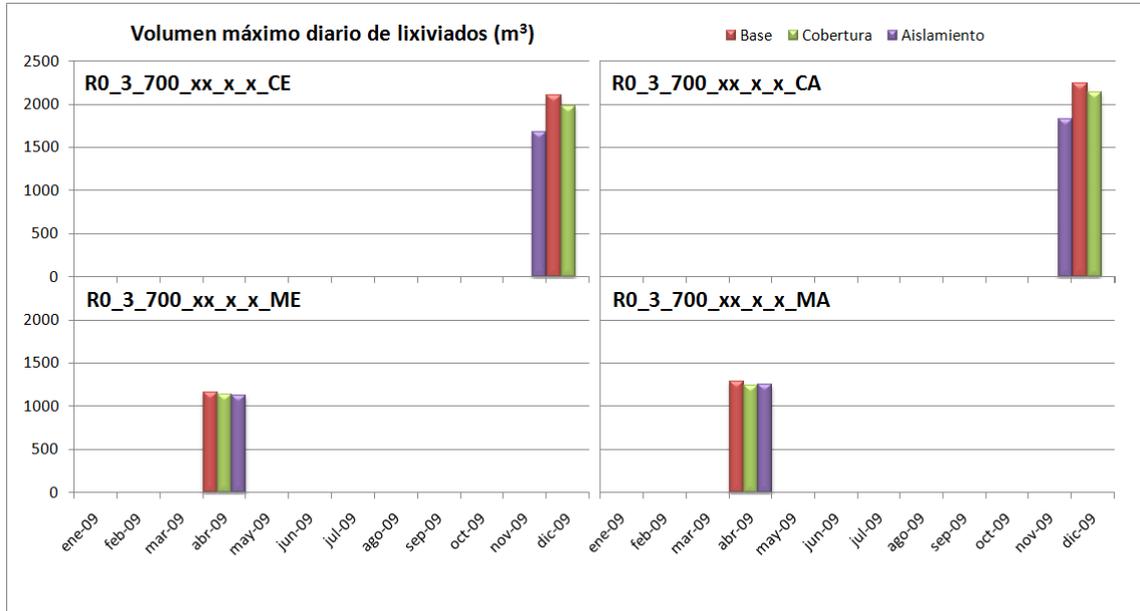


Ilustración 47. Volumen máximo diario de lixiviados.

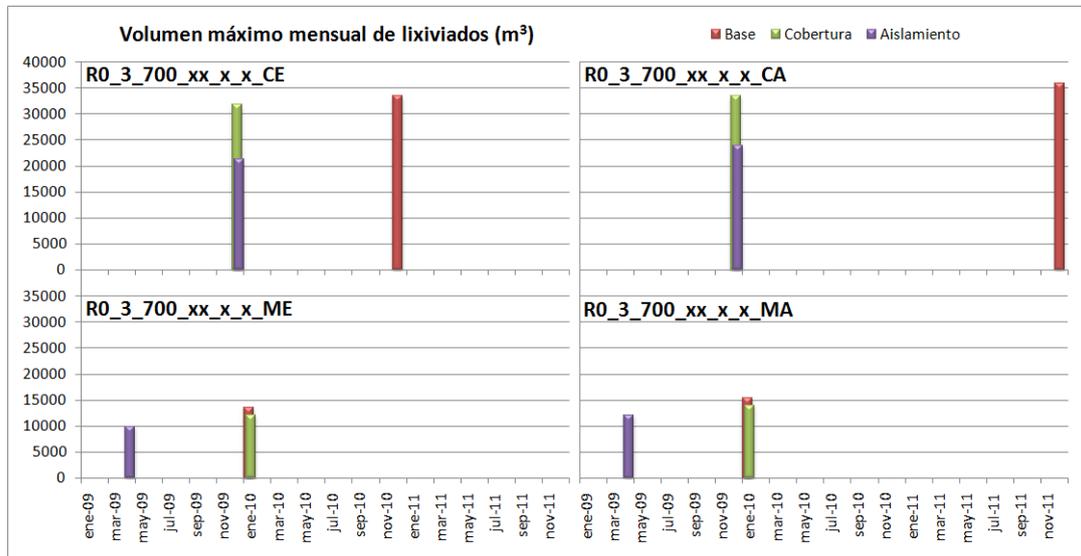


Ilustración 48. Volumen máximo mensual de lixiviados.

En la Ilustración 47 podemos apreciar cómo el volumen máximo diario de lixiviados se produce dentro del primer año para cualquier escenario (clima y tipo de residuo). También se puede apreciar la poca o nula influencia de los parámetros de diseño tanto en el momento en que se produce como en su cuantía. Así mismo, en la Ilustración 48 se ha representado la fecha y cuantía del volumen máximo mensual de lixiviados. Se observa que para todos los escenarios se produce dentro de los tres primeros años, periodo en el cual aún no se ha rellenado la primera capa de residuos y la capa de drenaje está parcialmente descubierta.

Estas razones muestran la poca utilidad de los parámetros de control seleccionados a la hora de evaluar la variabilidad en la emisión de lixiviados. Sería más adecuada la utilización de estadísticos del tipo desviación estándar o varianza, pero con la precaución de desestimar los datos de los cuatro primeros años para desterrar el efecto de la capa drenante sin aislamiento.

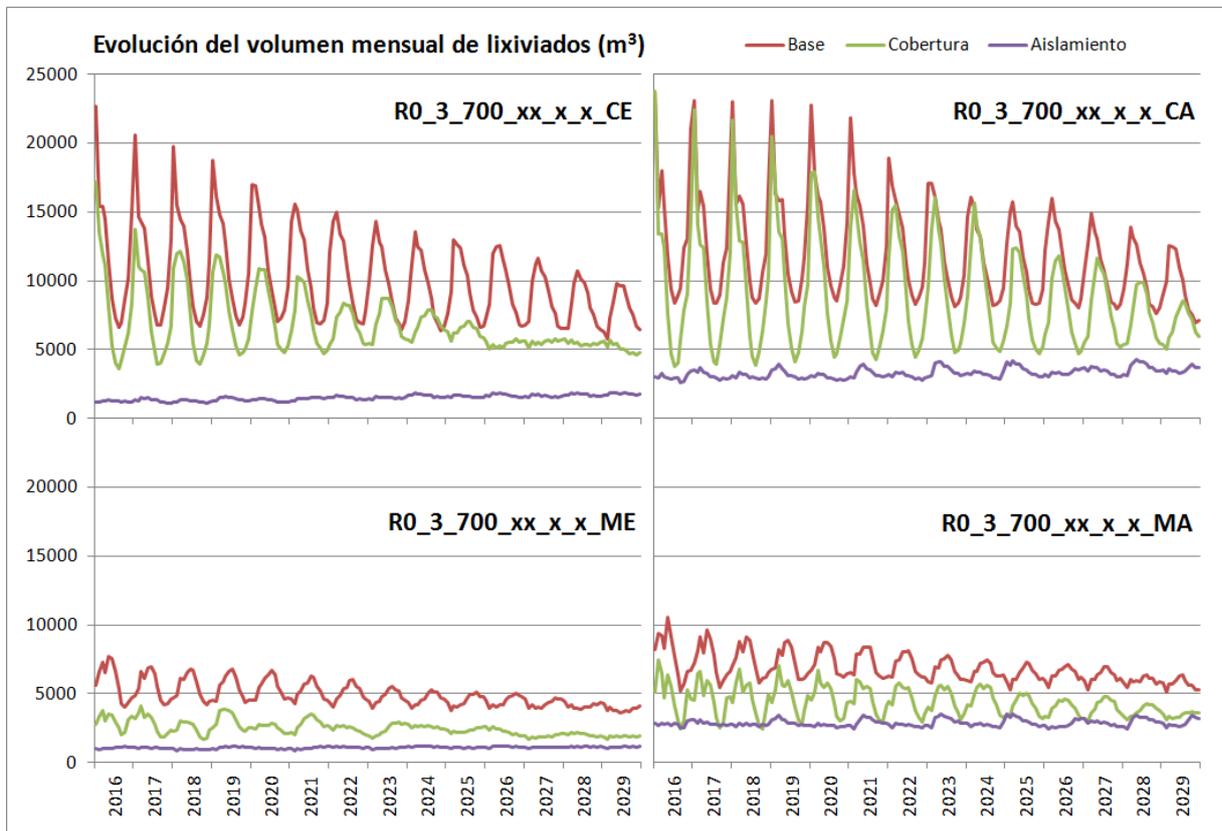


Ilustración 49. Evolución del volumen mensual de lixiviados según escenarios.

Si bien se deja para estudios posteriores la obtención de un parámetro de control adecuado para medir la variabilidad en la emisión de lixiviados, se representa, en la Ilustración 49, la evolución del volumen mensual de lixiviados en el periodo de explotación. En dicho gráfico se han omitido los primeros años del periodo donde aún no se ha colocado la primera capa de residuos.

En el gráfico se observa, en primer lugar, que la variabilidad es mucho menor en clima mediterráneo que en cantábrico y también es menor con residuo europeo que americano. También se observa, como es lógico, que con aislamiento superficial la variabilidad prácticamente desaparece. Sólo es ligeramente apreciable con residuo americano. Esa ligera variabilidad con aislamiento superficial se debe a la secuencia de llenado del vertedero. El periodo de los máximos de cresta es aproximadamente de dos años, lo cual coincide con el periodo de relleno de cada capa que también es aproximadamente de dos años según se aprecia en la Ilustración 9.

Pero el efecto más interesante es el de la cobertura. Con un residuo tipo europeo, la cobertura disminuye apreciablemente la variabilidad de la emisión de lixiviados. Mientras que con un residuo de tipo americano la incrementa apreciablemente, especialmente en clima cantábrico.

El residuo americano se degrada más que el residuo europeo originando los efectos comentados anteriormente (ver apartado 5.2.1.2). Cuando existe un gran flujo vertical de humedad en las épocas más lluviosas, el residuo americano más degradado facilita ese flujo creando sobre la cobertura una mayor altura de saturación de humedad. Gracias a esa altura de saturación el agua es capaz de atravesar la cobertura con mayor facilidad. En cambio, el residuo europeo menos degradado, dificulta la transmisión de humedad y potencia el efecto de la cobertura de retención de lixiviados alargando en el tiempo su evacuación. En épocas más secas, con el residuo americano se ha evacuado ya la mayor parte del lixiviado y el flujo disminuye considerablemente. En cambio, con residuo europeo, siendo más lenta la evacuación del agua, se amortigua el descenso de emisión de lixiviados.

Un efecto equivalente es el de añadir más capas de residuo y cobertura entre la superficie del vertedero que recibe la infiltración por precipitaciones y la capa drenante que capta los lixiviados. Así se observa que en cada uno de los dos casos (tanto residuo de tipo europeo como americano) se amortigua con el tiempo la variabilidad de lixiviados emitidos. Llegando incluso a ser prácticamente constante en el caso de residuo europeo con cobertura durante los últimos cuatro años.

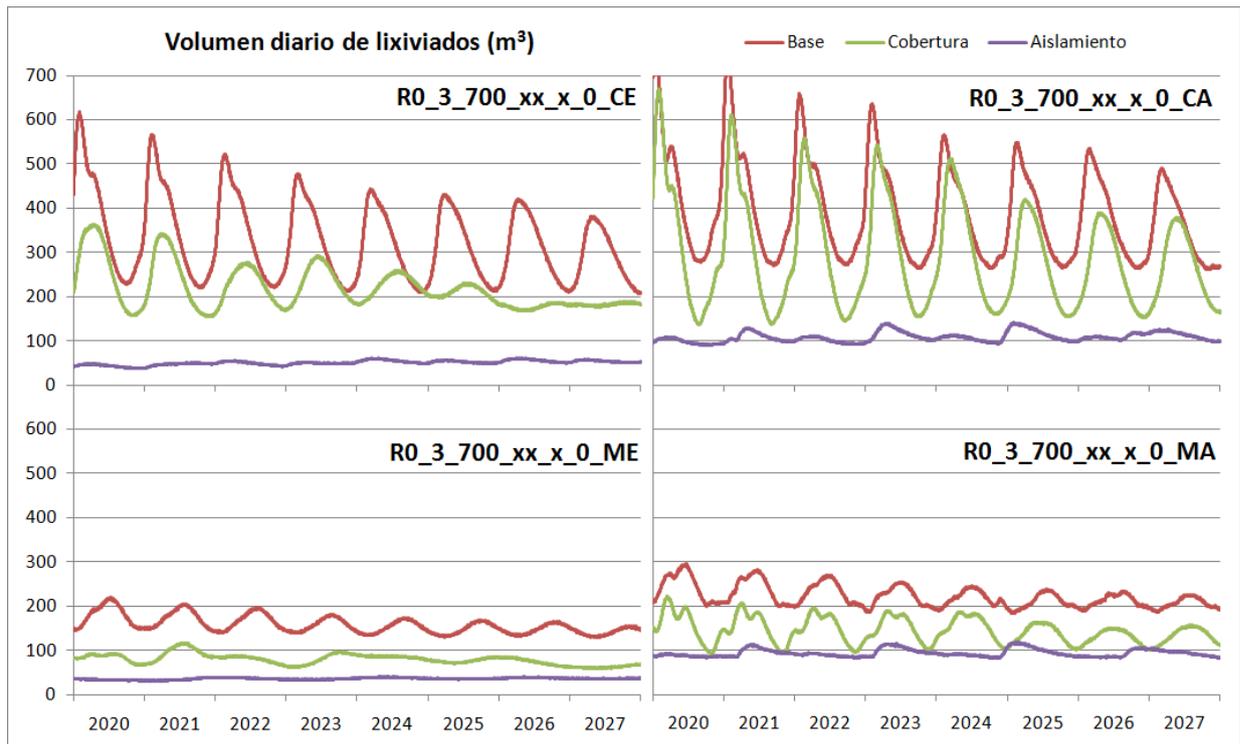


Ilustración 50. Evolución del volumen diario de lixiviados.

Por último, se presenta en la Ilustración 50 la evolución diaria de lixiviados emitidos en los diferentes escenarios para los casos sin cobertura ni aislamiento (base), sólo con cobertura y sólo con aislamiento. Este gráfico sirve para ilustrar de nuevo el efecto de la cobertura de disminuir la variabilidad del lixiviado emitido con residuo de tipo europeo. La cobertura disminuye el volumen de lixiviado emitido, y actúa como freno al flujo vertical disminuyendo también la variabilidad en el flujo.

5.2.2. Cantidad de agua en el vertedero

En este apartado se pretende analizar la cantidad de agua total presente en el vertedero. La cantidad de agua presente en el vertedero puede influenciar la estabilidad del mismo, por lo que resulta interesante evaluar qué variables de diseño afectan a los máximos de agua que se obtienen a lo largo de su vida útil. Así mismo, el análisis de la cantidad de agua que el vertedero es capaz de retener puede ayudar en la comprensión de otros fenómenos que están vinculados a la humedad como la degradación, la generación de energía o los asientos.

Se han creado dos parámetros de control dentro de este apartado: la cantidad de agua máxima presente en el vertedero a lo largo de los periodos de explotación y posclausura (HumedadMax) y la cantidad final de agua presente en el vertedero al final del periodo de posclausura (HumedadFinal).

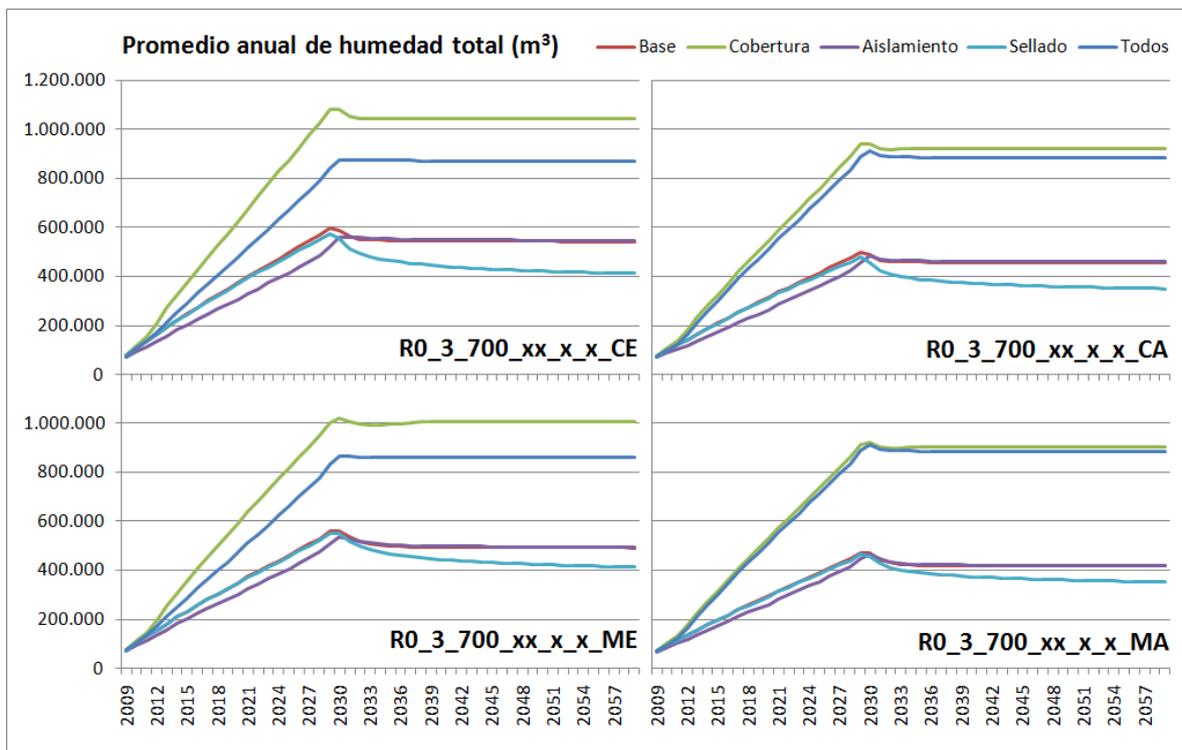


Ilustración 51. Evolución de la humedad total presente en el vertedero.

Antes de iniciar el análisis de los dos parámetros de control se presenta, en la Ilustración 51 la evolución del total de humedad contenida en el vertedero a lo largo del tiempo. Se han tomado los valores promedio anuales de humedad total en el vertedero. Se representan, para cada uno de los escenarios, el caso base (sin cobertura ni aislamiento ni sellado), el caso con sólo cobertura, con sólo aislamiento, con sólo sellado y el caso que incluye a todos ellos.

En los gráficos se aprecia un patrón común. En el periodo de explotación, a medida que llega residuo a vertedero, la humedad del mismo va creciendo con una pendiente constante. El máximo de humedad se alcanza al final del periodo de explotación. Al inicio del periodo de posclausura puede existir un ligero descenso de la humedad hasta alcanzar un nivel constante que se mantendrá durante dicho periodo. En caso de sellado posclausura sin cobertura, cuesta más alcanzar dicho equilibrio y existe un descenso que se va atenuando a lo largo del periodo de posclausura.

La primera apreciación es la poca influencia relativa que tiene el aislamiento en el total de humedad cuando no existe cobertura. Se puede deducir por la diferencia entre la línea roja (base) y la línea morada (solo aislamiento). Esto implica que la humedad presente en el residuo tiene más trascendencia que la humedad procedente de la infiltración superficial en cuanto a la humedad total del vertedero. Este hecho se puede también contrastar con la poca diferencia existente entre la línea roja (base) en las gráficas superiores correspondientes a clima cantábrico y las inferiores correspondientes a clima mediterráneo.

El siguiente factor a destacar es la gran influencia que presenta la cobertura en la humedad retenida por el vertedero, hecho que se constata en todos los escenarios mediante la línea verde (cobertura) respecto a la roja (base).

En cuanto al tipo de residuo, se puede comprobar cómo con el residuo de tipo europeo (gráficas de la izquierda) se retiene más humedad que con el residuo de tipo americano (gráficas de la derecha). Esto se debe a una mayor degradación del residuo americano que da lugar a una menor porosidad.

Por último, constatar que con el residuo de tipo europeo, el efecto de retención de agua por parte de la cobertura se incrementa cuando existe infiltración (no hay aislamiento ni sellado posclausura). Esto no ocurre tanto con el residuo de tipo americano porque facilita el flujo a través de la cobertura, tal y como se ha descrito en el apartado 5.2.1.2. Dicho fenómeno se puede observar comparando las líneas verdes (cobertura) y líneas azul oscuro (todos) de las gráficas de la izquierda frente a las de la gráfica de la derecha.

5.2.2.1. Cantidad máxima de agua

Los coeficientes de regresión indican que la variable de diseño más influyente es la cobertura con unos valores entre -0,53 y -0,64. El signo negativo muestra que la presencia de cobertura es negativa para el máximo de agua, es decir, que con cobertura se alcanzan máximos mayores y por consiguiente un mayor riesgo de inestabilidad del vertedero. La segunda variable en importancia es la densidad de compactación del residuo, con unos coeficientes de regresión de entre 0,24 y 0,27. Esto indica que a mayores densidades se obtienen menores máximos de humedad. El resto de variables de diseño no parece afectar significativamente a los máximos de humedad en el vertedero.

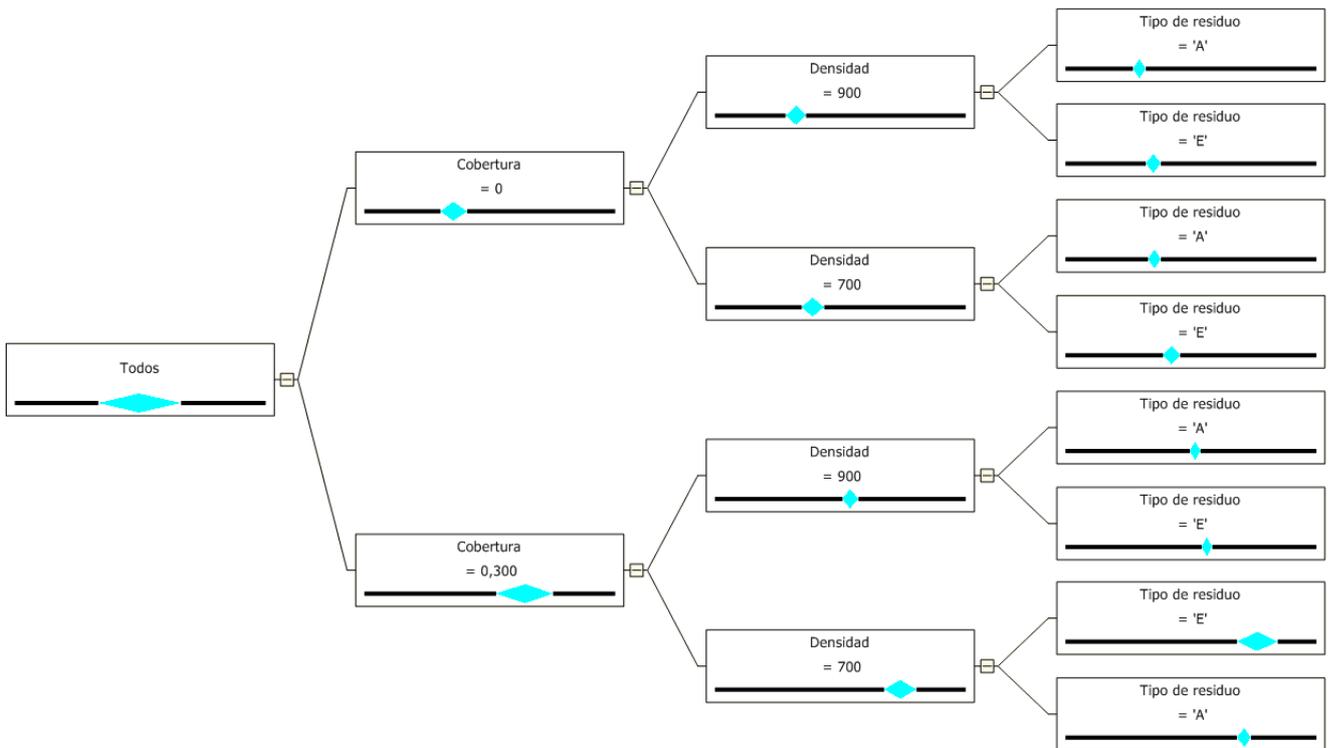


Ilustración 52. Árbol de decisión HumedadMax.

El árbol de decisión correspondiente a este parámetro de control se representa en la Ilustración 52. Sus resultados coinciden con los del modelo de regresión. El factor más importante es la cobertura (primer nivel del árbol) seguido de la densidad (segundo nivel del árbol). En el tercer nivel del árbol se aprecia cómo aparece el tipo de residuo, y en todos los casos se obtiene una mayor humedad máxima con el tipo de residuo europeo. Como se ha expuesto anteriormente, el residuo de tipo europeo se degrada menos y por lo tanto mantiene una porosidad mayor. Por ello con el europeo se logran máximos más grandes aunque, como se puede apreciar en el árbol, es un efecto de un orden de magnitud menor que el de la cobertura o el de la densidad.

Analizando el árbol se obtienen otros matices. La variabilidad del nodo con cobertura es mayor que cuando ésta no está presente. Esta variabilidad se debe al efecto que tienen las densidades. Una menor densidad implica una mayor porosidad y, por tanto, una mayor capacidad para retener agua. Este efecto se pone de manifiesto cuando no existe cobertura, pero su influencia es mucho mayor cuando existe cobertura, dado que potencia el efecto de la misma de retención de agua.

Visto desde otro punto de vista, se puede afirmar que en densidades bajas el efecto de retención de agua por parte de la cobertura es mucho mayor ya que tiene una mayor porosidad donde almacenar agua que en densidades mayores.

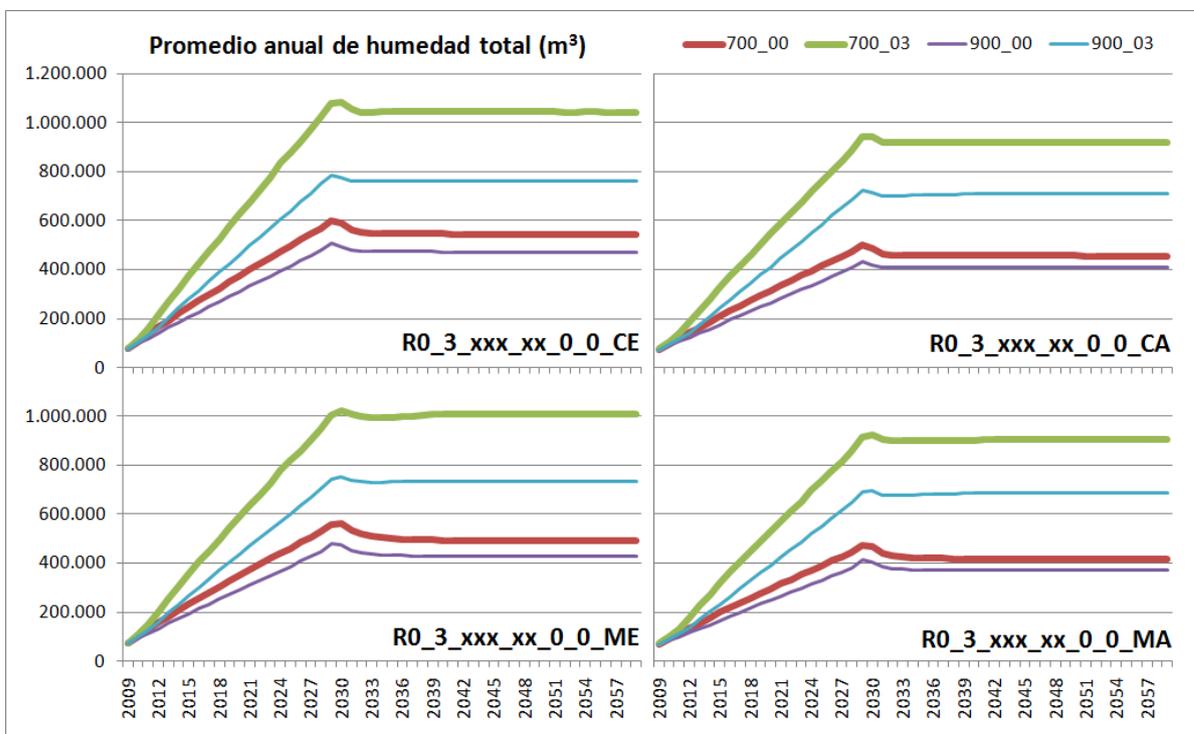


Ilustración 53. Efectos de la cobertura y la densidad en la humedad total.

En la Ilustración 53 se representa la evolución de la humedad total del vertedero para los casos con y sin cobertura y para las densidades de 700 y 900 kg/m³. Estos gráficos permiten analizar los resultados proporcionados por el modelo de regresión y el árbol de decisión. Se puede apreciar el efecto de la cobertura con densidad de 700 kg/m³ comparando la línea roja (sin cobertura) con la línea verde (con cobertura). Así mismo, con densidad de 900 kg/m³, se observa la diferencia entre la línea morada (sin cobertura) y la línea azul claro (con cobertura). También se puede analizar el efecto de la densidad para los casos sin cobertura (línea roja y línea morada) y con cobertura (línea verde y línea azul claro).

Se aprecia cómo cuando no hay cobertura la diferencia entre las humedades alcanzadas para una y otra densidad es menor. Esto se debe a que el efecto de una mayor porosidad para menores densidades se ve contrarrestado con una mayor conductividad hidráulica que reduce la cantidad de agua retenida.

El efecto de la cobertura es reducir la permeabilidad global del vertedero, por eso en los casos en los que existe, el efecto de la menor densidad y por lo tanto mayor porosidad es mayor.

5.2.2.2. Cantidad final de agua

Los coeficientes de regresión indican que para la humedad contenida en el vertedero al final del periodo de posclausura las variables más influyentes son: en primer lugar la cobertura, con coeficientes entre -0,53 y -0,64, en segundo lugar la densidad, con coeficientes entre 0,21 y 0,22 y en tercer lugar el sellado posclausura, con coeficientes entre 0,08 y 0,16. Las dos primeras variables coinciden con el anterior parámetro de control (humedad máxima) y su comportamiento es equivalente al explicado anteriormente. La explicación de que aparezca el sellado posclausura con respecto al caso anterior es que el máximo de humedad se alcanza al final del periodo de explotación y no se ve afectado por el sellado, mientras que éste sí afecta a la humedad total al final del periodo de posclausura.

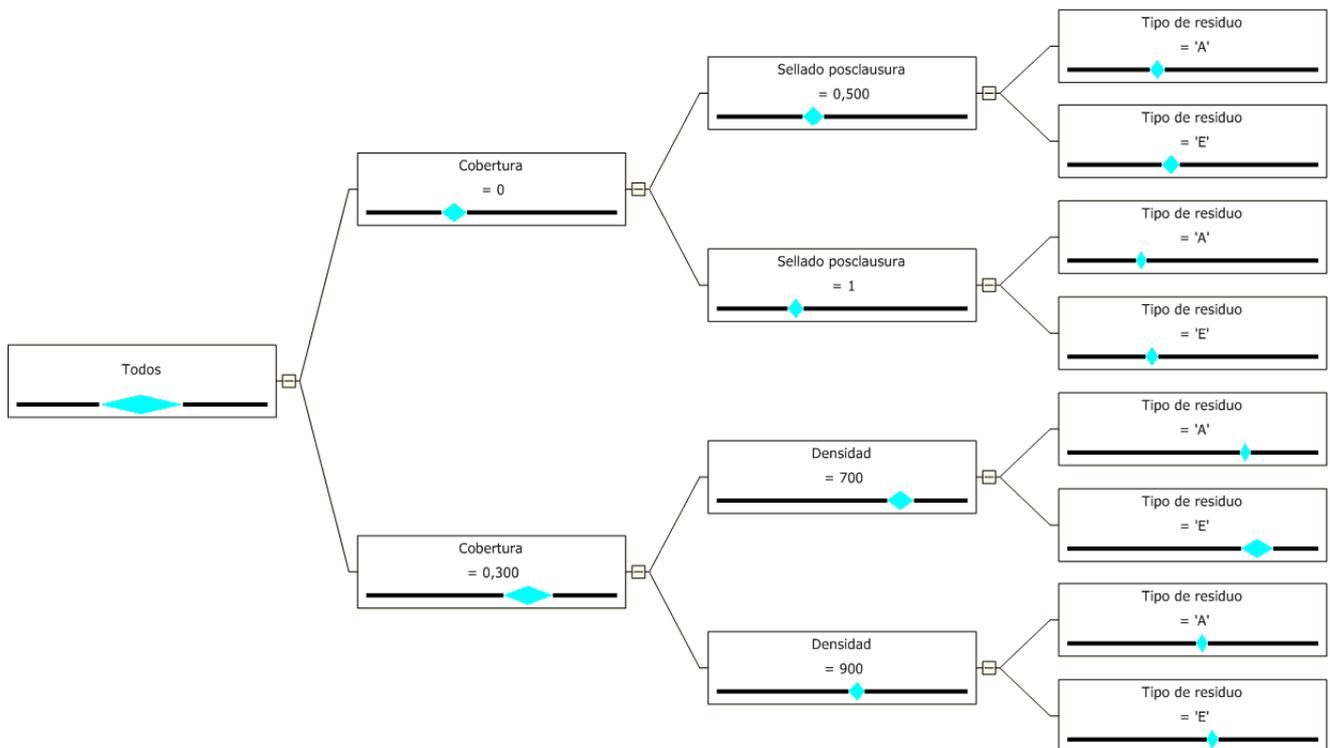


Ilustración 54. Árbol de decisión HumedadFinal.

El árbol de decisión coincide con los resultados del modelo de regresión pero ofrece un matiz adicional. La segunda variable en importancia es la densidad cuando existe cobertura, pero cuando ésta no existe es el sellado posclausura.

Anteriormente se planteó cómo el efecto de la densidad en la humedad total del vertedero era mucho mayor cuando existía cobertura. Cuando no existe el efecto de retención que crea la cobertura, la densidad ya no tiene tanta importancia y es la existencia o no de un sellado posclausura impermeable lo que más influirá en la humedad total final que alcance el vertedero.

Igual que en el caso del parámetro de control anterior, vemos cómo el tipo de residuo también influye (está presente en todo el tercer nivel del árbol) de forma que con el residuo americano (que se degrada más) se obtienen menores humedades finales.

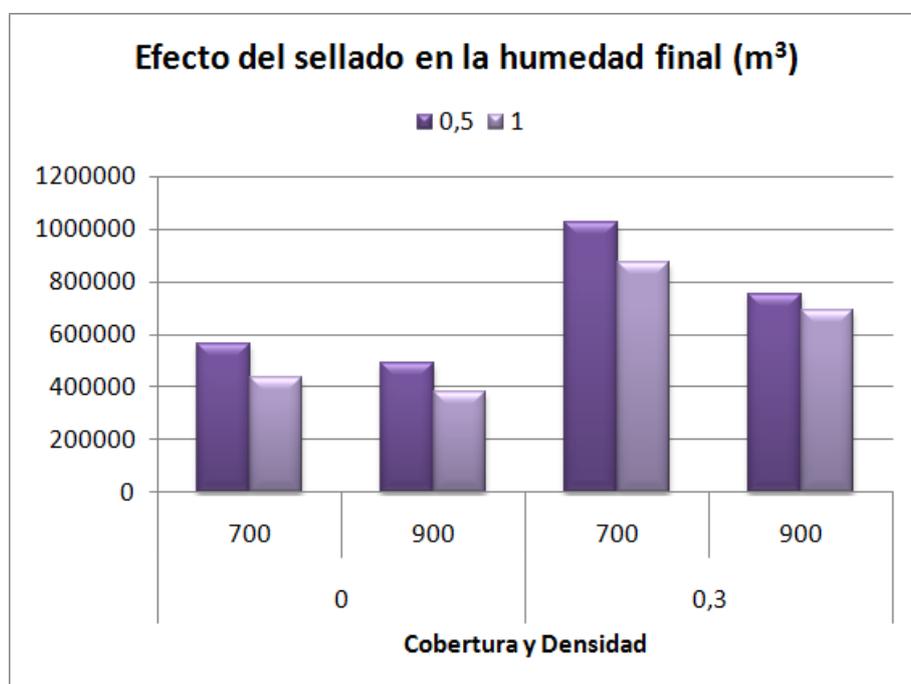


Ilustración 55. Efecto del sellado en la humedad final. Clima cantábrico y residuo europeo.

En la Ilustración 55 se representa la media de la humedad final en diferentes grupos de casos, todos ellos para clima cantábrico y residuo europeo. Se distingue en primer lugar los casos con cobertura (0,3 en el eje x) y sin cobertura (0 en el eje x) y dentro de éstos los casos con densidad de 700 y 900 kg/m³. Para cada grupo de casos se calcula la media de los casos con sellado posclausura semipermeable (0,5 en la leyenda del gráfico) y los casos con sellado posclausura impermeable (1 en la leyenda del gráfico).

Se confirman, con este gráfico, las conclusiones obtenidas con el modelo de regresión y con el árbol de decisión. En primer lugar la gran influencia de la cobertura y en segundo lugar la mayor influencia de la densidad cuando hay cobertura y del sellado posclausura cuando no hay cobertura. El gráfico permite ver con mayor claridad cuál es la magnitud proporcional de los efectos de la densidad y el sellado. Por ejemplo, para el caso sin cobertura, aunque el sellado tenga una mayor influencia, ésta es de un orden de magnitud similar a la de la densidad.

Si bien los modelos de regresión o el árbol de decisión indican cuál es el camino correcto (en el caso de varias variables de diseño indican cuáles son las más influyentes), es muy útil el apoyo de representaciones gráficas del efecto de esas variables seleccionadas para comprender su efecto relativo.

5.2.3. Asentamientos

A la hora de calcular los parámetros de control relativos a asentamientos es necesario tener en cuenta las variaciones de altura total de vertedero presentes en las diferentes morfologías de los modelos. Por ello se ha optado por calcular los parámetros de control como porcentajes con respecto a la altura total del vertedero (sin contar la capa drenante) en vez de representarlos por sus valores absolutos.

El parámetro de control sobre el asiento diferencial DiffSett (calculado como asiento máximo menos asiento medio) se excluye del análisis de datos, dado que los coeficientes de determinación que se obtienen para los modelos de regresión son muy bajos (entre 0,34 y 0,58). Esto implica que dicho asiento diferencial está condicionado por otros factores distintos a las variables de diseño estudiadas o, simplemente, que no es posible analizarlo con un modelo de regresión lineal. Es posible que tanto el modelo de sistema de drenaje seleccionado como el orden de llenado aplicado al vertedero sean factores influyentes sobre el asiento diferencial producido en la superficie del vertedero. Podría ser objeto de un estudio posterior la influencia en dicho asiento diferencial de diferentes sistemas de drenaje y diferentes patrones de llenado.

En cualquier caso, dicho asiento diferencial es pequeño, con valores de entre un 0,00 y un 0,24 % de la altura del vertedero.

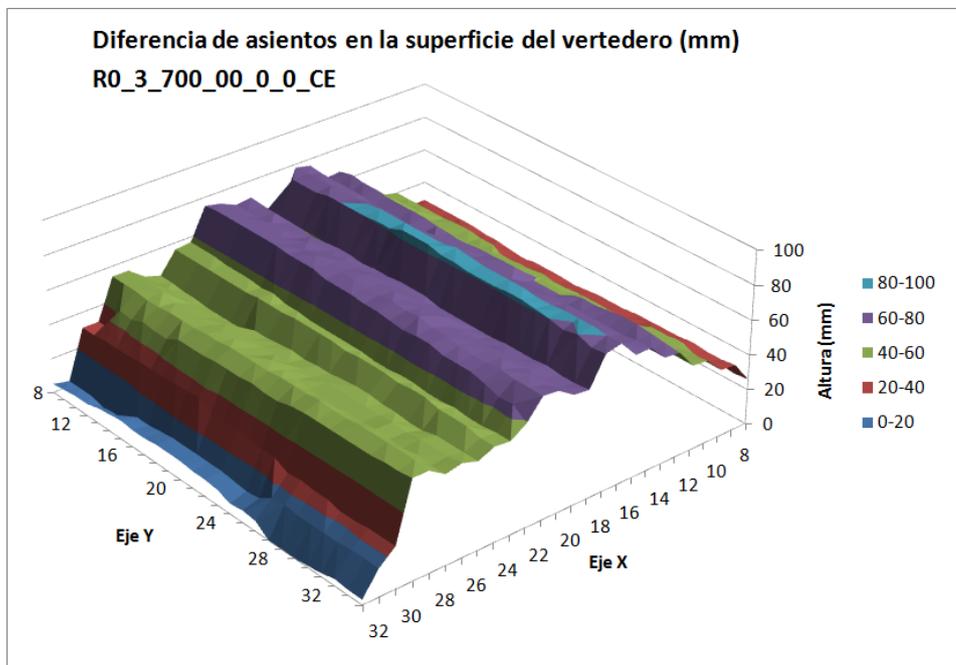


Ilustración 56. Diferencias de asiento en la superficie del vertedero.

En la Ilustración 56 se representa la situación de la superficie del vertedero para un determinado caso, excluyendo los taludes, al final del periodo de posclausura. El origen del eje z se ubica en el punto donde se produce el asiento máximo. De esta forma se aprecia que la diferencia entre el asiento máximo y el mínimo es de menos de 80 mm. También se observa una homogeneidad de asiento a lo largo del eje y, mientras que a lo largo del eje x forma una curva, siendo mayor en los extremos y menor en el centro. El sistema de drenaje podría ser origen de este efecto, sin embargo al estar situado en la capa drenante en celdas situadas en las rectas $y = 1$, $y = 11$, $y = 21$ e $y = 31$ (paralelas al eje x) no parece que guarde ninguna relación. Es probable que la causa se encuentre en el orden de llenado (paralelo al eje y).

El resto de parámetros de control referentes a asientos obtienen unos coeficientes de determinación altos (entre 0,95 y 0,97). Además, la influencia de las variables de diseño para todos ellos es similar. Tanto el asiento máximo (MaxSett), el mínimo (MinSett), el medio (AvgSett) y el medio en explotación (AvgSettExp) tienen unos coeficientes de regresión para la altura de capa y la densidad de entre -0,39 y -0,43 y para la cobertura, en residuos de tipo europeo, entre -0,13 y -0,16. Esto implica que con más densidad y con más altura de capa asienta menos y también que con cobertura asienta menos. Los factores densidad y altura de capa están en un primer nivel de importancia y la cobertura en un segundo nivel.

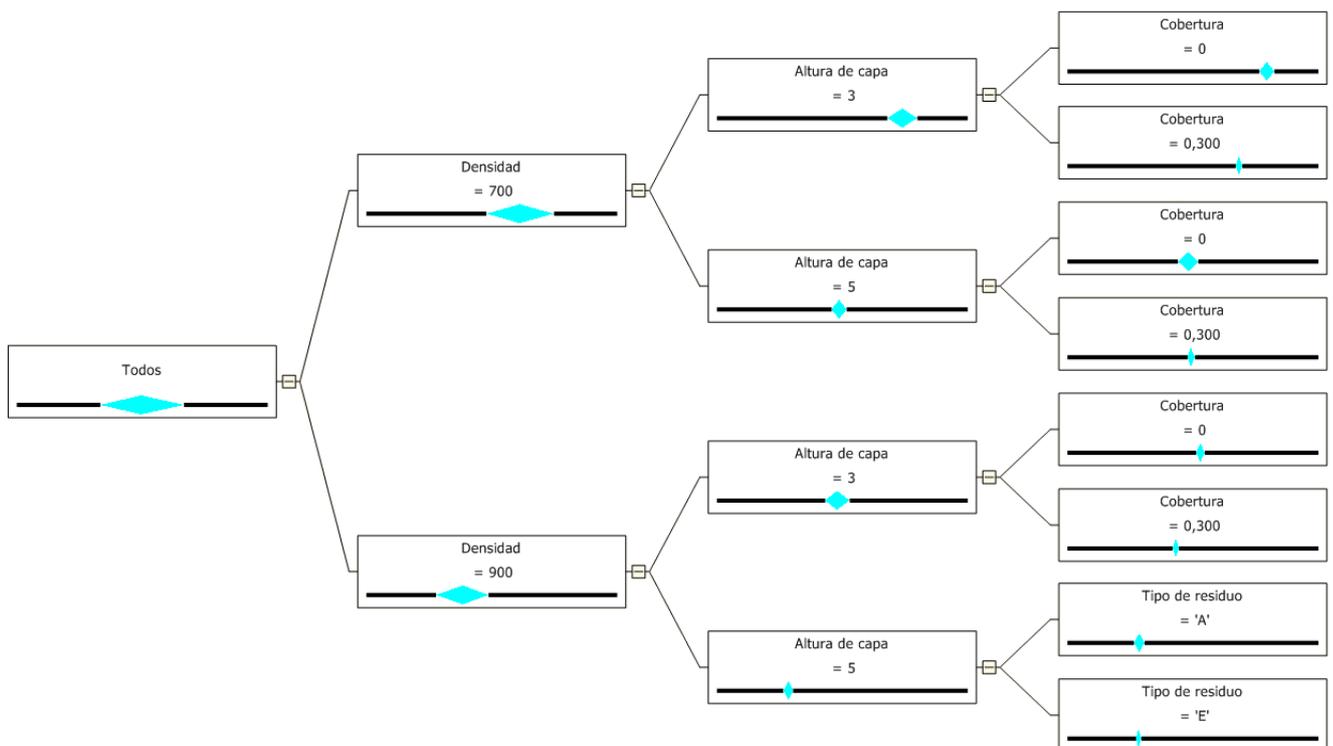


Ilustración 57. Árbol de decisión MaxSett.

Los árboles de decisión correspondientes muestran esa misma influencia de las variables para todos los parámetros de control. En la Ilustración 57 se presenta el correspondiente al asentamiento máximo.

Se puede apreciar cómo la densidad aparece en el primer nivel del árbol con un mayor asentamiento para densidades bajas. La altura de capa aparece en el segundo nivel del árbol con un asentamiento mayor para alturas de capa menores. Y, por último, la cobertura aparece en la mayor parte del tercer nivel del árbol, asentando más cuando no existe cobertura.

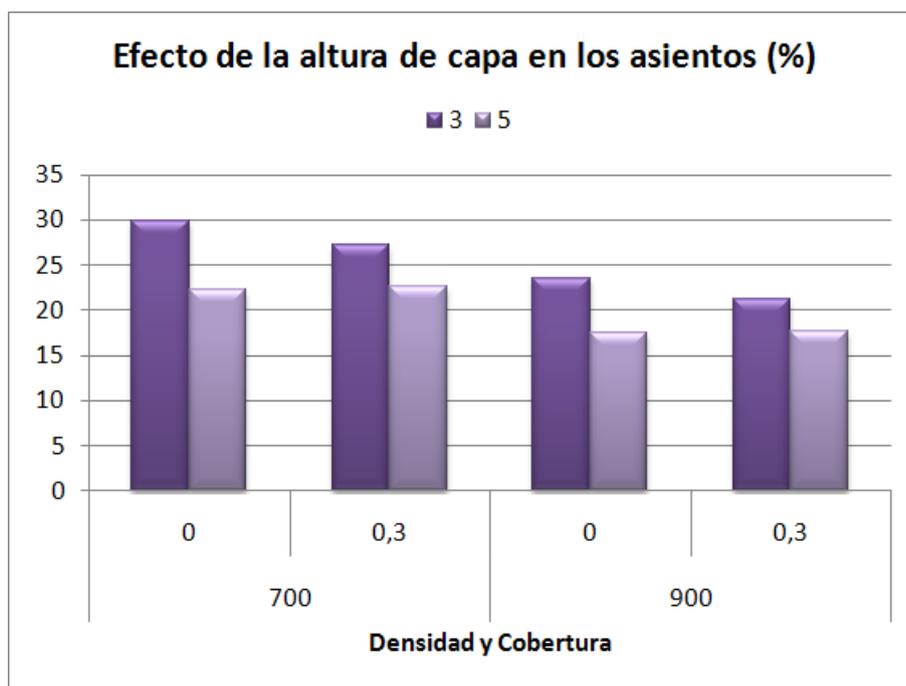


Ilustración 58. Efecto de la altura de capa en los asientos.

Para poder analizar mejor estos efectos se presenta, en la Ilustración 58, el efecto comparativo de cada una de las tres variables de diseño. Se representa la media del "Asiento medio en la superficie del vertedero AvgSett" para cada grupo de casos divididos en base a la densidad, la cobertura y la altura de capa.

Se aprecia cómo existe mayor asentamiento para menores densidades. Esto es lógico dado que la mayor densidad se corresponde con una mayor compactación inicial y por consiguiente menor capacidad de asentamiento posterior. De hecho, uno de los objetivos de la compactación inicial de los residuos es reducir los asentamientos posteriores. Esto se ha considerado en el modelo, como proponen distintos autores (Edil, Ranguette y Wuellner 1990), a través de un coeficiente de compactación menor para las celdas de mayor densidad.

También es lógico que la existencia de cobertura disminuya el asiento, dado que tiene el efecto de retener humedad dentro del vertedero y con ello reduce la capacidad de asentamiento al no poder drenar libremente. Esto se pone de manifiesto con más intensidad en residuo de tipo europeo, en el cual, según se vio anteriormente, el efecto de retención de agua por parte de la cobertura es mayor debido a su menor degradación frente al residuo americano. Esto explica que los coeficientes de regresión sean más significativos para el residuo europeo.

Sin embargo, no se encontraba una explicación razonable para el aumento del asentamiento con la disminución del tamaño de capa. El tamaño de capa podría presentar una cierta influencia a través del orden de llenado del vertedero, pero dado que el patrón de llenado es el mismo para todos los casos simulados no debería tener tanta influencia. También sería posible que dicho efecto de la altura de capa tuviera relación con el número de capas de cobertura en el vertedero (para altura de capa menor existen más) pero según se aprecia en la Ilustración 58 dicho efecto también aparece cuando no existe cobertura.

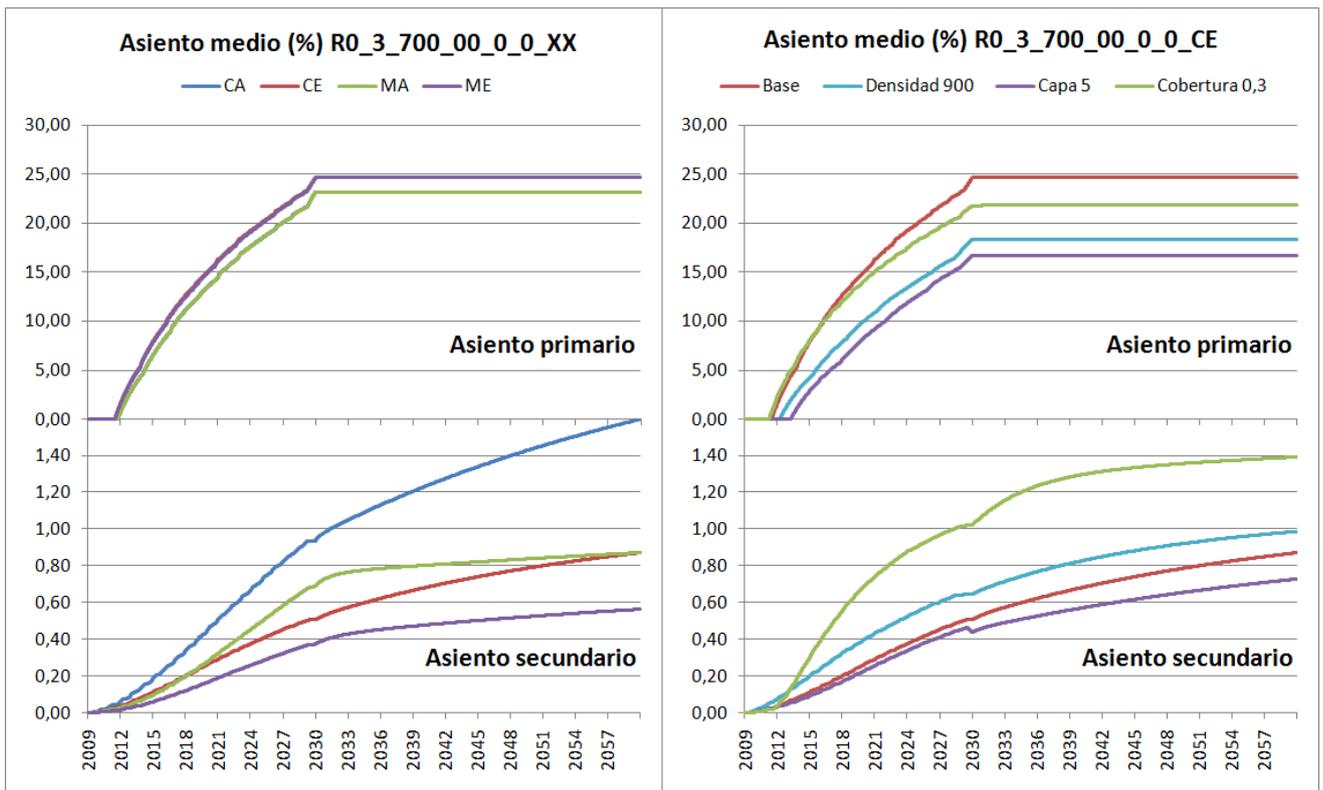


Ilustración 59. Evolución de los asientos primario y secundario.

Para poder discutir con más detalle la influencia de las variables de diseño en el asentamiento se presenta en la Ilustración 59 la evolución del asiento a lo largo del tiempo.

En la ilustración se descompone el asiento en asiento primario, provocado por la sobrecarga que compacta estructuralmente el residuo, y asiento secundario originado por la degradación del residuo. De esta forma se puede comparar la magnitud de cada uno de ellos y estudiar los efectos en cada uno de forma independiente.

Se muestra, por un lado, la influencia del clima y el tipo de residuo en los asientos primario y secundario en las dos gráficas de la izquierda. Por otro lado, en las gráficas de la derecha, se describe la influencia de un aumento en la densidad, en la altura de capa o la presencia de cobertura con respecto a un caso base.

En las gráficas de la izquierda se observa que el clima y el tipo de residuo no afectan significativamente al asiento primario y en cambio sí afectan de manera clara al asiento secundario. El clima y el tipo de residuo no aparecen como variables influyentes en los árboles de decisión o en los modelos de regresión porque el asiento secundario tiene un valor relativo mucho menor que el primario y en los parámetros de control seleccionados no se hace distinción entre ambos componentes del asiento total. El efecto del escenario en el asiento secundario se explica con la mayor degradación existente en el residuo americano y la mayor degradación con mayores humedades, es decir, clima cantábrico. Así el mayor asiento secundario corresponde a residuo americano y clima cantábrico y el menor a residuo europeo y clima mediterráneo.

En las gráficas de la derecha se observa el efecto de una mayor densidad (línea azul claro) con respecto al caso base (línea roja), principalmente en el asiento primario, disminuyéndolo. También se observa el efecto de la cobertura (línea verde) disminuyendo el asiento primario por la retención de humedad y aumentando significativamente el secundario ya que dicho aumento de la humedad favorece la degradación. Por último se representa el efecto de una mayor altura de capa (línea morada). En el asiento primario su efecto es similar al del aumento de densidad y en el asiento secundario es poco significativo.

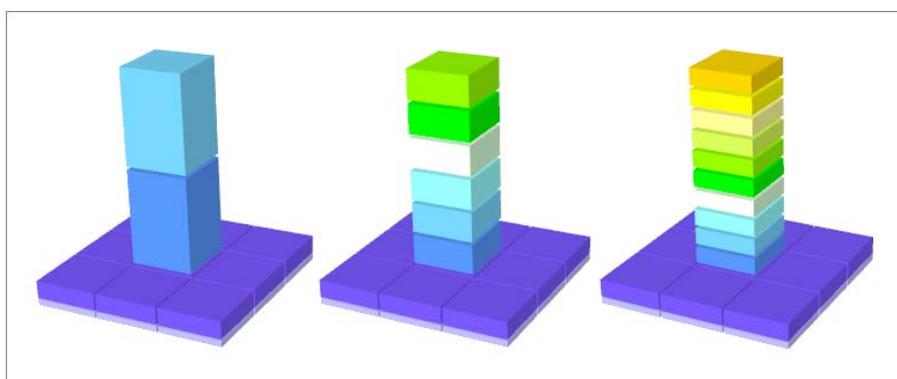


Ilustración 60. Modelos para test de asentamientos.

Dado que no se encontraba explicación para el aumento del asentamiento al disminuir el tamaño de capa se crea un modelo de simulación para aislar los cálculos de asentamiento en un caso sencillo. El modelo consiste en una columna de residuo de tipo "Vertedero 1" de planta cuadrada de 10 x 10 m en su base y una altura de 30 m. Se crean varias simulaciones con distintos tamaños de capa: una sola capa de 30 m, dos capas de 15 m, seis capas de 5 m, diez capas de 3 m, 20 capas de 1,5 m, 40 capas de 0,75 m, 80 capas de 0,375 m y 300 capas de 0,1 m. En la Ilustración 60 se representan los casos para capas de altura 15, 5 y 3 m. A la hora de realizar las simulaciones se desactivan todos los cálculos a excepción de los de asentamientos (balance de agua superficial, flujos verticales, flujos horizontales y biodegradación). Se realizan las simulaciones en un periodo de explotación de 20 años y los resultados se presentan en la Tabla 38.

Altura de capa (m)	Asiento total (m)	Asiento total (%)
30	0	0,00
15	1,145	3,82
5	3,088	10,29
3	3,992	13,31
1,5	5,190	17,30
0,75	6,345	21,15
0,375	7,452	24,84
0,1	9,427	31,42

Tabla 38. Resultados del test de asentamientos.

Durante el desarrollo del test de asentamientos se revisó con detalle el algoritmo y los cálculos relativos al asentamiento y se localizó un error en la fórmula del asentamiento primario. Se estaba utilizando logaritmo en base e en lugar de logaritmo en base 10 dentro de la fórmula de consolidación universal³. Esto implica que los asentamientos calculados eran aproximadamente el doble de lo que cabía esperar. Esto afecta a los resultados relativos a asentamientos presentados en este trabajo, que deberían ser aproximadamente la mitad, pero no justifica la influencia de la altura de capa en dichos asientos. Los resultados presentados en la Tabla 38 se han obtenido una vez corregida la fórmula.

³ En múltiples herramientas y entornos de desarrollo, por ejemplo la hoja de cálculo Excel, existe la función 'LN' para logaritmo neperiano y 'LOG' para logaritmos con diferentes bases. Cuando se utiliza 'LOG' y no se especifica la base explícitamente, por defecto es 10. En cambio, en el entorno de desarrollo .Net la función 'Log' de la clase 'Math' por defecto toma como base 'e' si esta no se especifica.

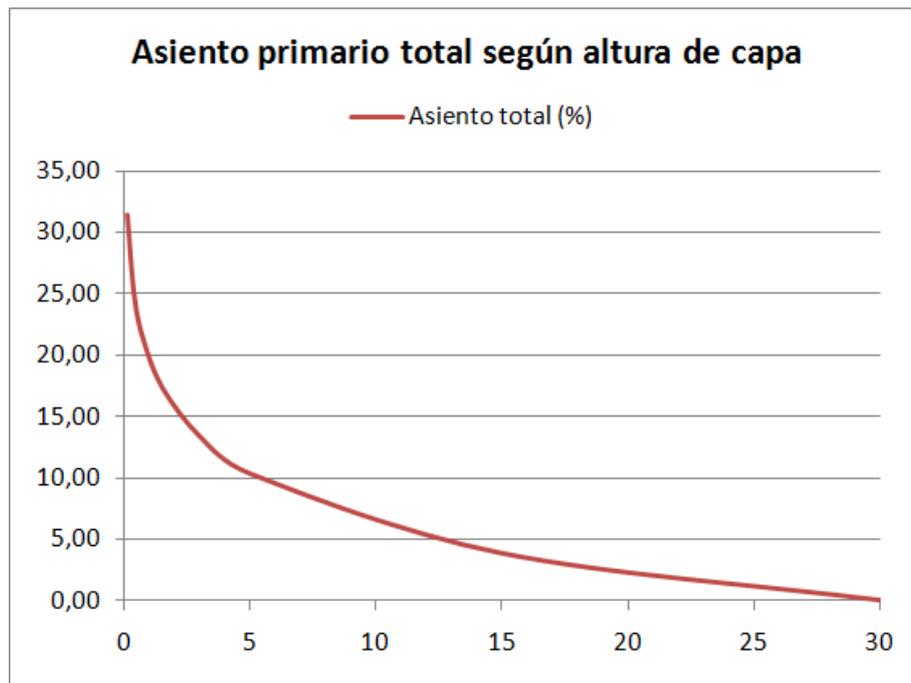


Ilustración 61. Resultado del test de asentamientos. Asiento total.

En la Ilustración 61 se representan gráficamente los resultados del test de asentamientos. Dado que no existe biodegradación, todo el asentamiento es asentamiento primario. Lo destacable del resultado del test es que pone de manifiesto que la altura de capa empleada altera de forma apreciable el resultado del cálculo de asentamientos. Esto no debería ser así ya que el asentamiento debería de ser independiente de la altura de capa seleccionada, es decir, de la discretización empleada para modelizar la columna.

Se observa en la gráfica que para alturas de capa habitualmente utilizadas en la discretización, del orden de 3 a 5 m, el valor del asentamiento es del 10 al 13 %. El orden de magnitud del asiento primario final en un vertedero es del 20%. Esta diferencia se hubiera detectado con anterioridad si no hubiera sido por el error en el logaritmo empleado (neperiano en lugar de base 10) en el cálculo del asiento que provocaba, aproximadamente, una multiplicación por dos del mismo.

Es necesario, por tanto, un análisis del algoritmo y de los cálculos empleados en la simulación a la hora de determinar los asientos primarios para poder determinar los factores que originan este desajuste.

Se presenta, a continuación, la ecuación de consolidación universal que rige los asientos primarios en el modelo.

$$\Delta H = C_P H_0 \log \left(\frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} \right)$$

Siendo:

ΔH = Asiento primario (m)

C_P = Coeficiente de compactación

H_0 = Altura inicial del relleno (m)

σ_0 = Presión efectiva previa en el relleno (kPa)

$\Delta \sigma$ = Sobrecarga efectiva (kPa)

Como valor para el coeficiente de compactación se toma 0,16 para densidades de 700 kg/m³ y 0,14 para densidades de 900 kg/m³.

Para comprender mejor el fenómeno se presenta un ejemplo de cálculo del asiento primario según se realiza actualmente en las simulaciones. Dado un modelo M_1 formado por una columna de 1 x 1 m en planta de tres celdas C_{M11} , C_{M12} y C_{M13} de 2 m de altura cada una y con una densidad de 700 kg/m³ y otro modelo M_2 de idénticas características pero con solo dos celdas C_{M21} y C_{M22} de 3 m de altura cada una se procede a realizar el cálculo de asentamiento primario.

En una primera fase se coloca una celda en cada uno de los dos modelos. Dicha celda no experimenta asentamiento (se asume que ya se incorpora el asentamiento al colocarla).

En una segunda fase se coloca la celda C_{M12} en el modelo M_1 . Esta celda provoca el asentamiento de la celda inferior C_{M11} según el siguiente cálculo.

$$\Delta H_{CM11}^{F2} = 0,16 * 2 \text{ m} * \log \left(\frac{1 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 2 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{1 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} \right) = 0,16 * 2 * \log \left(\frac{3}{1} \right) = 0,153 \text{ m}$$

En el cálculo se toma como carga inicial la mitad del peso de la celda ya colocada C_{M11} y como sobrecarga el peso de la celda que se coloca encima C_{M12} . De esta forma, la colocación de la segunda celda C_{M22} en el segundo modelo M_2 da como resultado el siguiente asentamiento en la celda C_{M21} .

$$\Delta H_{CM21}^{F2} = 0,16 * 3 \text{ m} * \log \left(\frac{1,5 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 3 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{1,5 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}} \right) = 0,16 * 3 * \log \left(\frac{4,5}{1,5} \right) = 0,229 \text{ m}$$

En una tercera fase solo es necesario colocar la tercera celda en el primer modelo M_1 dado que el segundo modelo M_2 ya está completo (solo tenía dos celdas). La colocación de la tercera celda C_{M13} en el primer modelo genera el siguiente asiento en la primera celda colocada C_{M11} (tener presente que su altura ahora ya no es 2 m sino 1,847 m debido al asiento en la segunda fase).

$$\Delta H_{CM11}^{F3} = 0,16 * 1,847 \text{ m} * \log\left(\frac{3 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 2 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{3 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}\right) = 0,16 * 1,847 * \log\left(\frac{5}{3}\right) = 0,065 \text{ m}$$

Y el siguiente asentamiento en la celda que tiene debajo C_{M12} .

$$\Delta H_{CM12}^{F3} = 0,16 * 2 \text{ m} * \log\left(\frac{1 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} + 2 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{1 * 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}\right) = 0,16 * 2 * \log\left(\frac{3}{1}\right) = 0,153 \text{ m}$$

Luego para una misma columna de 6 m de altura obtenemos los siguientes asientos primarios totales según la discretización de 2 o 3 m:

$$\Delta H_{M1} = \Delta H_{CM11}^{F2} + \Delta H_{CM11}^{F3} + \Delta H_{CM12}^{F3} = 0,371 \text{ m} = 6,18 \%$$

$$\Delta H_{M2} = \Delta H_{CM21}^{F2} = 0,229 \text{ m} = 3,81 \%$$

Se puede apreciar como a medida que disminuye la altura de capa aumenta el asiento. Así mismo se aprecia cómo, al colocar un determinado número de celda, el asentamiento en porcentaje es el mismo independientemente de la altura de dichas celdas. Se presenta, a continuación, el asiento porcentual para cada número de celda colocada teniendo en cuenta la siguiente expresión $\log(a) + \log(b) = \log(a*b)$.

$$\frac{\Delta H}{H_{Total}} = \frac{0,16 \log\left(\frac{1,5}{0,5}\right)}{2} * 100 = 3,817 \% \text{ Al colocar la segunda celda}$$

Sea A_1 el primer asiento relativo definido por $\left[0,16 \log\left(\frac{1,5}{0,5}\right)\right]$

$$\frac{\Delta H}{H_{Total}} = \frac{0,16 \left(\log\left(\frac{1,5}{0,5}\right)^2 + (1 - A_1) \log\left(\frac{2,5}{1,5}\right) \right)}{3} * 100 = 6,182 \% \text{ Al colocar la tercera}$$

Sea A_2 el segundo asiento relativo definido por $\left[0,16 (1 - A_1) \log\left(\frac{2,5}{1,5}\right)\right]$

$$\frac{\Delta H}{H_{Total}} = \frac{0,16 \left(\log\left(\frac{1,5}{0,5}\right)^3 + (1 - A_1) \log\left(\frac{2,5}{1,5}\right)^2 + (1 - A_1 - A_2) \log\left(\frac{3,5}{2,5}\right) \right)}{4} * 100 = 7,885 \% \text{ Al colocar la cuarta celda}$$

Este aumento constante del porcentaje de asentamiento al ir colocando capas independientemente de la altura de las mismas, origina que cuando existen pocas capas (mucha altura de capa) se obtenga un asiento menor que cuando existen muchas capas (poca altura de capa).

Dicho efecto puede apreciarse con claridad en la Ilustración 62 donde se representa, para el test de asentamientos realizado, la evolución del asiento primario medio de las celdas a lo largo del tiempo. Se comprueba que el primer escalón (colocación de la segunda celda) es del mismo tamaño para todos los casos y de igual forma el segundo escalón (colocación de la tercera celda) y los siguientes. De esta forma cuantas más capas hay, mayor asiento porcentual se obtiene.

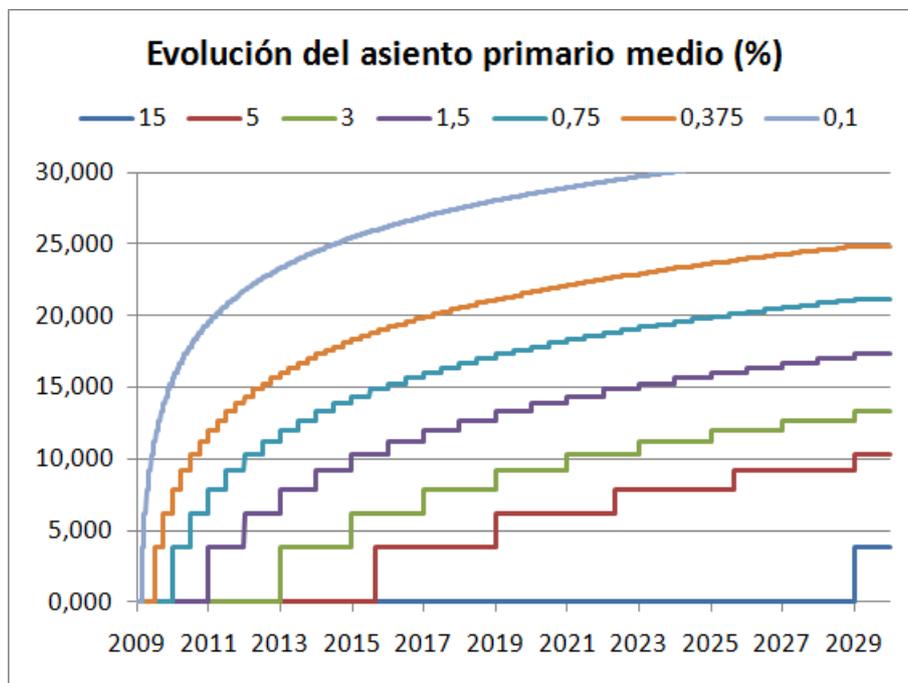


Ilustración 62. Resultado del test de asentamientos. Evolución del asentamiento primario.

El problema radica en que no es posible realizar diferentes discretizaciones en capas y asignar a todas ellas una misma densidad inicial. El hecho de colocar una capa hace que dicha capa experimente un asentamiento primario inicial (por peso propio) que se debería modelizar en la densidad inicial y por tanto será variable en función del tamaño de la capa. Para simular las mismas condiciones de asentamiento independientemente de la discretización y por tanto, para obtener valores equivalentes de asentamientos totales, es necesario introducir una densidad inicial diferente en cada caso, que tenga en cuenta ese asentamiento inicial. Así, la densidad inicial será mayor cuanto mayor sea la altura de capa, pues está sometida a un peso propio mayor.

5.2.4. Contaminación remanente

5.2.4.1. Consideraciones generales

Se opta por cuantificar la contaminación remanente por la cantidad de carbono presente en el vertedero al final de cada periodo. Así se definen cuatro parámetros de control: carbono sólido y carbono total al final del periodo de explotación y carbono sólido y carbono total al final del periodo de posclausura.

El factor más influyente en la contaminación remanente es la cobertura. La presencia de cobertura consigue retener una gran cantidad de humedad, según se ha visto anteriormente.

La humedad es el parámetro que más condiciona los procesos de degradación en el vertedero (Pohland 1975). Con un alto porcentaje de saturación la velocidad de biodegradación es mayor y, por consiguiente, la contaminación remanente que queda al final del periodo es menor. En este hecho se basa el desarrollo de los vertederos biorreactores, en auge desde la última década del siglo pasado (Reinhart, McCreanor y Townsend 2002). El objetivo del vertedero biorreactor es optimizar la degradación de los residuos en el vertedero, fundamentalmente mediante recirculación de los lixiviados o la adición de otros líquidos. Sin embargo, en los biorreactores se prefiere utilizar capas de cobertura permeables o retirar los materiales impermeables antes del vertido de nuevos residuos, para favorecer la distribución del agua y la recogida del biogás.

A diferencia de estas propuestas, en el presente trabajo se pone de manifiesto la importancia de incluir capas de cobertura para potenciar la degradación del residuo. Su resistencia al flujo vertical de humedad origina un mayor porcentaje de saturación en el vertedero que potencia la degradación. Controlando adecuadamente los posibles problemas de salidas de flujo horizontal al exterior (filtraciones laterales) o de estabilidad del vertedero, se plantea como una práctica recomendable.

Otro factor a tener en cuenta es el tipo de residuo. El residuo americano, por definición, tiene inicialmente una mayor cantidad de carbono que el europeo siendo este, además, más biodegradable. Con presencia de cobertura, la rápida velocidad de degradación conseguirá que las diferencias iniciales de composición (tipo de residuo) desaparezcan como factor determinante mientras que en ausencia de cobertura, pasa a ser el siguiente factor en importancia.

Tanto el aislamiento superficial como el sellado posclausura impermeable reducen la infiltración y por consiguiente favorecen una mayor contaminación remanente. Ambos son factores de segundo orden respecto a la existencia de cobertura, pero a tener en cuenta.

Para acabar con una primera introducción a los factores que intervienen en la contaminación remanente, es necesario mencionar la altura de capa. Inicialmente fue un hecho desconcertante y difícil de justificar la presencia de dicho factor tanto en los coeficientes de regresión como en los árboles de decisión. Pero una investigación detallada de la posible relación entre la altura de capa de vertido y la velocidad de biodegradación total del vertedero permitió explicar el fenómeno.

En una primera aproximación, una altura de capa menor implica que el residuo está colocado en el vertedero un tiempo mayor que cuando la altura de capa es más grande. Si para una altura de capa de 3 m se coloca una celda cada día, con una altura de capa de 6 m se colocaría una celda cada dos días (según el algoritmo de llenado del simulador Moduelo v4 no se coloca una celda hasta que no se completa su contenido de residuo a partir de los patrones de generación de residuos definidos).

En los modelos simulados para una altura de capa de 3 m la velocidad de llenado es de 1 a 2 celdas por día. En base a ello el efecto total sería equivalente a que la mitad de las celdas estuvieran colocadas durante un día más para emular al caso de una altura de capa de 6 m. Por lo tanto, frente a la duración del periodo de explotación, se concluye que este efecto es despreciable.

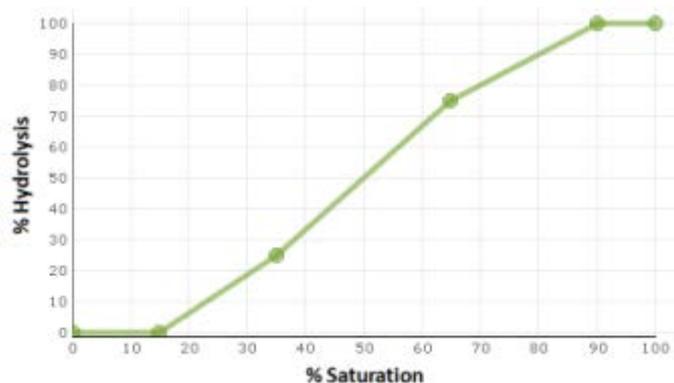


Ilustración 63. Relación % Saturación y % Hidrólisis.

La velocidad de degradación del residuo viene determinada principalmente por el porcentaje de saturación de humedad que presenta dicho residuo. En todos los modelos simulados, dicha relación se ha establecido mediante una curva que relaciona el porcentaje de saturación con la velocidad de hidrólisis según se aprecia en la Ilustración 63, siguiendo la propuesta de (Arias, y otros 1995). Luego, centrando el estudio en el porcentaje de saturación presente en el vertedero, se llega a la conclusión de que la distribución de dicho porcentaje depende de la altura de capa de vertido.

Para el estudio se toma como referencia uno de los modelos con altura de capa de 3 m, densidad del residuo de 700 kg/m³, sin cobertura, con aislamiento superficial durante la explotación que evite infiltraciones, en un escenario de clima mediterráneo y residuo americano.

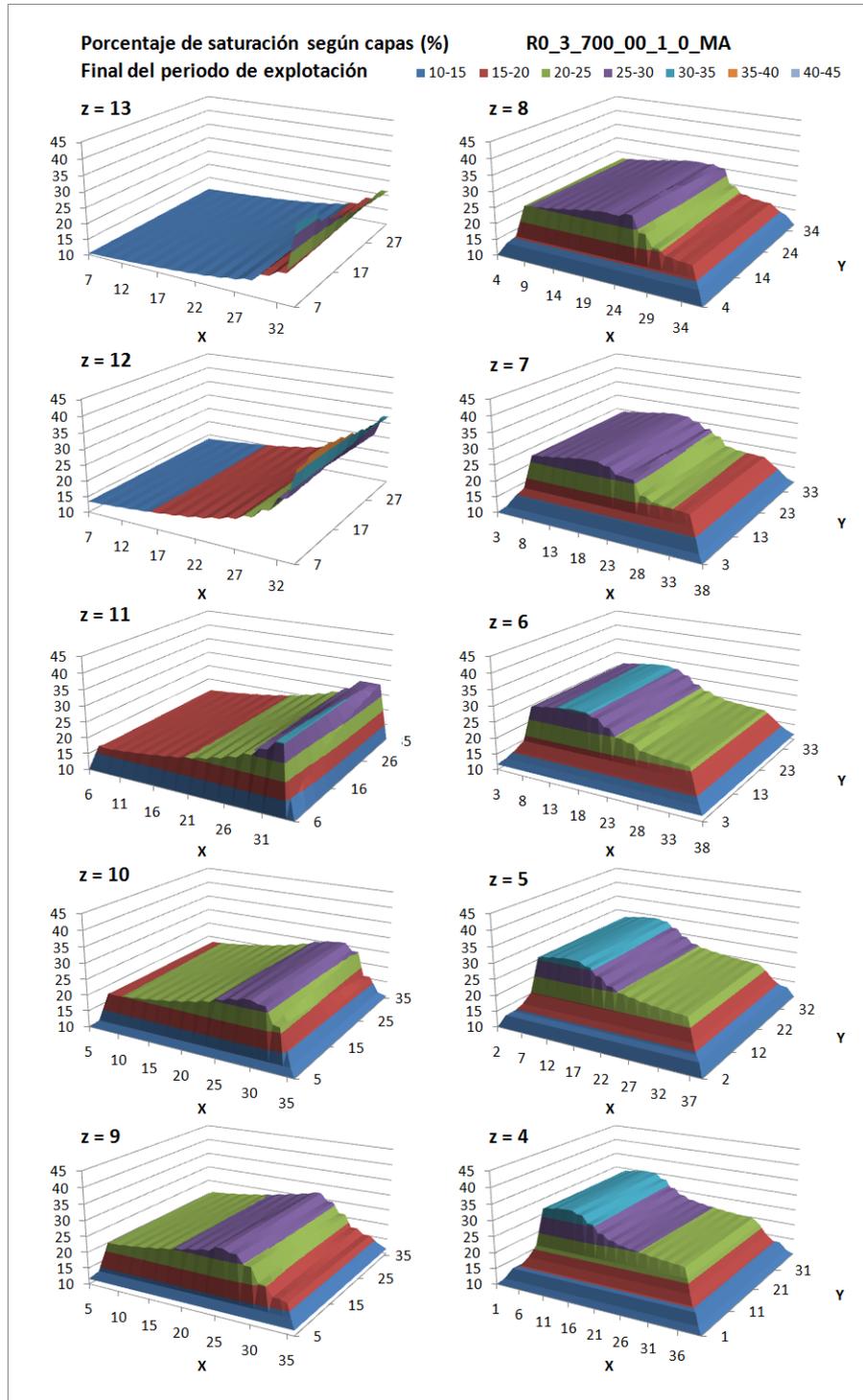


Ilustración 64. Distribución del porcentaje de saturación. R0_3_700_00_1_0_MA.

Se presentan en la Ilustración 64 los valores del porcentaje de saturación al final del periodo de explotación para dicho modelo. Se genera una representación gráfica para cada una de las capas del vertedero (según el eje z) siendo la capa $z = 4$ la más cercana a la capa de drenaje inferior y $z = 13$ la capa de sellado superior. Sobre la capa superior ($z = 12$) acaba de finalizar el sellado superficial (final del periodo de explotación) y dicho sellado se ha realizado según el eje x de forma que el aumento de saturación que se observa para valores de x altos en dicha capa, corresponde a la humedad que está recibiendo de la última parte de la capa de sellado que se acaba de colocar sobre ella - (ver Ilustración 4 sobre patrón de llenado del vertedero).

A medida que se profundiza en el vertedero ($z = 11, 10, 9...$) se observa cómo en las capas se refleja el efecto de la última capa de sellado colocada, debido a la transmisión vertical de la humedad del residuo contenido en dicha capa que se realiza de un modo diferido en el tiempo.

Este efecto de transmisión diferida de la humedad está originando, según se aprecia en las gráficas, variaciones del porcentaje de saturación de 15 a 20 % en algunas zonas (color rojo) a 30 a 35 % en otras zonas (color azul claro). Entrando con estos valores en la gráfica que relaciona porcentaje de saturación con velocidad de hidrólisis se aprecian grandes diferencias en la velocidad de degradación entre ambas zonas.

Si tomando el modelo base se modifica la altura de capa de vertido a 5 m en lugar de 3 m, se obtienen los resultados para el porcentaje de saturación que se presentan en la Ilustración 65.

Se puede apreciar cómo el efecto de colocación de la última capa antes del final del periodo de explotación, si bien afecta a la capa inferior ($z = 7$) queda muy diferido en capas inferiores (de hecho, la capa $z = 5$ presenta un efecto procedente probablemente no de la última capa, sino de la anterior).

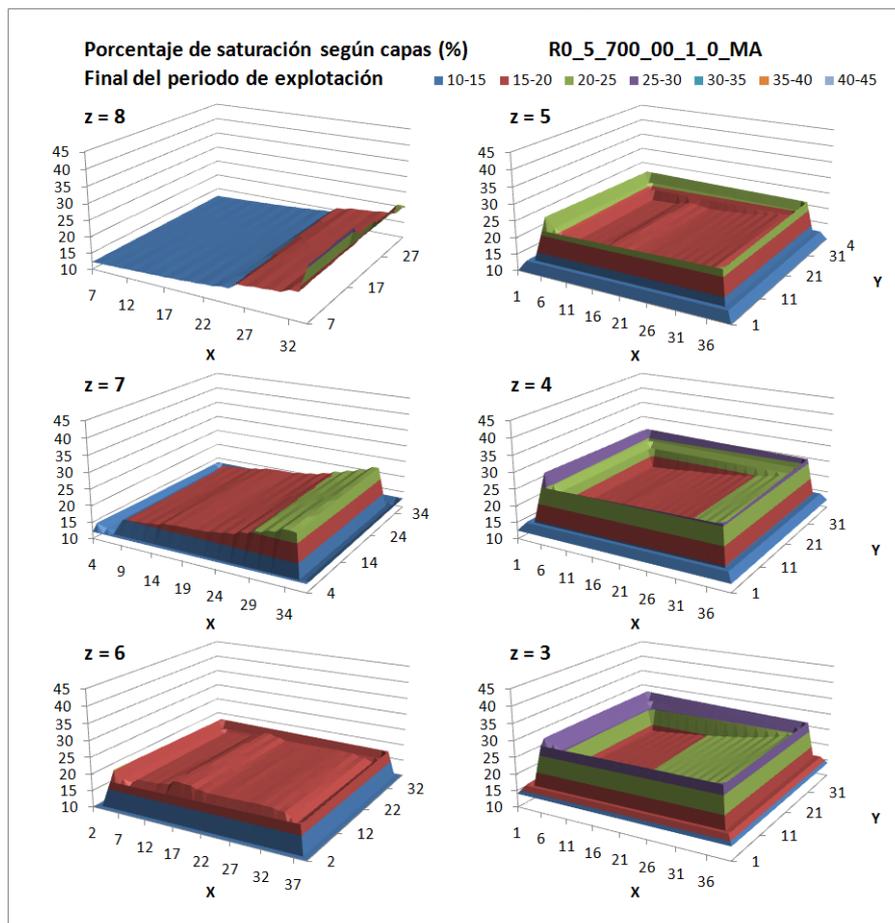


Ilustración 65. Distribución del porcentaje de saturación R0_5_700_00_1_0_MA.

De esta forma, se puede afirmar que cuanto mayor es la altura de capa, más tarda una capa en ser colocada y por lo tanto, el efecto de su transmisión vertical de humedad es menos homogéneo y continuo sobre toda la planta del vertedero que en el caso de capas de menor espesor. Con capas de menor espesor se logra un mayor porcentaje de saturación promedio dentro del vertedero, lo que da lugar a una mayor velocidad de biodegradación. Buscando un símil, sería equivalente a un riego superficial pequeño y frecuente frente a un riego superficial mayor pero mucho más espaciado en el tiempo.

Esto se corresponde con las recomendaciones de diseño de vertederos sostenibles (Pacey, y otros 1999) que, por distintos motivos, recomiendan diseñar celdas pequeñas en área y profundas. Cuanto menor sea el área superficial más frecuente será el efecto observado y por tanto mayor será el porcentaje de saturación promedio y, en consecuencia, la degradación.

5.2.4.2. Contaminación al final del periodo de explotación.

Examinando los resultados sobre carbono al final del periodo de explotación, se deduce que la influencia de las variables de diseño es similar tanto en el carbono sólido como en el carbono total, que tiene en cuenta el disuelto en el agua retenida en los poros del residuo.

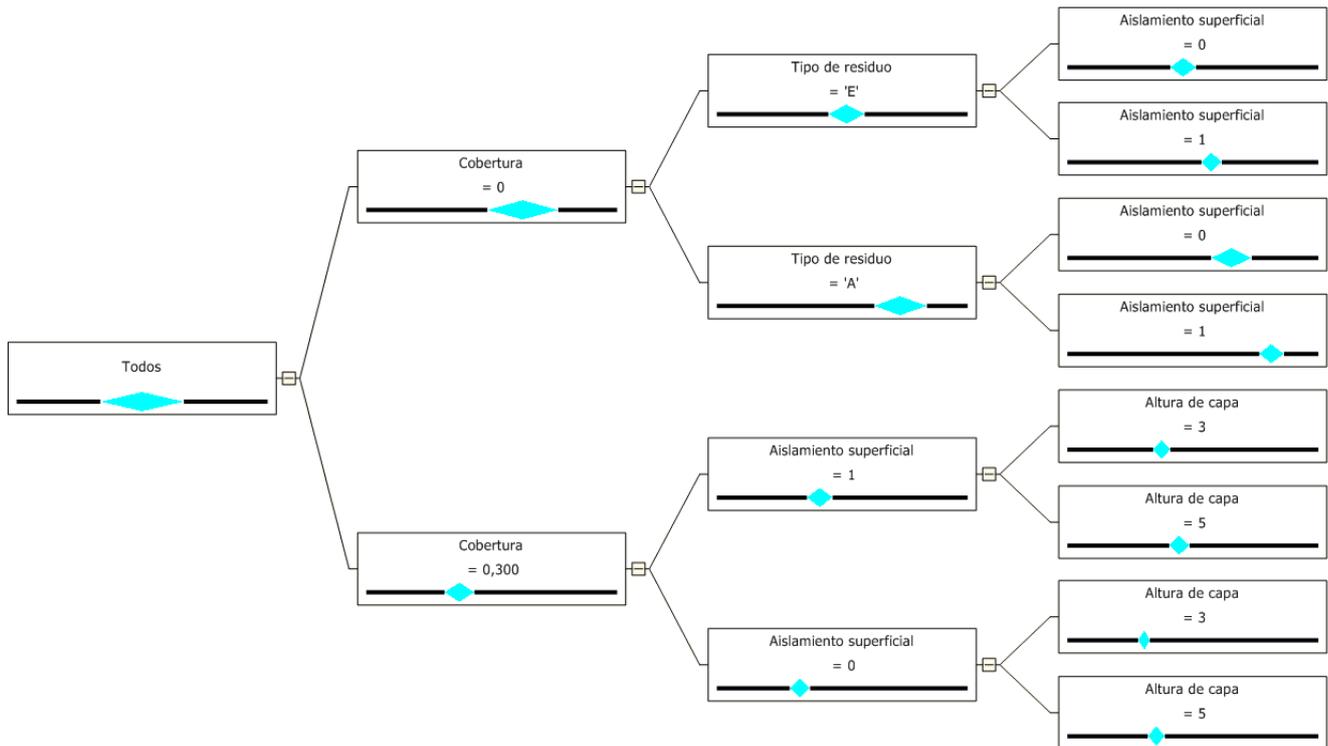


Ilustración 66. Árbol de decisión. TotalCarExp.

En la Ilustración 66 se muestra el árbol de decisión con los resultados correspondientes al carbono total remanente al final del periodo de explotación. Como se comentó anteriormente la principal variable es la cobertura. Por su capacidad de retención de humedad la presencia de cobertura degrada más el residuo (coeficientes de regresión de 0,43 a 0,64).

El siguiente factor en importancia es el aislamiento superficial. Cuando existe aislamiento superficial el residuo tiene una menor humedad y por consiguiente se degrada menos originando una mayor contaminación remanente (coeficientes de regresión -0,16 a -0,32). Es necesario destacar que, según se aprecia en el árbol de decisión, cuando no existe cobertura es más determinante el tipo de residuo que el aislamiento superficial durante la explotación. El tipo de residuo americano tiene una mayor composición inicial de carbono que el residuo europeo, y su humedad inicial es suficiente para favorecer la degradación aunque se impida la infiltración (en el caso de aislamiento superficial).

Por último, aparece la altura de capa como tercer factor influyente. A menor altura de capa más degradación y menor contaminación remanente según se analizó anteriormente. Esto también se refleja en los coeficientes de regresión de esta variable de diseño (entre -0,09 y -0,12).

En el caso de la cantidad total de carbono remanente, existe otra variable de diseño que influye en los resultados según el modelo de regresión lineal: la densidad, con unos coeficientes entre 0,11 y 0,23.

Los árboles de decisión generados en este análisis tienen una profundidad máxima de 4 niveles, y es por ello que no pueden mostrar una cuarta variable que influya en el parámetro de control. Si bien la variabilidad presente en los diamantes azules del último nivel del árbol nos pueden indicar que existen otras variables de diseño a considerar, no es posible saber cuáles son. Aun así, la decisión de incluir solo 4 niveles en los árboles se tomó para dar un alcance y formato adecuados a este trabajo. Nada impide analizar con tres niveles o con cinco. En cualquier caso, es necesario justificar la aparición de la densidad como variable de diseño con influencia en la contaminación remanente.

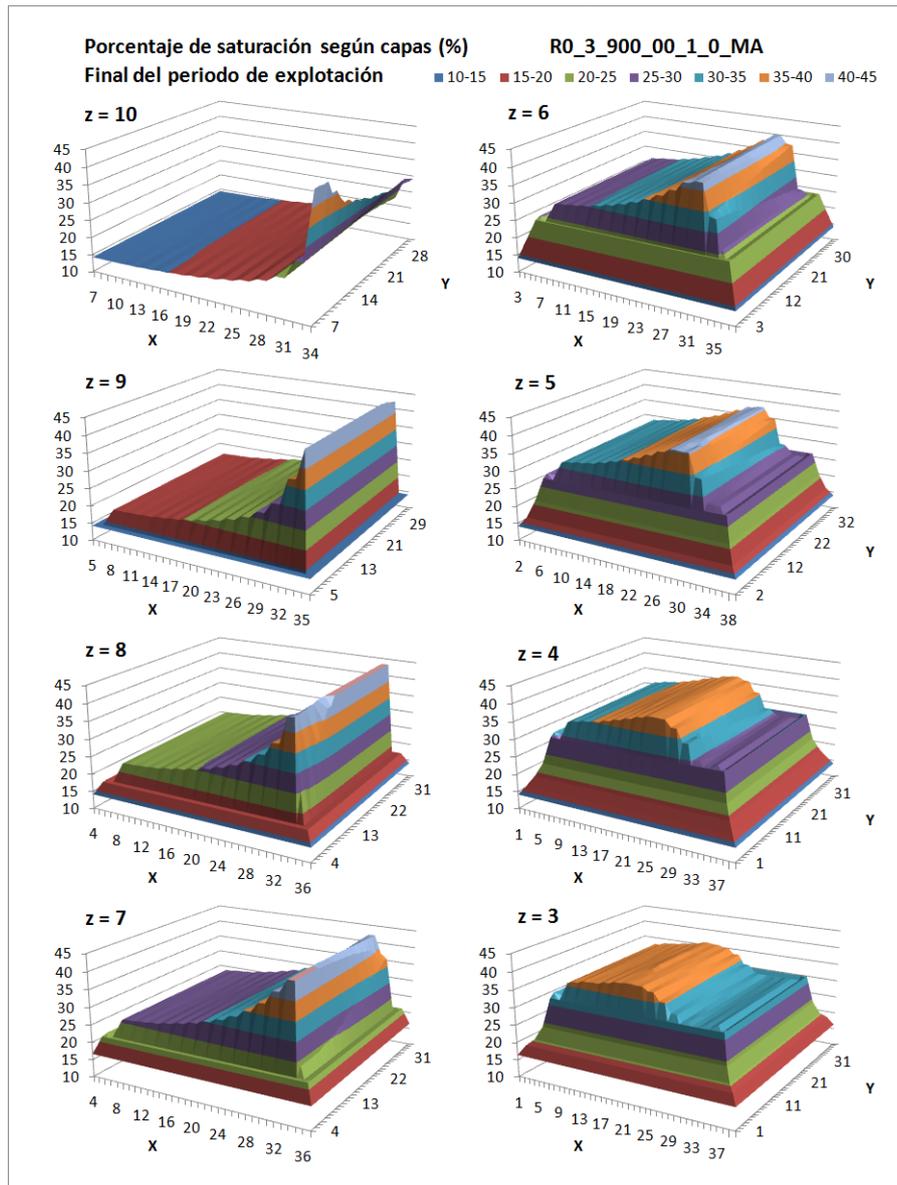


Ilustración 67. Distribución del porcentaje de saturación R0_3_900_00_1_0_MA.

En la Ilustración 67, partiendo del caso base presentado en la Ilustración 64, se modifica la densidad del residuo de 700 a 900 kg/m³. Se presenta, por tanto, el porcentaje de saturación dentro del vertedero al final del periodo de explotación. Se puede apreciar cómo el efecto diferido del flujo vertical de humedad es mayor al aumentar la densidad. Al existir menor volumen de poros, el porcentaje de saturación originado por el flujo de humedad es mayor. Por ello, la degradación con densidades más grandes es mayor y, por consiguiente, la contaminación remanente menor.

5.2.4.3. Contaminación al final de la posclausura.

En cuanto al carbono remanente al final del periodo posclausura, los coeficientes del modelo de regresión lineal son similares a los del periodo de explotación con la salvedad del aislamiento superficial, que pierde influencia (queda entre -0,08 y -0,11) y del sellado posclausura, que aparece, como era de esperar, como factor a destacar (entre -0,09 y -0,24).

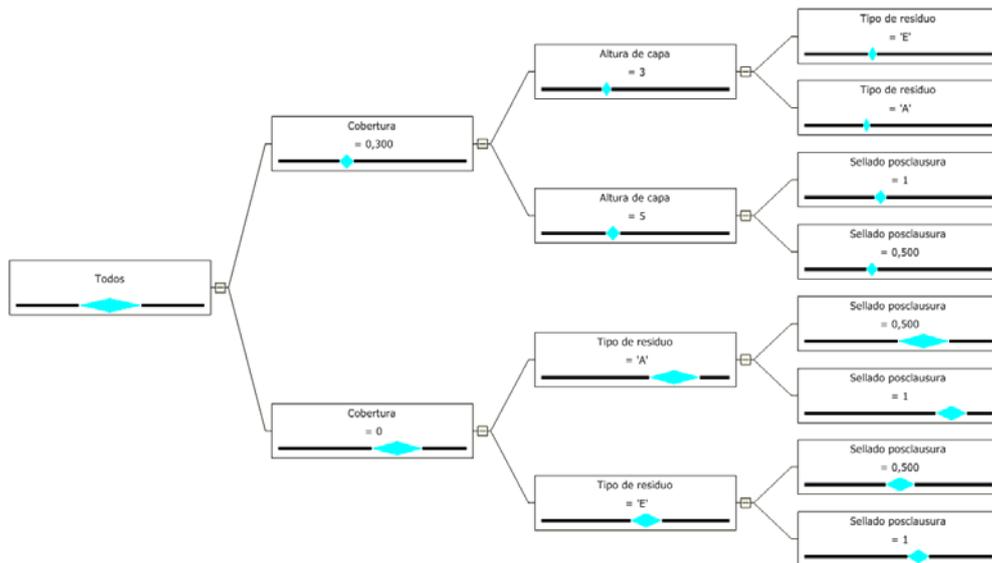


Ilustración 68. Árbol de decisión. TotalCarPos.

5.2.4.4. Distribución de la contaminación remanente.

Aunque los parámetros de control definidos tienen como objetivo analizar y cuantificar el total de contaminación remanente al final de los periodos de explotación y/o posclausura puede resultar de interés estudiar cuál es la importancia relativa de la presencia de carbono sólido frente al carbono disuelto y cuál es la distribución de dichos carbonos dentro del vertedero.

Para ello se han elaborado gráficos que describen la cantidad de carbono (kg) presente en cada celda del vertedero para cada una de sus capas. Tomando como referencia el caso sin recirculación, con capa de 3 m, densidad de 700 kg/m³, sin cobertura, con aislamiento durante la explotación, sin sellado posclausura, clima mediterráneo y residuo americano (R0_3_700_00_1_0_MA), en la Ilustración 69 se presenta la distribución de carbono remanente sólido al final del periodo de explotación. En la Ilustración 70 la distribución de carbono sólido al final del periodo de posclausura. En la Ilustración 71, se muestra la distribución del carbono disuelto al final del periodo de explotación. Y, por último, en la Ilustración 72 aparece la distribución de carbono disuelto al final del periodo de posclausura.

Carbono sólido remanente según capas (kg en celda)

R0_3_700_00_1_0_MA

Final del periodo de explotación

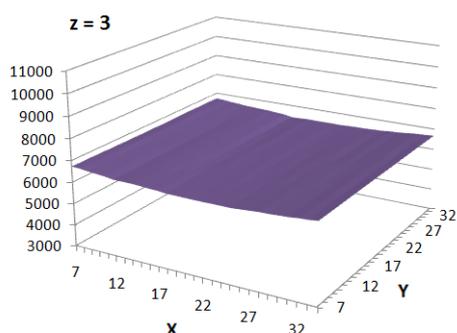
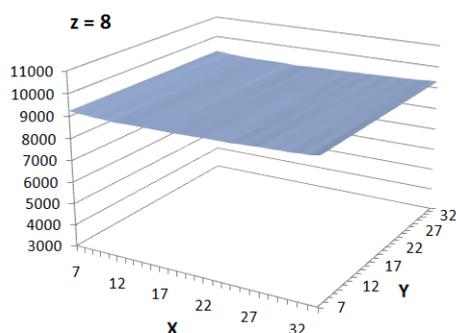
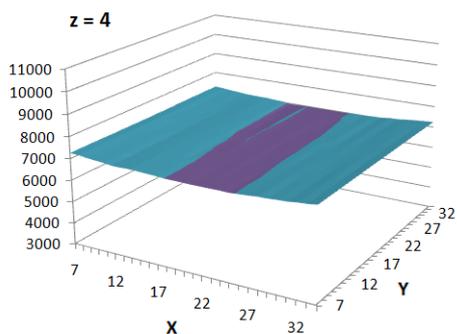
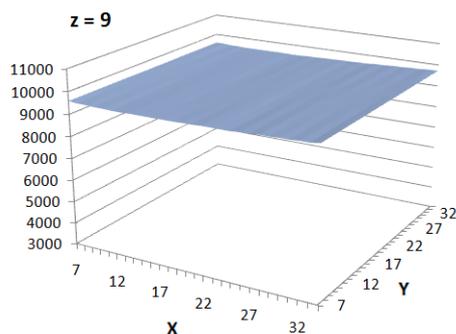
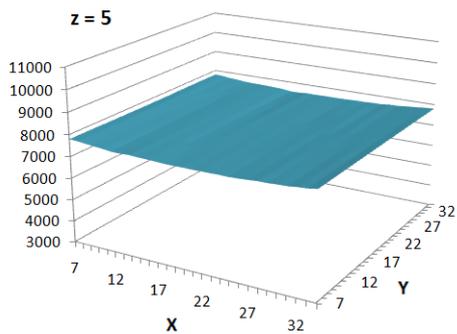
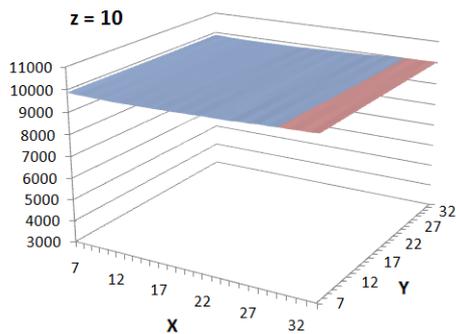
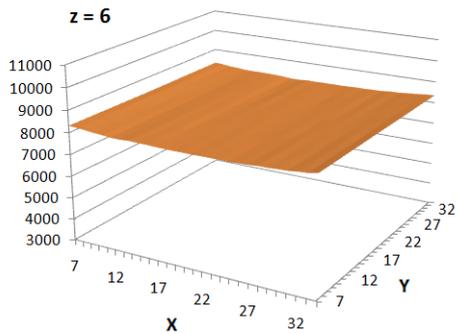
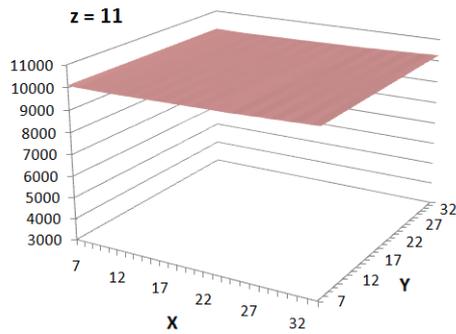
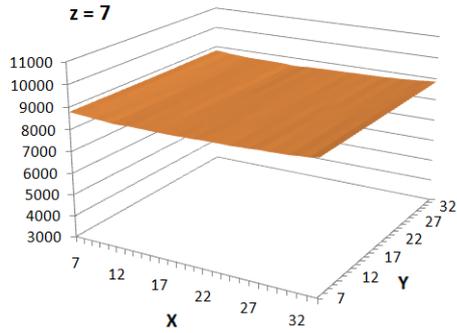
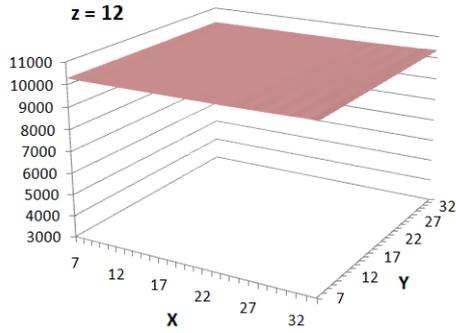
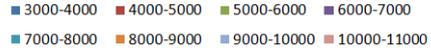


Ilustración 69. Distribución del carbono sólido remanente. Final periodo explotación.

Carbono sólido remanente según capas (kg en celda)

R0_3_700_00_1_0_MA

Final del periodo de posclausura

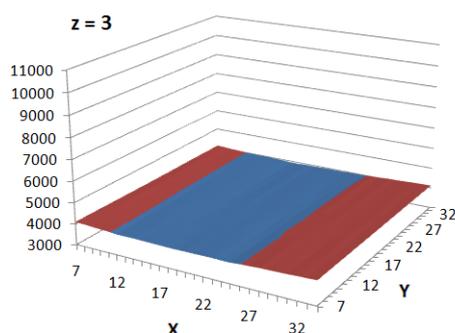
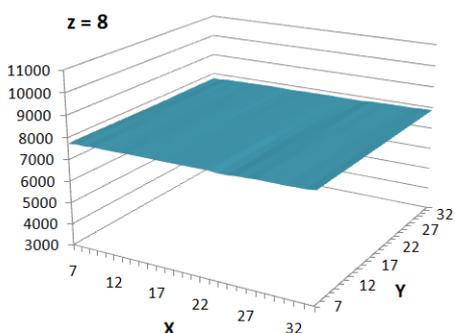
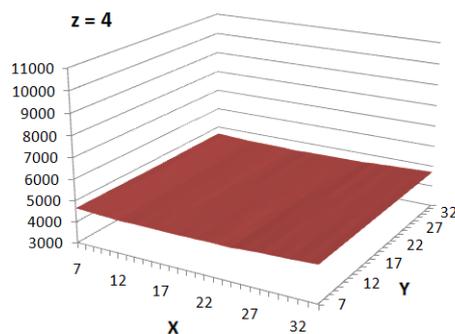
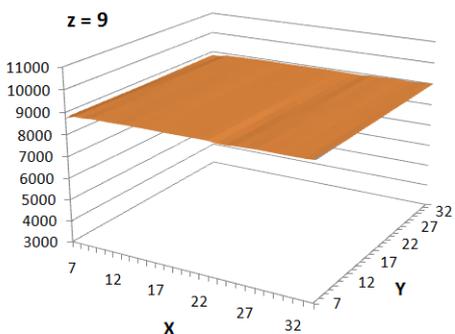
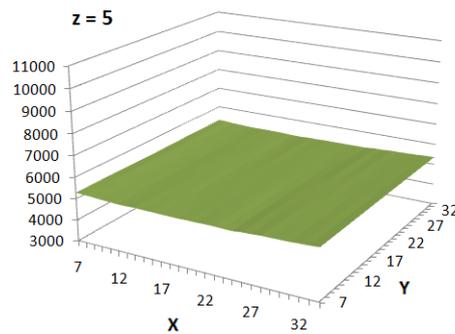
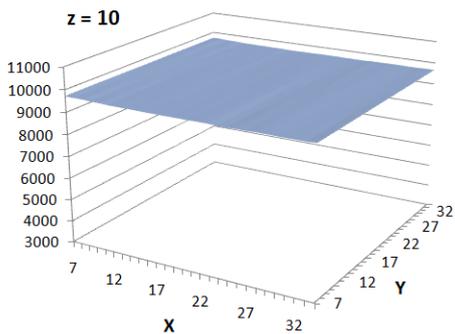
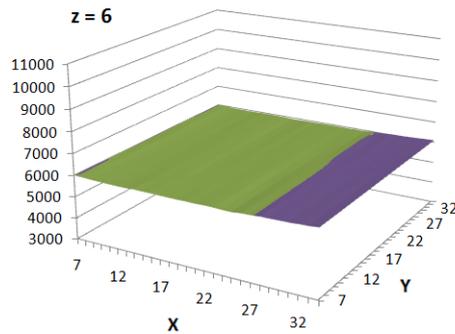
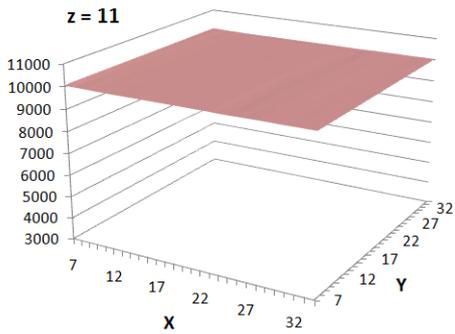
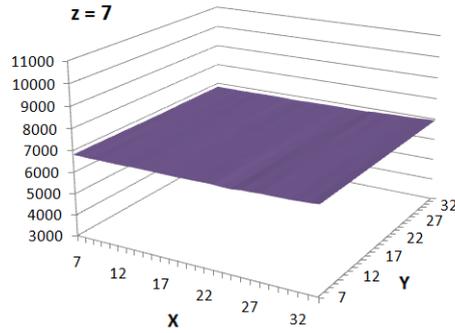
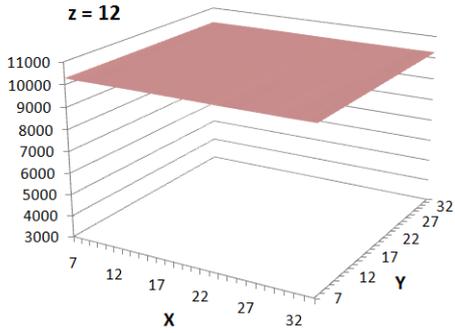
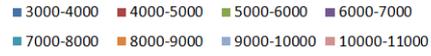


Ilustración 70. Distribución del carbono sólido remanente. Final periodo posclausura.

Carbono disuelto remanente según capas (kg en celda)

R0_3_700_00_1_0_MA

Final del periodo de explotación

■ 0-5 ■ 5-10 ■ 10-15 ■ 15-20 ■ 20-25 ■ 25-30 ■ 30-35 ■ 35-40 ■ 40-45

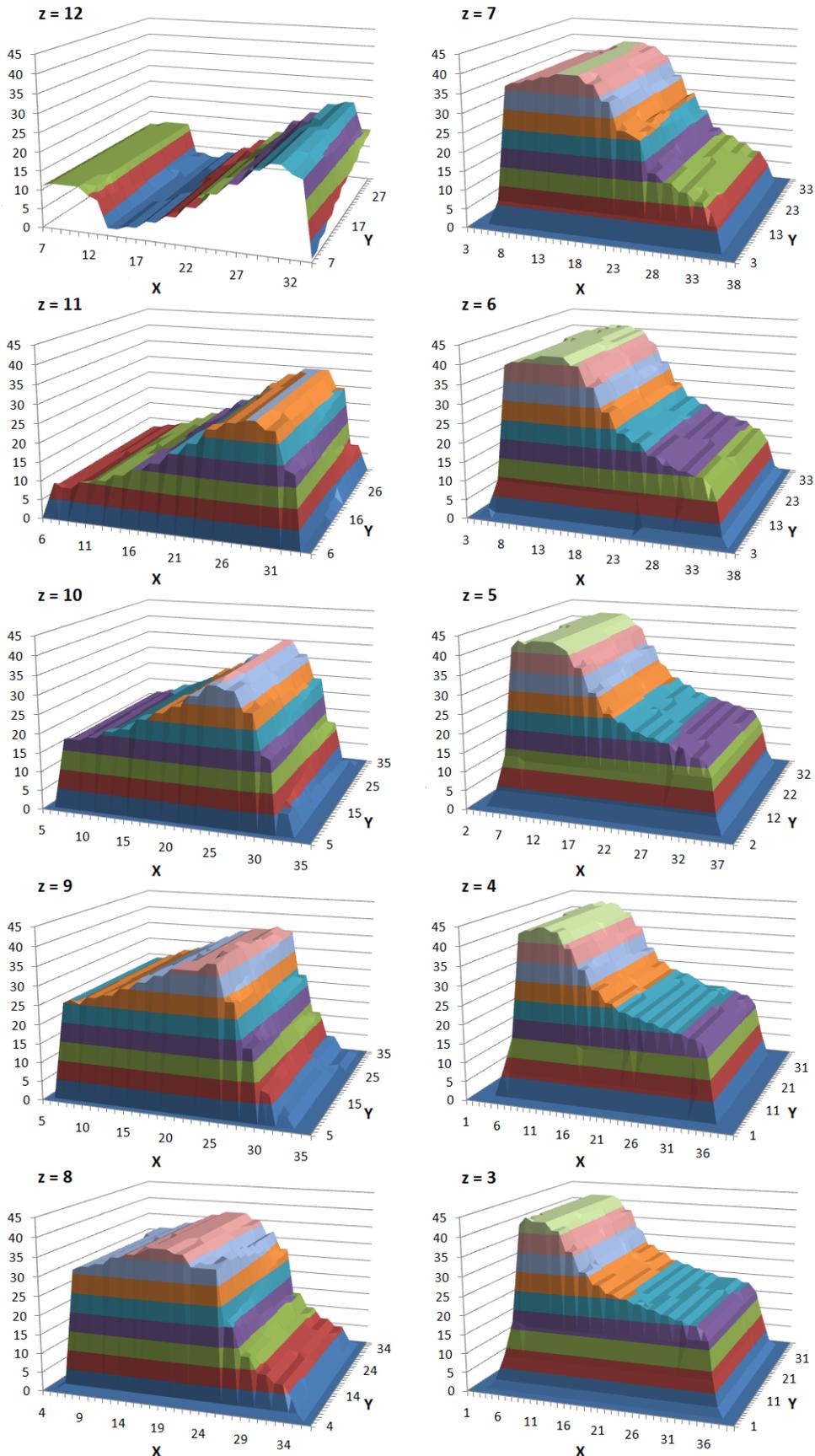


Ilustración 71. Distribución del carbono disuelto remanente. Final periodo explotación.

Carbono disuelto remanente según capas (kg en celda)

R0_3_700_00_1_0_MA

Final del periodo de posclausura

■ 0-0,5 ■ 0,5-1 ■ 1-1,5 ■ 1,5-2 ■ 2-2,5 ■ 2,5-3

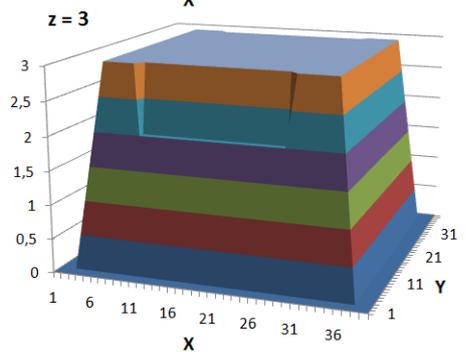
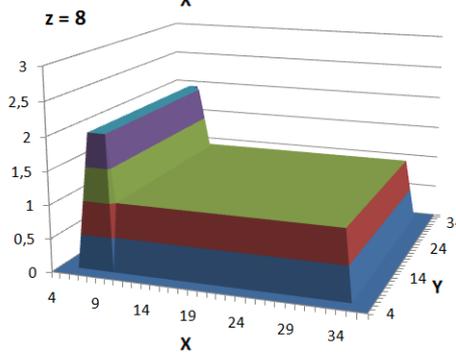
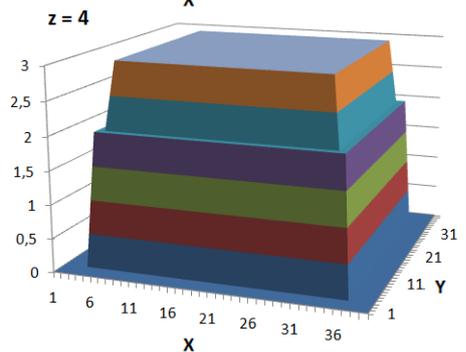
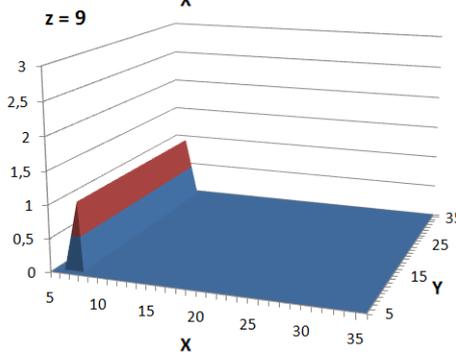
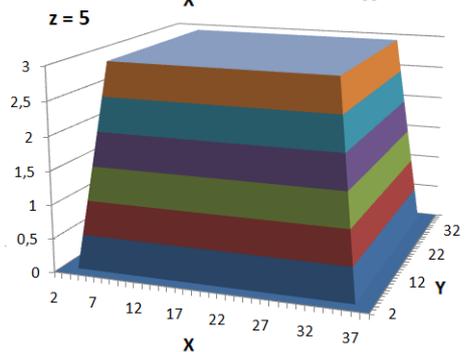
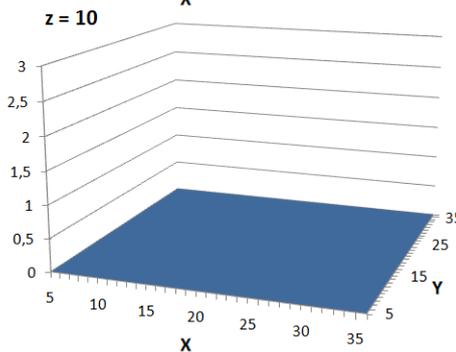
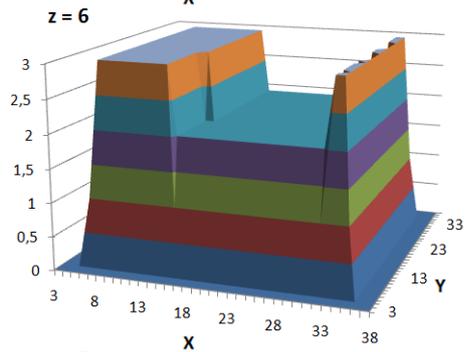
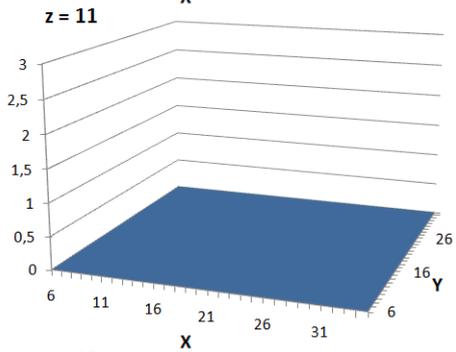
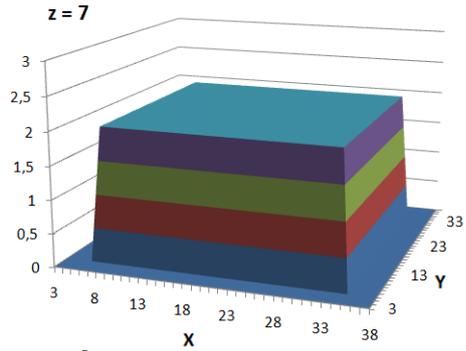
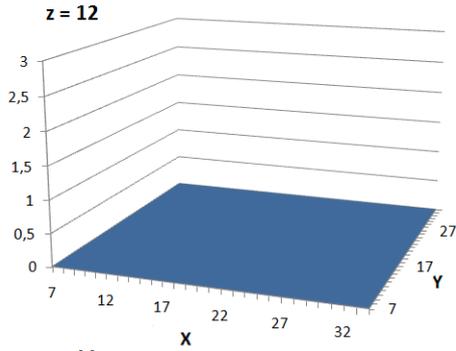


Ilustración 72. Distribución del carbono disuelto remanente. Final periodo posclausura.

La primera conclusión evidente es que el carbono disuelto remanente es varios órdenes de magnitud menor que el carbono sólido remanente. Por ello, los parámetros de control carbono sólido o carbono total en realidad son redundantes ya que, en este caso, las variaciones de carbono disuelto son despreciables frente a las variaciones de carbono sólido.

Una segunda conclusión es que la cantidad de carbono sólido remanente a lo largo de cada capa de vertedero es relativamente homogénea dentro de la capa. Se utiliza el término "relativamente" porque la principal variabilidad se encuentra de unas capas a otras, es decir, a medida que profundizamos en el vertedero el residuo se ha degradado más. Esto no impide que se produzcan variaciones dentro de la capa que son visibles si cambiamos la escala del eje según se puede apreciar en la Ilustración 73.

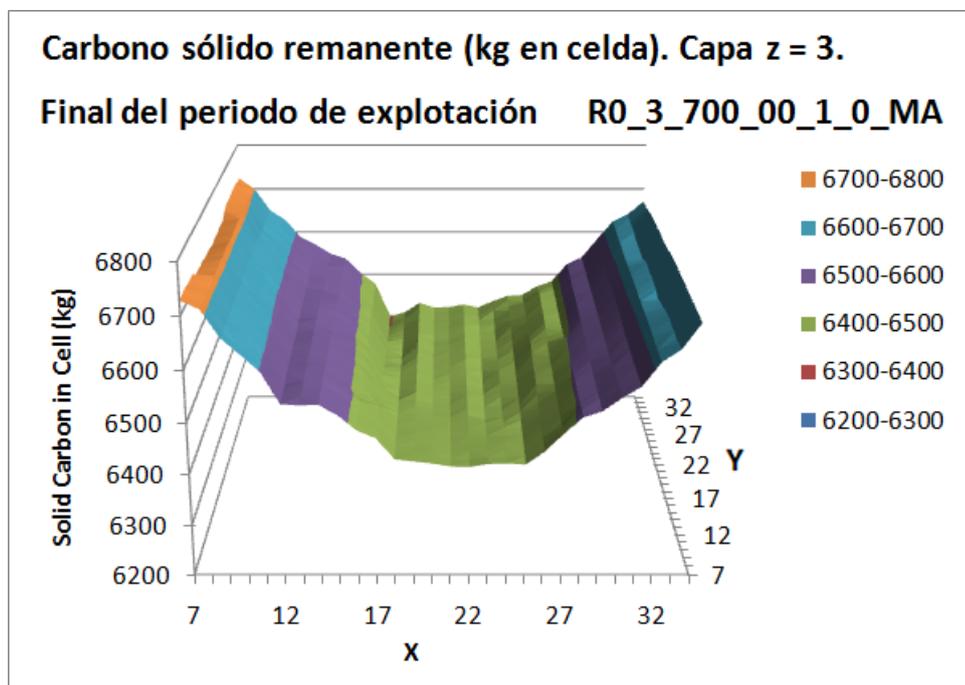


Ilustración 73. Distribución del carbono sólido remanente en la capa z=3.

En dicha Ilustración se aprecia la distribución de carbono sólido remanente al final del periodo de explotación para la capa z = 3. Vemos cómo el orden de llenado según el eje x ha originado una mayor degradación de la zona central debido a que ha estado expuesta a un mayor porcentaje de saturación promedio que los laterales según se comentó anteriormente a la hora de analizar el tamaño de capa sobre la contaminación remanente.

Esta variación, de unos 300 kg de carbono por celda dentro de la capa, es un orden de magnitud menor que la variación de unos 3000 kg de carbono por celda entre la capa z = 3 y la capa z = 12.

Cuanto más nos acercamos a la superficie del vertedero, más contaminación remanente aparece. La causa es, en primer lugar, que el residuo más profundo lleva más tiempo colocado y, en segundo lugar, que el residuo más profundo se ha visto expuesto a la humedad que le han ido aportando periódicamente las capas superiores. Estos dos efectos disminuyen a medida que subimos hacia la superficie del vertedero.

Si el efecto predominante fuera el tiempo que el residuo lleva colocado, sería de esperar que al finalizar el periodo de posclausura, las diferencias del carbono sólido remanente entre diferentes capas se fueran atenuando. Pero ocurre al contrario, que dichas diferencias entre las capas son mayores al final del periodo de posclausura. Esto indica que el efecto predominante es la aportación de humedad que han ido proporcionando las diferentes capas de residuo y al que han estado sometidas el resto de capas ya colocadas con diferente intensidad según su orden de colocación.

En cuanto al carbono disuelto al final del periodo de explotación, se aprecia una clara relación con el orden de colocación de las celdas, según se discutió a la hora de establecer la influencia de la altura de capa en la humedad de saturación. Las gráficas reflejan el efecto de la infiltración vertical de la humedad de la última capa colocada a medida que profundizamos en el vertedero.

A la hora de interpretar las gráficas de carbono disuelto al final del periodo de posclausura es importante apreciar el cambio en la escala utilizada respecto a sus equivalentes al final del periodo de explotación. En el caso del final de la posclausura, el máximo en el eje son 3 kg de carbono disuelto por celda mientras que en las gráficas del final de la explotación era de 45 kg de carbono disuelto por celda. Al final del periodo de posclausura, apenas existe carbono disuelto en el vertedero, en las capas superiores no hay prácticamente nada y en las capas inferiores aparece algo a medida que se profundiza, pero en cualquier caso cantidades despreciables frente a las descritas al final del periodo de explotación.

Es necesario destacar que el presente análisis se ha realizado en un caso concreto donde existe aislamiento superficial durante la explotación, sellado semipermeable durante la posclausura y un clima mediterráneo con muy pocas precipitaciones. El objetivo del mismo es establecer unas ciertas conclusiones generales acerca de la distribución de la contaminación remanente dentro del vertedero (cuantificada por el carbono). Sería interesante un estudio comparativo de dicha distribución en diferentes casos y escenarios simulados en esta tesis, si bien, dicho estudio está fuera del alcance del presente trabajo.

5.2.5. Emisión de metano y generación de energía.

Dentro de este grupo de parámetros de control se incluyeron inicialmente: la cantidad total de gas metano emitida por el vertedero, la cantidad de energía que es posible generar a partir de dicho metano y la emisión de metano residual, sobrante de la producción de energía.

Estos parámetros están relacionados con la contaminación remanente anteriormente discutida, pero no de una forma directa. Los contaminantes biodegradables disueltos pueden llegar a formar gas si da tiempo a que se produzcan las reacciones de metanización. Este hecho dependerá del tiempo de retención en el vertedero de dichos contaminantes, antes de que salgan del mismo como contaminación disuelta en el lixiviado.

De esta manera el metano producido y, por tanto, también la energía aprovechable, dependen por un lado de la cantidad de materia biodegradable disponible y las condiciones “ambientales” (humedad que favorezca la degradación) y por otro lado de la transmisión más o menos rápida del agua y los componentes disueltos que transporta dentro del vertedero.

También es importante destacar que la energía que es posible generar y el metano emitido por el vertedero están relacionados pero no son equivalentes. Para activar la generación de energía es necesario llegar a un cierto umbral de generación de metano. Mientras no se alcance ese umbral, el vertedero puede estar emitiendo metano sin que se genere nada de energía. Además, en los periodos en los que se genera energía, no se consigue un aprovechamiento completo del metano, existiendo unas ciertas pérdidas.

El metano residual pretende reflejar el impacto producido por la emisión de metano en el caso en que se aproveche el mismo para la generación de energía. Estaría formado por las emisiones de metano en los periodos en los que no se alcanza el umbral para generar energía, más las pérdidas de metano inherentes al proceso de generación de energía.

Los coeficientes de determinación en el modelo de regresión lineal sobre el metano residual han sido relativamente bajos (entre 0,60 y 0,86) y dado que dicho parámetro se deriva de los dos anteriores (del metano generado y de su aprovechamiento para la generación de energía), se opta por descartar este último parámetro de control del análisis.

5.2.5.1. Generación de metano.

En cuanto al metano generado, el modelo de regresión lineal establece que la variable de diseño más importante es la cobertura (coeficientes entre 0,52 y 0,77), seguida de la densidad (entre 0,18 y 0,24) y por último el sellado posclausura (entre -0,06 y -0,16).

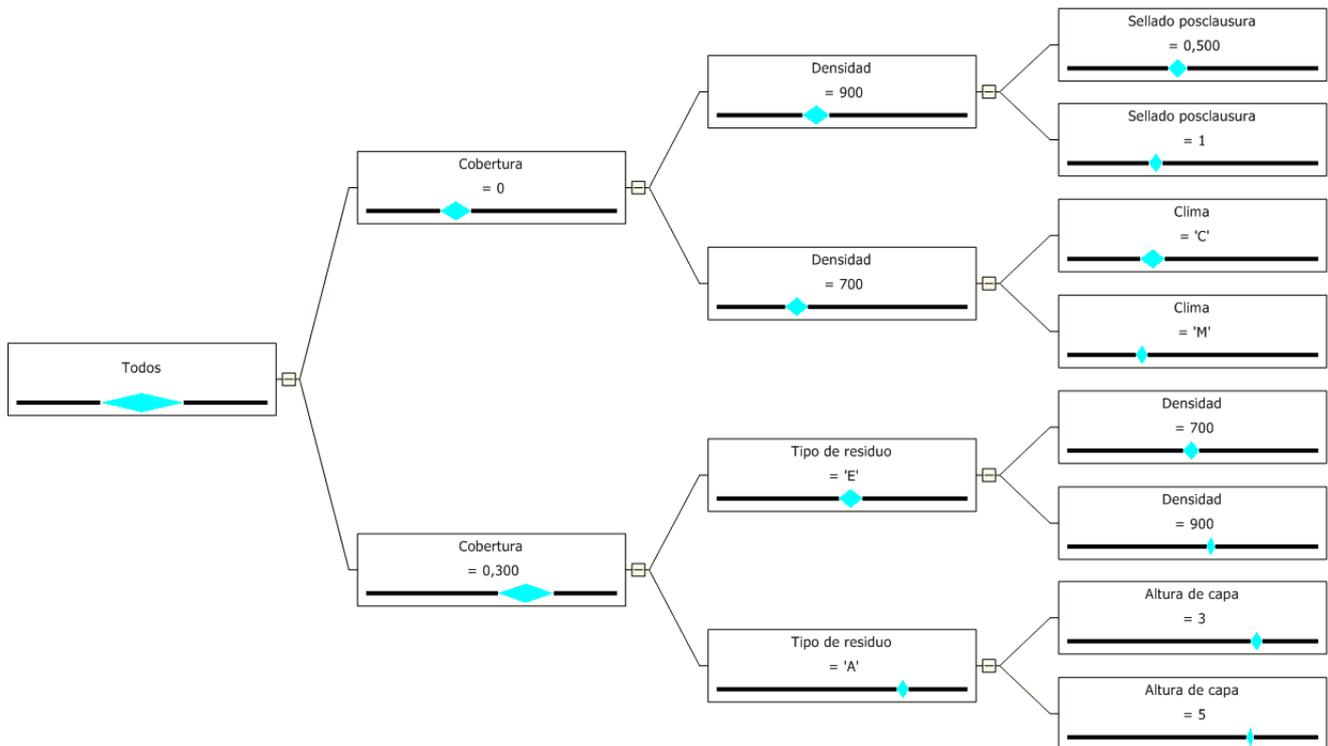


Ilustración 74. Árbol de decisión. CH4Generado.

Estos datos coinciden con el árbol de decisión que se presenta en la Ilustración 74 referente al metano generado por el vertedero. Se aprecia como la cobertura es el parámetro de diseño decisivo para la generación de metano, ya que retiene mucha humedad. Esto tiene un doble efecto. En primer lugar origina un mayor porcentaje de saturación que acelera los procesos de biodegradación y en segundo lugar frena el avance de la humedad y de sus componentes disueltos hacia los sistemas de recolección de lixiviados permitiendo que se genere metano.

Según se aprecia en el ramal correspondiente del árbol, en el caso de que exista cobertura, existe una gran diferencia entre el metano generado por el residuo europeo y el generado por el residuo americano. Este último es mayor debido a la mayor capacidad de degradación que tiene el residuo americano frente al europeo.

Cuando no existe cobertura, la humedad es más baja y además transita sin obstáculos hacia los sistemas de drenaje. En ese caso pasa a adquirir importancia la densidad del residuo. Anteriormente ya se puso de manifiesto que a mayor densidad, mayor porcentaje de saturación de humedad y, por tanto, es más rápida la degradación del residuo. Pero en este caso la densidad también interviene reduciendo la velocidad de circulación del lixiviado.

Por último, aparecen otros factores de menor importancia como, por ejemplo, la altura de capa menor para optimizar una alta generación de metano en casos con cobertura y residuo americano. (En el anterior apartado de contaminación remanente se estableció la influencia tanto de la altura de capa como de la densidad en la capacidad de biodegradación del vertedero). O bien el sellado posclausura y el clima para casos sin cobertura. En climas más secos se genera menos metano y con sellado posclausura impermeable también.

5.2.5.2. Generación de energía.

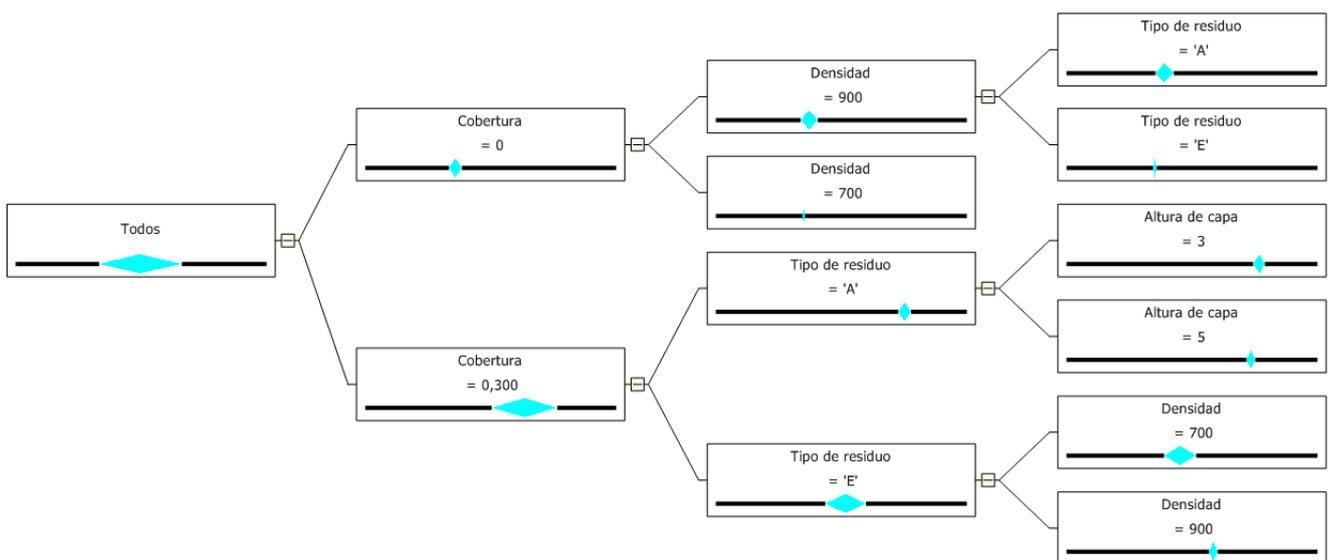


Ilustración 75.Árbol de decisión. EnergíaTotal.

La energía total generada se basa fundamentalmente en la cantidad de metano generado, si bien tiene en cuenta umbrales mínimos de metano necesarios para realizar una generación efectiva de energía y criterios de rendimiento y aprovechamiento del metano en la generación. Por ello, su árbol de decisión presentado en la Ilustración 75 es muy similar al del metano generado salvo algún matiz.

En cuanto a los coeficientes del modelo de regresión, la influencia de la cobertura es alta para el residuo europeo (0,63 y 0,67) y aún mayor para el residuo americano (0,82 y 0,87). El siguiente factor es la densidad (valores entre 0,23 y 0,30) y, por último, aparece el aislamiento superficial (valores entre -0,11 y -0,13). El aislamiento superficial durante la explotación afecta de forma negativa a la capacidad del vertedero de generar energía, si bien, su efecto es pequeño comparado con la densidad y especialmente con la cobertura. Es por ello que no aparece en el árbol de decisión (probablemente apareciera en un quinto nivel). Destaca también el hecho de que, a diferencia de la generación de metano, no aparezca en este caso como factor a tener en cuenta el sellado posclausura.

Las conclusiones que se pueden extraer del árbol de decisión son las siguientes: Sin cobertura se obtiene menos energía y, en todo caso, se puede obtener algo con residuo de tipo americano y densidades altas. Y es que sin cobertura y con bajas densidades se produce el doble efecto de menor retención de humedad y un transporte más rápido de los contaminantes hacia la red de extracción de lixiviados, sin tiempo para su descomposición con formación del gas. Este efecto, de lavado (“flushing”) de los contaminantes para mayores permeabilidades ha sido observado en laboratorio por (Petchsri, y otros 2004).

Con cobertura se obtiene más energía, especialmente con residuo americano. En los casos con cobertura, se puede optimizar la obtención de energía con residuo americano utilizando capas de vertido de menor espesor y en el caso de residuo europeo, con una mayor densidad.

Esta última conclusión referente al residuo de tipo europeo cuando existe cobertura se puede contrastar en la Ilustración 76 donde se muestra el efecto de la densidad para diferentes alturas de capa y diferentes climas.

Por último, en la Ilustración 77, se muestra la evolución de la energía anual generada para diferentes casos. En todos ellos se verifica que la energía se genera durante el periodo de explotación, lo que explica que, a diferencia del caso del metano generado, el sellado posclausura no tenga influencia en la generación de energía.

Se puede apreciar una mayor generación cuando existe cobertura (líneas roja y azul), especialmente con residuo de tipo americano (línea roja), frente a otros casos donde no existe cobertura (línea verde).

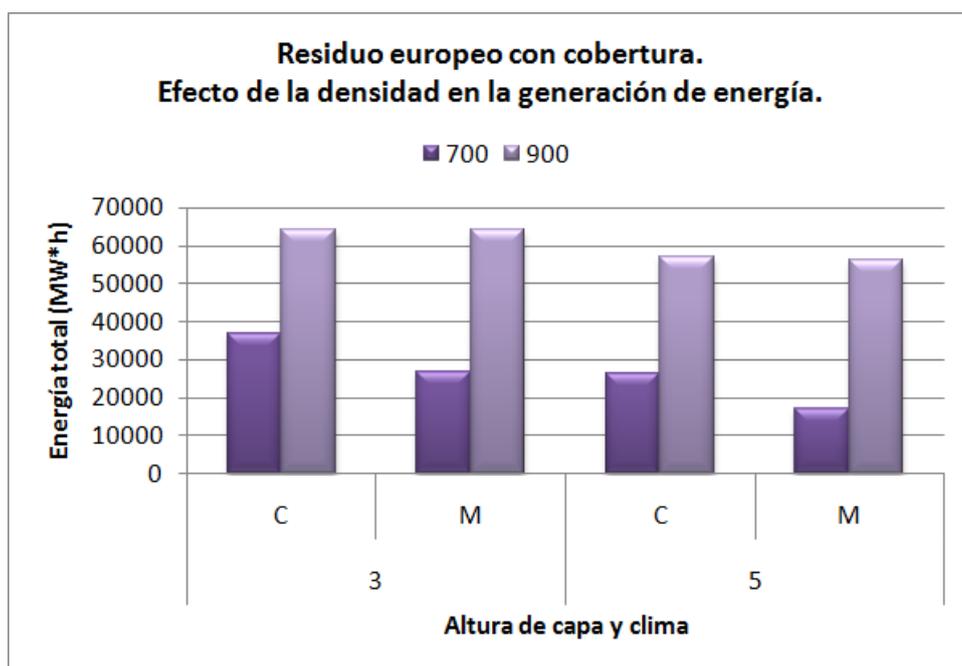


Ilustración 76. Efecto de la densidad en la generación de energía en residuo europeo.

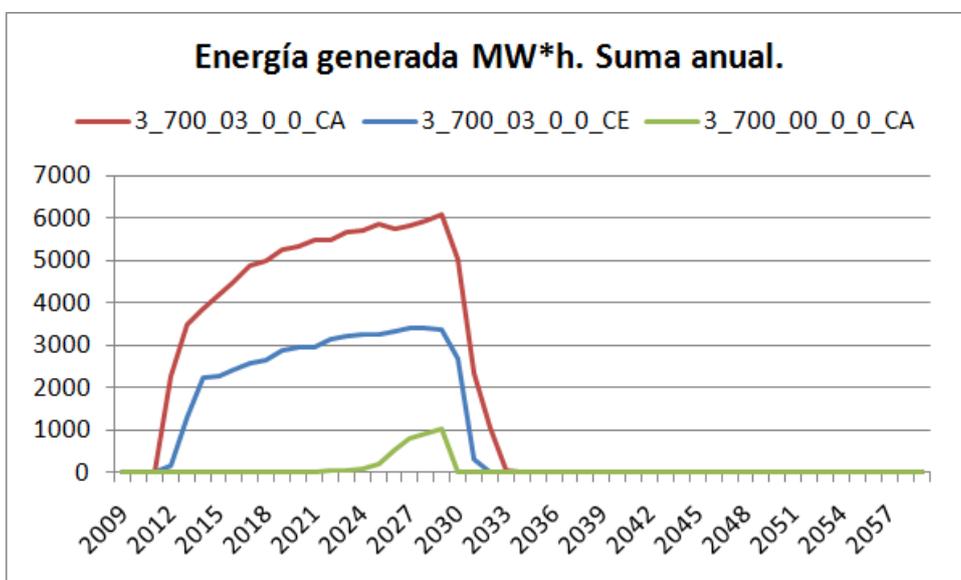


Ilustración 77. Evolución de la energía anual generada en diferentes modelos.

5.2.6. Calidad del lixiviado

Anteriormente se analizó un grupo de parámetros de control correspondientes a la cantidad de lixiviado emitido por el vertedero. En este caso se analizan los parámetros de control correspondientes a la calidad de dicho lixiviado, es decir, a su grado de contaminación.

Inicialmente se contemplaron los siguientes parámetros de control en esta categoría: Carga total de DQO (kg) recogida en los sistemas de recolección de lixiviados durante la explotación, la posclausura y en total. Carga total de NH_4 (kg) recogida en los sistemas de recolección de lixiviados en dichos periodos. Carga máxima mensual (kg) tanto de DQO como de NH_4 durante todo el periodo. Y por último, concentración media mensual máxima (mg/L) tanto de DQO como de NH_4 durante todo el periodo.

Los coeficientes de determinación del modelo de regresión lineal salen muy bajos para los dos últimos parámetros comentados, referentes a concentraciones. En concreto, para residuo de tipo europeo, los valores están entre 0,56 y 0,59. Por ello se descartan dichos parámetros del análisis de resultados.

A continuación, se comenta el efecto de las variables de diseño en la calidad de lixiviado, si bien, parte de la argumentación se fundamenta en lo analizado dentro del grupo de parámetros de contaminación remanente.

Según se expuso anteriormente, cuanto menor es el espesor de la capa de vertido, mayor es la biodegradación del mismo, especialmente en climas mediterráneos donde el aporte de humedad del residuo tiene mayor importancia. Por ello, en el modelo de regresión, los coeficientes para la altura de capa son positivos (entre 0,09 y 0,16); a mayor altura de capa, mejor calidad del lixiviado (menos contaminado). Esto ocurre principalmente para clima mediterráneo y su efecto no es apreciable más allá del periodo de explotación.

El caso de la densidad también se ha comentado. Como norma general, a mayor densidad mayor degradación del residuo ya que el porcentaje de saturación del mismo es mayor. De esta forma, los coeficientes de regresión son negativos (entre -0,10 y -0,28) indicando que a mayor densidad, peor calidad de lixiviado (más contaminado está).

El efecto de la cobertura no es tan grande como cabría esperar. Esto ocurre porque la cobertura tiene dos efectos que se amortiguan mutuamente. En primer lugar la cobertura reduce el flujo de lixiviados, es decir, el volumen total de lixiviados generados. Desde este punto de vista, la cantidad de contaminantes generada por el vertedero se ve también reducida.

Por otro lado la cobertura, al retener humedad, origina una mayor degradación del residuo. Desde este punto de vista, la contaminación generada por el vertedero se ve incrementada. De este balance obtenemos unos coeficientes de regresión negativos para la cobertura de entre (-0,08 y -0,34) lo que implica que la presencia de cobertura origina una mayor contaminación por lixiviados.

Se aprecia aquí el doble efecto de la cobertura. Por un lado potencia la generación de biogás y reduce la contaminación remanente. Por otro genera una mayor contaminación en los lixiviados. Este efecto ocurre también en otros casos y una opción para atenuarlo es controlar el líquido que entra al vertedero e ir reintroduciendo el lixiviado recogido para que los componentes se degraden dentro. Esto permite no solo facilitar la descomposición del residuo sino también el tratamiento del lixiviado (Pohland, Cross, y otros 1992) y (Sanin y Barlaz 1998).

El aislamiento durante la explotación es el factor más determinante en la contaminación emitida por el vertedero durante el periodo de explotación (coeficientes entre 0,50 y 0,70) mientras que el sellado posclausura es el factor más importante durante el periodo posclausura (coeficientes entre 0,34 y 0,54) ambos reduciendo la contaminación.

Un dato curioso es que la presencia de aislamiento durante la explotación causa un efecto negativo en el periodo posclausura en climas cantábricos (coeficientes -0,15 a -0,17). Esto tiene su justificación en que si el vertedero está aislado durante la explotación, no existe mucho flujo vertical de agua que arrastre los contaminantes originados por la biodegradación quedando estos retenidos dentro del vertedero. Si en ese mismo caso, no existe sellado posclausura y el vertedero se encuentra en clima húmedo, dichos contaminantes retenidos serán emitidos en el periodo de posclausura de forma que el aislamiento durante la explotación habrá ejercido una influencia negativa.

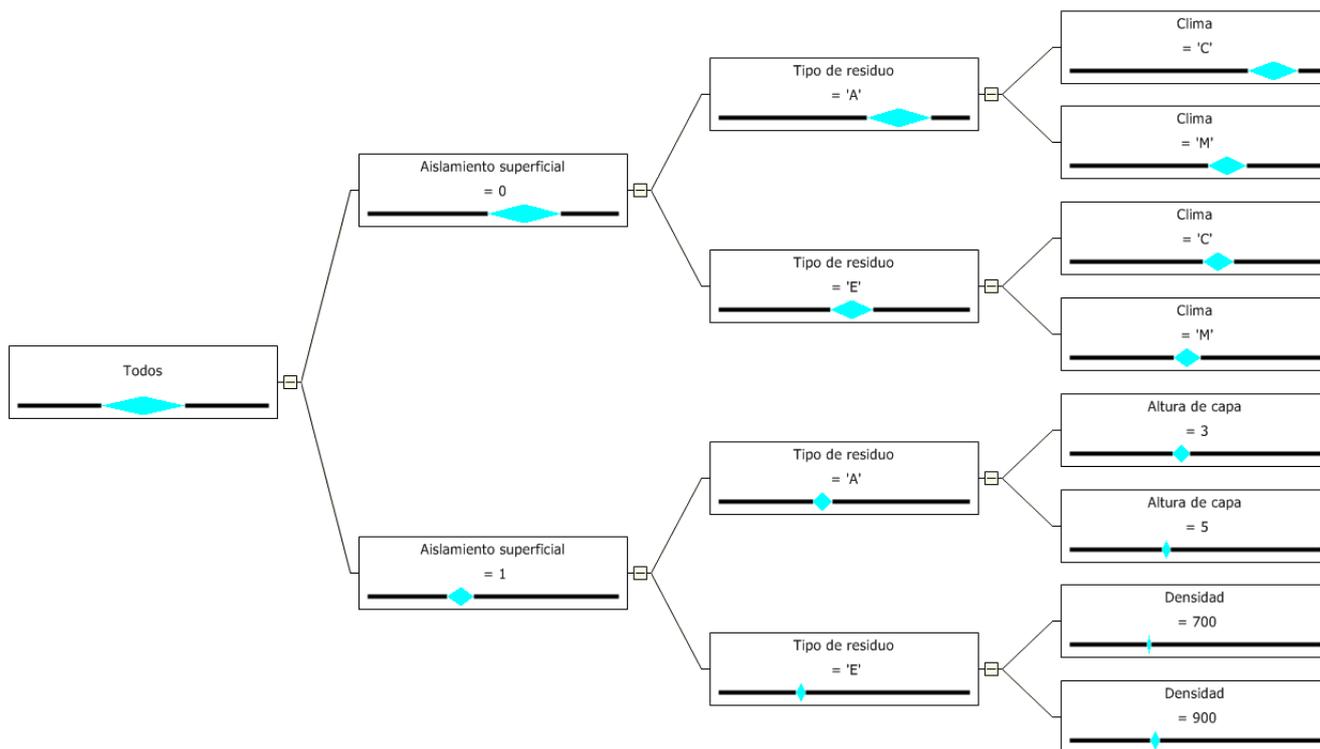


Ilustración 78. Árbol de decisión. CODTotalExp.

En la Ilustración 78 se presenta el árbol de decisión correspondiente a la DQO total emitida durante el periodo de explotación. Se aprecia claramente que la variable de diseño más influyente es el aislamiento superficial. Con aislamiento superficial, la emisión de contaminación es menor mientras que sin él es mayor y además presenta más variabilidad.

Cuando existe aislamiento superficial durante la explotación, no existe infiltración superficial por precipitaciones, y el principal aporte de humedad al vertedero es a través del residuo que se coloca. Por ello el siguiente factor en importancia es el tipo de residuo. El residuo americano, aparte de estar más húmedo, tiene mayor capacidad de biodegradación.

Como se comentó anteriormente, la altura de capa menor, facilita una mayor degradación, especialmente con el residuo americano que tiene más humedad. Para el residuo europeo, una mayor densidad produce más degradación. En ambos casos (menor capa o mayor densidad) se produce una mayor contaminación en el lixiviado.

Volviendo a los primeros nodos del árbol y centrando la atención en el caso en el cual no existe aislamiento superficial, debido a la infiltración superficial de la precipitación, la degradación del residuo va a ser mayor y los flujos verticales de humedad van a producir un mayor arrastre de los contaminantes. Por ello el siguiente factor en importancia es el tipo de residuo, con una diferenciación más acusada que en el caso con aislamiento superficial. Al existir mayor degradación, las diferencias entre el residuo europeo y el americano se hacen más acusadas.

Por último, el efecto que completa el ramal sin aislamiento es el clima. En climas húmedos, existe mayor infiltración superficial y por consiguiente mayor degradación y mayor arrastre de contaminación. De nuevo se puede apreciar que dicho efecto es mayor para el residuo de tipo americano que tiene una mayor capacidad de degradación y que, como se vio con anterioridad, al degradarse más permite un mayor flujo vertical de humedad.

Cuando se han comentado los coeficientes de regresión, se han identificado los efectos de variables de diseño que no aparecen en el árbol de decisión presentado. Es necesario hacer notar que en dicho árbol de decisión, en dos de los niveles aparece el tipo de residuo y el clima. Estos, no son variables de diseño, sino más bien escenarios (especialmente para el modelo de regresión lineal). Para mostrar las otras variables de diseño en el árbol hubiera sido necesario generar éste con más niveles. No ha sido el caso ya que se utilizan los dos mecanismos de análisis (regresión lineal y árboles de decisión) como métodos complementarios.

El árbol de decisión correspondiente al NH_4 total emitido durante el periodo de explotación, se puede consultar en el Anexo III, donde se incluyen todos los árboles generados. Su única diferencia con el árbol de la DQO es la aparición del efecto de la cobertura (en lugar del clima) en el caso sin aislamiento, para tipo de residuo americano. Por lo demás son idénticos.

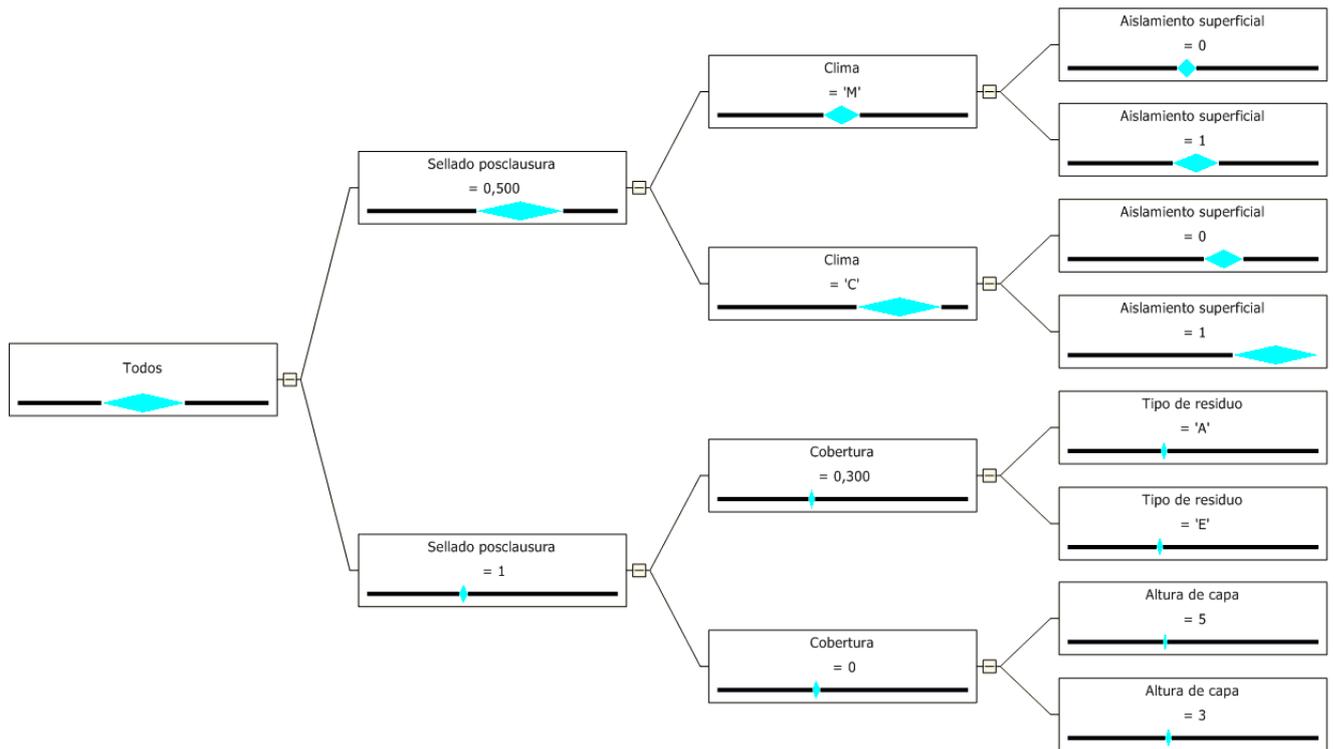


Ilustración 79. Árbol de decisión. CODTotalPos.

En cuanto al periodo de posclausura, en la Ilustración 79 se presenta el árbol de decisión correspondiente para la DQO total emitida. La variable de diseño más importante es el sellado posclausura. Cuando existe sellado posclausura impermeable, no hay infiltración superficial y la DQO emitida es prácticamente la misma en todos los casos. Esto se puede apreciar en los diamantes azules del árbol de decisión que marcan la media y la variabilidad de los nodos, siendo esta última mínima.

Con sellado posclausura impermeable, aunque su efecto es mínimo, la cobertura origina un ligero descenso de la contaminación por su capacidad para retener agua. Y así mismo el tipo de residuo europeo y la altura de capa de 5 m también originan ligeros descensos de la contaminación emitida. El efecto de la altura de capa, es probablemente diferido del periodo de explotación, donde una menor altura de capa originó una mayor degradación.

Analizando ahora el caso de sellado posclausura semipermeable, se observa cómo existe una gran variabilidad en los casos. El hecho de que exista una cierta infiltración superficial hace que el clima pase a ser un factor importante. Con climas húmedos como el cantábrico, se produce mayor infiltración superficial y esta infiltración potencia la biodegradación y arrastra los compuestos contaminantes presentes en el residuo y ya degradados.

Es curioso que el tercer factor en importancia sea el aislamiento superficial durante la explotación (principalmente en climas húmedos). Cuando existe aislamiento superficial durante la explotación, al no haber infiltración, se produce menos degradación durante ese periodo, y la materia degradada, no es arrastrada fuera del vertedero. Por ello, todo ese potencial de degradación y toda esa materia degradada y no expulsada pasan a contaminar durante el periodo de posclausura, donde el sellado semipermeable permite una cierta infiltración.

El árbol de decisión correspondiente al NH_4 total emitido durante el periodo de posclausura es equivalente al de la DQO y por lo tanto asume los comentarios realizados para este último.

Los árboles de decisión correspondientes a la DQO y al NH_4 total durante el periodo completo no son más que agregaciones de los efectos analizados para cada uno de los periodos de explotación y de posclausura y no se estima conveniente volver a repetirlos.

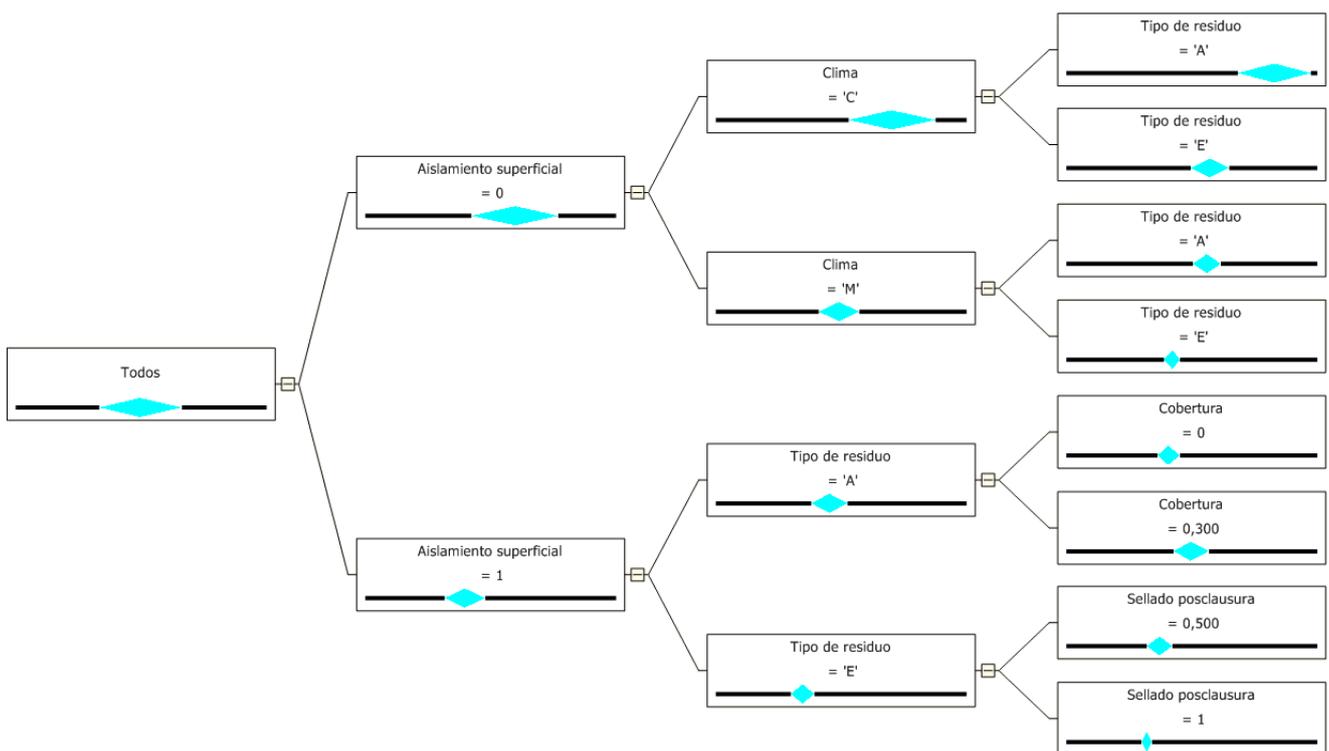


Ilustración 80. Árbol de decisión. CODMaxMes.

Por último, en la Ilustración 80, se presenta el árbol de decisión para el máximo mensual de DQO emitido por el vertedero. Este parámetro intenta medir el grado de variabilidad en la emisión de contaminación en el lixiviado y su árbol de decisión es equivalente al del máximo mensual de NH_4 emitido.

Se aprecia cómo el clima cantábrico y el residuo de tipo americano son escenarios que favorecen mayores máximos. En cuanto a variables de diseño, el aislamiento superficial es la variable más importante ya que su presencia disminuye considerablemente los máximos que se obtienen. En un segundo nivel aparece la cobertura, que para casos con aislamiento superficial y residuo americano induce a mayores máximos y también el sellado posclausura impermeable que para casos con aislamiento superficial y residuo europeo reduce los máximos.

5.2.7. Recirculación de lixiviados.

El análisis de datos realizado con anterioridad ha tenido en cuenta solamente modelos en los cuales no se realizaba ningún tipo de recirculación. Se hace un tratamiento especial de la variable de diseño recirculación debido a sus características, según se explicará en el presente apartado.

Recordando las características del sistema de recirculación, se utiliza una balsa de lixiviados que recibe las aportaciones del sistema de drenaje y de la escorrentía superficial conectada del vertedero, con una capacidad máxima de 80.000.000 m³. Esa capacidad tan sobredimensionada garantiza que la balsa no se llene a lo largo de los periodos simulados y que exista volumen almacenado suficiente para recircular lo máximo posible, de acuerdo con los criterios seleccionados.

Se evalúan dos sistemas de recirculación. El primero consiste en una recirculación por riego superficial realizado diariamente sobre la capa superficial de residuo (exceptuando la primera capa que se coloca) a lo largo del periodo de explotación del vertedero. Se establece un flujo máximo de recirculación por celda de 1 m³/día y un flujo máximo de recirculación global de 640 m³/día. Así mismo, no se realiza recirculación por riego cuando existe escorrentía superficial en el vertedero.

En el segundo sistema, se aplica una recirculación por pozos consistente en 36 pozos con distribución uniforme, con una separación de 30 a 40 m entre ellos. Dichos pozos arrancan en la tercera capa de residuo vertida y llegan a la superficie del vertedero con un radio de 0,15 m y una superficie lateral perforada del 30 %. Se aplica la recirculación diariamente, tanto en el periodo de explotación como en el de posclausura. Se establece un flujo máximo de recirculación por pozo de 250 m³/día y un flujo máximo de recirculación global de 99.999 m³/día.

Con estos criterios se realizaron las simulaciones de todos los casos aplicando recirculación por riego y recirculación por pozos de forma independiente. Como ya se comentó anteriormente, para la generación de los modelos de regresión lineal, se crean dos variables de diseño: Riego y Pozos que pueden tomar los valores de 0 ó 1. Excluyendo los casos en los que aparece simultáneamente aislamiento durante la explotación y recirculación con riego superficial (que aunque se simularon no se tienen en cuenta en el análisis), se obtienen los modelos de regresión para cada uno de los parámetros de control incluyendo las dos nuevas variables de diseño: Riego y Pozos.

Los coeficientes de regresión de dichas variables obtenidos en cada escenario se presentan en la Tabla 39 para cada uno de los parámetros de control.

	Riego superficial				Pozos			
	CE	CA	ME	MA	CE	CA	ME	MA
Vtotal	-0,06	-0,04	-0,02	-0,02	-0,29	-0,35	-0,31	-0,36
VTotExp	-0,17	-0,13	-0,09	-0,10	-0,24	-0,28	-0,29	-0,32
VTotPos	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,32	-0,37	-0,31	-0,37
VMaxDia	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,05	-0,16	-0,15	-0,23
VMaxMes	-0,24	-0,15	-0,23	-0,15	-0,15	-0,24	-0,24	-0,31
CODTotal	-0,15	-0,07	-0,10	-0,08	-0,36	-0,25	-0,38	-0,28
CODTotalExp	-0,34	-0,34	-0,36	-0,43	-0,22	-0,35	-0,34	-0,41
CODTotalPos	-0,05	-0,03	-0,02	-0,03	-0,33	-0,23	-0,36	-0,26
CODMaxMes	-0,41	-0,20	-0,39	-0,29	-0,29	-0,23	-0,33	-0,28
NH4Total	-0,13	-0,06	-0,09	-0,07	-0,33	-0,23	-0,36	-0,26
NH4TotalExp	-0,32	-0,32	-0,36	-0,45	-0,18	-0,29	-0,28	-0,34
NH4TotalPos	-0,05	-0,03	-0,02	-0,03	-0,32	-0,21	-0,35	-0,24
NH4MaxMes	-0,33	-0,15	-0,30	-0,25	-0,28	-0,20	-0,30	-0,23
CH4Generado	0,03	-0,01	0,03	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01
EnergiaTotal	0,06	0,02	0,05	0,03	0,05	0,01	0,05	0,01
MinSett	0,02	0,02	0,01	0,02	-0,09	-0,07	-0,07	-0,07
MaxSett	0,02	0,02	0,02	0,02	0,10	0,12	0,12	0,14
AvgSett	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,02
AvgSettExp	0,02	0,02	0,01	0,02	-0,01	0,01	0,00	0,01
DiffSett	-0,01	-0,01	-0,04	-0,02	-0,50	-0,40	-0,52	-0,45
SolidCarExp	0,07	0,06	0,05	0,07	0,03	0,02	0,03	0,02
TotalCarExp	0,07	0,06	0,05	0,07	0,03	0,02	0,03	0,02
SolidCarPos	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02
TotalCarPos	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02
FinalCellNH4	-0,03	-0,01	-0,19	-0,21	-0,01	0,02	0,00	0,04
HumedadMax	-0,06	-0,05	-0,01	-0,03	-0,07	-0,04	-0,07	-0,05
HumedadFinal	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,08	-0,05	-0,07	-0,06

Tabla 39. Coeficientes de regresión para las variables de diseño Riego y Pozos.

Un primer análisis de los coeficientes de regresión muestra que la recirculación, ya sea por riego o por pozos, tiene una clara influencia en la cantidad de lixiviado emitido y en su correspondiente contaminación. Este era un resultado esperado ya que, cuando existe recirculación, el lixiviado emitido por el vertedero se vuelve a introducir en el mismo creando un circuito. Desde este punto de vista, no es comparable la cantidad de lixiviado emitida cuando no existe recirculación con el lixiviado emitido cuando sí existe dado que en este último caso, el mismo lixiviado se recircula contabilizándose de forma cíclica.

Sin recirculación, los grupos de parámetros de control referidos a lixiviado emitido y contaminación del mismo tenían sentido en cuanto que se vinculaban a la necesidad de tratar dicho lixiviado emitido. Cuando existe recirculación, la importancia del lixiviado emitido no está ya tanto en su tratamiento, como en su almacenamiento y coste de recirculación. El tratamiento, en todo caso, iría vinculado al lixiviado que quedara almacenado en la balsa al final de periodo.

En base a estos argumentos, en el caso de la recirculación no se van a analizar los parámetros de control referentes a los grupos de cantidad de lixiviado y calidad del lixiviado.

Respecto a los cuatro grupos de parámetros restantes (generación de energía, contaminación remanente, asientos y cantidad de agua en el vertedero) se puede observar la poca influencia que ejerce la recirculación (según los coeficientes de regresión correspondientes, que son bastante pequeños). Se aprecia cómo la recirculación favorece la generación de energía, disminuye la contaminación remanente, aumenta la humedad máxima alcanzada en el vertedero y favorece los asientos (esto último, especialmente los pozos). Pero aun así, no parece razonable un efecto tan leve de la recirculación en estos parámetros de control.

La recirculación, tal y como se ha presentado al inicio de este apartado, se ha modelizado definiendo unas condiciones de contorno como el número y ubicación de los pozos, la frecuencia con la que se realiza, unos ciertos límites de caudal recirculado, etc. Dichas condiciones de contorno definen cómo se va a realizar la recirculación, pero no definen el grado de influencia que va a tener la recirculación en el vertedero. Una misma recirculación (entendiendo como tal aquella en la cual se fijan esas condiciones de contorno) va a tener un grado de influencia muy diferente dependiendo del resto de variables de diseño. Por ejemplo, aunque corresponda recircular, si el terreno alrededor de los pozos para un caso o en la superficie para otro está saturado o cerca de la saturación, no será posible la recirculación. Este hecho dependerá de otras variables de diseño como la densidad del residuo o la presencia o ausencia de cobertura.

Enfocado desde otro punto de vista, si bien la variable de diseño compactación del residuo o densidad es independiente del resto, es decir, cuando se plantea una densidad de 700 kg/m^3 , el residuo se coloca con esa densidad independientemente del resto de variables de diseño. O bien cuando se establece una altura de capa de 3 m, el residuo se coloca en capas de esa altura independientemente del resto de variables de diseño. Al referirse a la recirculación, el grado o cantidad de recirculación no depende solamente de las condiciones de contorno asignadas al modelo de recirculación, sino de la combinación del resto de variables de diseño.

Se puede afirmar, por tanto, que la recirculación tal y como se ha modelizado, es una variable de diseño dependiente del resto. Por ello la metodología de análisis planteada en este trabajo, basada en modelos de regresión lineal múltiple y árboles de decisión, no es la más adecuada para dicha variable. Los modelos de regresión lineal múltiple funcionan correctamente cuando las variables predictoras son independientes entre sí.

A continuación, en la Tabla 40 y en la Tabla 41 se muestran los volúmenes totales de lixiviado recirculado en cada uno de los modelos tanto para la recirculación por riego, como para la recirculación por pozos.

Modelo	Riego (m ³)	Pozos (m ³)	Modelo	Riego (m ³)	Pozos (m ³)
3_700_00_0_0_CA	3.172.376	29.603.386	3_900_00_0_0_CA	2.992.062	5.350.072
3_700_00_0_0_CE	3.211.256	15.559.262	3_900_00_0_0_CE	3.054.538	3.151.550
3_700_00_0_0_MA	2.892.370	29.615.486	3_900_00_0_0_MA	2.829.176	5.347.311
3_700_00_0_0_ME	1.963.583	15.579.779	3_900_00_0_0_ME	2.302.318	3.152.098
3_700_00_0_1_CA	2.557.293	29.624.501	3_900_00_0_1_CA	2.446.224	5.349.736
3_700_00_0_1_CE	2.585.665	15.629.201	3_900_00_0_1_CE	2.492.622	3.154.112
3_700_00_0_1_MA	2.992.813	29.617.573	3_900_00_0_1_MA	2.819.141	5.346.810
3_700_00_0_1_ME	1.995.520	15.702.282	3_900_00_0_1_ME	2.320.856	3.152.772
3_700_00_1_0_CA		29.590.558	3_900_00_1_0_CA		5.346.134
3_700_00_1_0_CE		15.471.478	3_900_00_1_0_CE		3.147.335
3_700_00_1_0_MA		29.609.885	3_900_00_1_0_MA		5.345.990
3_700_00_1_0_ME		15.569.401	3_900_00_1_0_ME		3.150.103
3_700_00_1_1_CA		29.611.777	3_900_00_1_1_CA		5.346.111
3_700_00_1_1_CE		15.624.152	3_900_00_1_1_CE		3.149.868
3_700_00_1_1_MA		29.611.876	3_900_00_1_1_MA		5.345.560
3_700_00_1_1_ME		15.610.718	3_900_00_1_1_ME		3.150.727
3_700_03_0_0_CA	3.268.228	9.505.248	3_900_03_0_0_CA	3.139.714	797.330
3_700_03_0_0_CE	3.304.733	6.719.015	3_900_03_0_0_CE	3.189.579	409.747
3_700_03_0_0_MA	1.800.382	9.347.104	3_900_03_0_0_MA	1.921.846	835.683
3_700_03_0_0_ME	1.069.614	7.474.444	3_900_03_0_0_ME	1.569.424	418.492
3_700_03_0_1_CA	2.741.805	9.422.740	3_900_03_0_1_CA	2.700.754	809.735
3_700_03_0_1_CE	2.766.650	7.553.121	3_900_03_0_1_CE	2.742.534	412.971
3_700_03_0_1_MA	1.763.613	9.346.898	3_900_03_0_1_MA	1.894.721	765.410
3_700_03_0_1_ME	1.050.206	7.372.183	3_900_03_0_1_ME	1.543.731	418.097
3_700_03_1_0_CA		9.376.918	3_900_03_1_0_CA		771.105
3_700_03_1_0_CE		6.583.056	3_900_03_1_0_CE		419.675
3_700_03_1_0_MA		9.500.387	3_900_03_1_0_MA		772.392
3_700_03_1_0_ME		3.349.246	3_900_03_1_0_ME		423.939
3_700_03_1_1_CA		9.396.846	3_900_03_1_1_CA		857.715
3_700_03_1_1_CE		4.740.940	3_900_03_1_1_CE		424.403
3_700_03_1_1_MA		9.391.161	3_900_03_1_1_MA		814.110
3_700_03_1_1_ME		2.692.647	3_900_03_1_1_ME		423.267

Tabla 40. Volumen total recirculado (m³) según modelo. Parte 1.

Modelo	Riego (m ³)	Pozos (m ³)	Modelo	Riego (m ³)	Pozos (m ³)
5_700_00_0_0_CA	3.149.219	40.299.477	5_900_00_0_0_CA	2.673.592	8.054.141
5_700_00_0_0_CE	3.226.632	24.588.407	5_900_00_0_0_CE	2.743.310	5.149.558
5_700_00_0_0_MA	3.402.125	40.316.694	5_900_00_0_0_MA	2.990.109	8.048.882
5_700_00_0_0_ME	2.415.380	24.600.879	5_900_00_0_0_ME	2.822.667	5.147.617
5_700_00_0_1_CA	2.847.700	40.318.549	5_900_00_0_1_CA	2.284.814	8.065.885
5_700_00_0_1_CE	2.917.635	24.607.070	5_900_00_0_1_CE	2.346.971	5.156.272
5_700_00_0_1_MA	3.154.359	40.313.799	5_900_00_0_1_MA	2.666.518	8.062.397
5_700_00_0_1_ME	2.458.669	24.605.404	5_900_00_0_1_ME	2.732.630	5.155.442
5_700_00_1_0_CA		40.298.223	5_900_00_1_0_CA		8.051.251
5_700_00_1_0_CE		24.574.645	5_900_00_1_0_CE		5.148.049
5_700_00_1_0_MA		40.318.403	5_900_00_1_0_MA		8.048.588
5_700_00_1_0_ME		24.596.697	5_900_00_1_0_ME		5.147.496
5_700_00_1_1_CA		40.317.674	5_900_00_1_1_CA		8.063.223
5_700_00_1_1_CE		24.593.441	5_900_00_1_1_CE		5.155.012
5_700_00_1_1_MA		40.315.560	5_900_00_1_1_MA		8.062.166
5_700_00_1_1_ME		24.601.214	5_900_00_1_1_ME		5.155.113
5_700_03_0_0_CA	2.774.489	27.438.711	5_900_03_0_0_CA	2.579.005	1.126.522
5_700_03_0_0_CE	2.837.814	10.555.479	5_900_03_0_0_CE	2.652.735	913.455
5_700_03_0_0_MA	2.159.391	27.451.681	5_900_03_0_0_MA	2.345.046	1.151.662
5_700_03_0_0_ME	1.339.532	10.641.252	5_900_03_0_0_ME	1.899.619	921.564
5_700_03_0_1_CA	2.299.735	27.448.089	5_900_03_0_1_CA	2.190.440	1.124.700
5_700_03_0_1_CE	2.352.347	10.724.372	5_900_03_0_1_CE	2.251.299	918.902
5_700_03_0_1_MA	2.007.010	27.453.401	5_900_03_0_1_MA	2.202.655	1.139.414
5_700_03_0_1_ME	1.307.908	10.748.252	5_900_03_0_1_ME	1.821.419	921.234
5_700_03_1_0_CA		27.437.141	5_900_03_1_0_CA		1.179.217
5_700_03_1_0_CE		10.473.138	5_900_03_1_0_CE		924.206
5_700_03_1_0_MA		27.443.214	5_900_03_1_0_MA		1.183.614
5_700_03_1_0_ME		9.901.324	5_900_03_1_0_ME		930.512
5_700_03_1_1_CA		27.448.273	5_900_03_1_1_CA		1.176.880
5_700_03_1_1_CE		10.612.710	5_900_03_1_1_CE		924.831
5_700_03_1_1_MA		27.444.898	5_900_03_1_1_MA		1.195.274
5_700_03_1_1_ME		8.732.324	5_900_03_1_1_ME		932.111

Tabla 41. Volumen total recirculado (m³) según modelo. Parte 2.

Se han omitido los casos de aislamiento superficial durante la explotación con recirculación por riego superficial porque carecen de sentido.

Se aprecia cómo los volúmenes de lixiviado recirculado son muy heterogéneos a pesar de que el modelo y las condiciones de recirculación son las mismas. Esto demuestra la dependencia de la variable recirculación tal y como se ha modelizado del resto de variables de diseño.

Como ejemplo de esta dependencia se presenta la Ilustración 81 en la cual se muestra la influencia de la densidad, la cobertura y la altura de capa en el volumen total recirculado por pozos. Se representa la media de los casos de cada serie.

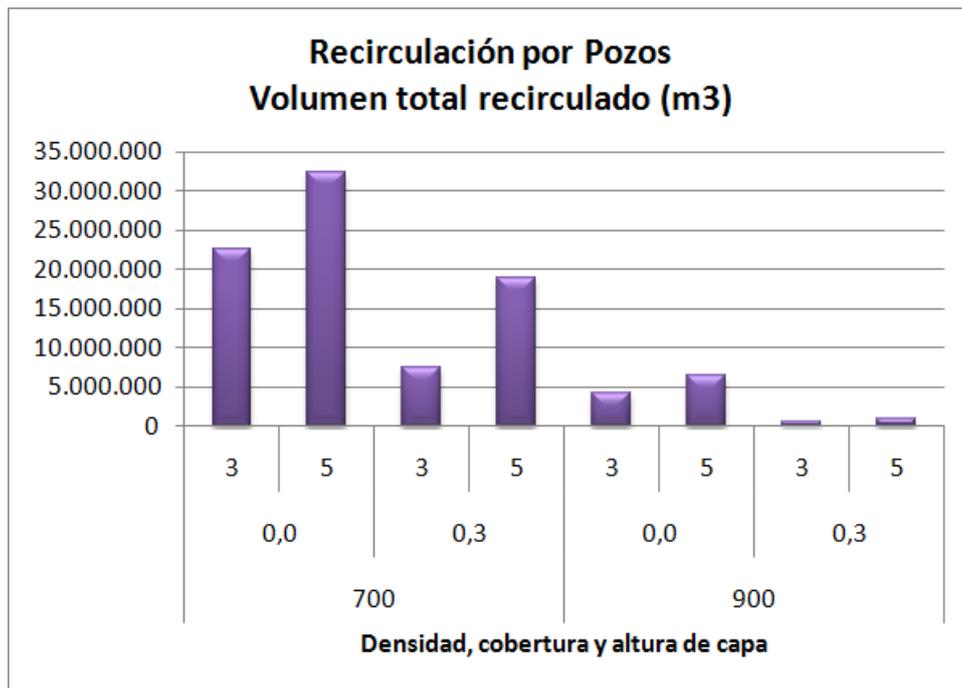


Ilustración 81. Recirculación por pozos. Influencia de las variables de diseño en el volumen recirculado.

Aunque el análisis de datos basado en regresión lineal múltiple y árboles de decisión no sea aplicable, la metodología basada en la simulación de los diferentes modelos de vertedero sigue resultando de utilidad para obtener conclusiones respecto a la influencia de la recirculación en los parámetros de control. La única desventaja es que el análisis de los datos se realizará de una forma menos sistemática que con los modelos de análisis propuestos. Será necesario representar los datos de forma gráfica para interpretar los resultados en cada uno de los contextos.

Se propone para trabajos futuros un análisis detallado de los procesos de cálculo de recirculación implementados en Moduelo v4 y de los resultados del presente trabajo relativos a los mismos. Además es necesario buscar mecanismos que permitan analizar estos resultados de forma sistemática y extraer conclusiones tanto en el caso de la recirculación como en otras variables dependientes que se pretenda estudiar.

Capítulo 6. Conclusiones

6.1. Principales aportaciones

6.1.1. Metodología y herramientas

Una de las principales aportaciones de este trabajo es **un método** para el estudio de las variables de diseño de los vertederos de residuos sólidos, incluyendo las diferentes herramientas y técnicas necesarias para ponerlo en práctica. En algún caso, seleccionadas después de evaluar varias alternativas, en otros casos, creadas expresamente para cumplir con los requisitos necesarios.

En el caso del software de simulación se ha creado un nuevo programa a partir de modelos y procesos de cálculo heredados. Para la plataforma de simulación se han realizado las adaptaciones necesarias para la utilización del supercomputador Altamira. Para el análisis de resultados, después de analizar varias técnicas estadísticas y de minería de datos, se ha optado por los modelos de regresión lineal múltiple y los árboles de decisión.

Las piezas que constituyen el método propuesto se pueden sustituir por otras sin que ello afecte al resto de procesos. Por ejemplo, dentro del software de simulación se puede cambiar el modelo matemático empleado para el cálculo de asentamientos por otro, como plataforma de simulación se puede utilizar computación en la nube en lugar del supercomputador Altamira, o bien se pueden incorporar herramientas de análisis de datos adicionales en la fase final del proceso.

En cuanto al **software de simulación**, existen múltiples programas para la simulación de aspectos concretos de un vertedero, pero muy pocos contemplan de forma integrada todos los procesos que tienen lugar en él. De entre aquellos que los contemplan, Moduelo v3 es la opción más consolidada y contrastada en escenarios reales.

No obstante, Moduelo v3 no reúne los requisitos necesarios para este trabajo básicamente por dos aspectos: en primer lugar, no está preparado para gestionar grandes volúmenes de datos y simulaciones de manera eficiente y, en segundo lugar, presenta problemas de estabilidad en su manejo.

Otra de las aportaciones de este trabajo es la aplicación del índice de mantenibilidad como indicador objetivo de la necesidad de reconstruir un programa de simulación desde cero en lugar de continuar modificando el código existente.

Un índice de mantenibilidad de 40 para todo el programa y 36 para el motor de simulación en una escala corregida de 0 a 100 es el mejor indicador objetivo de la entropía de código en Moduelo v3 fruto de su evolución a lo largo de los años. Este hecho, contrastado de forma subjetiva, originó la necesidad de crear un nuevo programa heredero de los procesos y cálculos matemáticos de Moduelo v3 que mejorara todos los aspectos necesarios del mismo.

Se ha diseñado y desarrollado Moduelo v4. Este nuevo programa tiene un índice de mantenibilidad promedio para todo el programa de 80 y para el motor de simulación de 86.

Dentro de las **aportaciones del nuevo programa** Moduelo v4 cabe destacar:

- El modelo entidad-relación diseñado para representar un vertedero, su explotación a lo largo de tiempo y los procesos físicos y biológicos que en él tienen lugar. Dicho modelo teórico ideal es de utilidad con independencia de una implementación física concreta, como por ejemplo, en la base de datos que sirve de soporte a Moduelo v4.
- La facilidad para gestionar un gran volumen de modelos y simulaciones de forma integrada gracias a la incorporación de tecnologías avanzadas de interface de usuario y a un diseño orientado a objetos y basado en componentes. Además, facilita otros aspectos como compartir datos entre los diferentes modelos, representar múltiples escenarios de generación de residuos o climatológicos y realizar varias simulaciones de cada modelo combinando esos escenarios.
- Un diseñador gráfico 3D que permite construir todos los elementos necesarios para modelizar el vertedero y su forma de explotación. La interface de usuario permite navegar por el vertedero, ocultar o mostrar diversos elementos y capas del modelo, o realizar cortes longitudinales y transversales en el mismo.
- Mejora en la capacidad de realizar simulaciones. Es posible realizar simulaciones a partir de otras simulaciones. También es posible parar una simulación para analizar un estado intermedio o ejecutar simulaciones paso a paso representando su evolución en el visor 3D con posibilidad de consultar los datos en cualquier punto del vertedero. Estas herramientas mejoran la productividad a la hora de poner a punto el programa, de corregir errores y de analizar resultados concretos.

Como **plataforma de cálculo** para procesar todas las simulaciones necesarias se opta por utilizar el supercomputador Altamira. Los estudios de rendimiento realizados en este trabajo indican que para realizar una simulación media de 15.000 celdas durante un periodo de 25 años es más eficiente un PC de sobremesa (de 10 a 16 horas) que el supercomputador Altamira (46 horas). No obstante, para realizar varios miles de simulaciones la capacidad de dicho supercomputador para realizarlas en paralelo es de suma importancia. Por ello se migró el motor de simulación a esa plataforma y se crearon los mecanismos necesarios para alimentarlo de datos y para recuperar los resultados.

En cuanto a las **herramientas de análisis de datos**, se ha verificado la eficacia de las dos técnicas seleccionadas para interpretar los datos obtenidos, en base a las conclusiones discutidas en el apartado de análisis de resultados.

En los modelos de regresión lineal múltiple se han obtenido coeficientes de determinación muy altos que indican la bondad del ajuste. Prácticamente todos están por encima de 0,85 y muchos de ellos superan 0,95. Aun así, existen unos pocos parámetros de control que han sido descartados debido a sus bajos coeficientes de determinación, por ejemplo, el metano residual tras la generación de energía, el asiento diferencial o la presencia final de amonio disuelto en el vertedero.

Los árboles de decisión empleados para analizar los resultados no tienen ningún parámetro que indique la bondad de los mismos. En este caso, la interpretación crítica de los resultados obtenidos y su comparación con los resultados de los modelos de regresión lineal múltiple permiten confirmar su utilidad en el análisis de los resultados.

También ha quedado patente que ninguna de las dos técnicas de análisis de resultados es completamente válida por sí sola. Cada una aporta información complementaria a la otra y, en ocasiones, pueden parecer contradictorias ya que el árbol de decisión maneja valores absolutos mientras que el modelo de regresión describe la importancia relativa de cada variable de diseño dentro de un escenario.

Este hecho se ilustra con un ejemplo en la discusión sobre la cantidad total de lixiviados emitidos, dentro del capítulo de análisis de resultados. Para los casos sin aislamiento superficial durante la explotación, del árbol de decisión se deduce que la influencia de la cobertura es mayor en el clima cantábrico que en el mediterráneo mientras que los coeficientes de regresión para la cobertura son de 0,17 en el clima cantábrico y 0,28 en el clima mediterráneo. Esto es porque el valor absoluto de disminución de lixiviado, es mayor en clima cantábrico mientras que la disminución de lixiviado con respecto al total emitido, es mayor en el mediterráneo.

6.1.2. Variables de diseño de vertederos

Las conclusiones de este trabajo referentes a variables de diseño concretas descansan en la validez de los modelos teóricos en los que se fundamenta y en su correcta implementación, así como en los valores empleados en todos los parámetros necesarios para realizar los cálculos en las simulaciones. Muchos de estos valores se han extraído de la literatura y de trabajos previos de otros autores con Moduelo.

Una de las conclusiones de este estudio es que el efecto de las variables de diseño **es diferente de unos escenarios a otros**. Es decir, el tipo de residuos que llega a un vertedero o las condiciones climatológicas de su ubicación influyen en los efectos de las variables de diseño. No solo existen diferencias cuantitativas de unos escenarios a otros, sino que en algún caso se aprecia una influencia en el sentido contrario de la misma variable de diseño. Por ejemplo, el efecto de la cobertura en la variabilidad de emisión de lixiviados tal y como se comenta más adelante.

Esto implica que las conclusiones en cuanto a criterios de diseño obtenidas para una ubicación geográfica concreta, no son extrapolables con exactitud a otra ubicación geográfica diferente.

Por otro lado, algunos de los parámetros de control seleccionados, aunque ofrecen unos coeficientes de determinación altos, quedan invalidados para el análisis. Es el caso del volumen máximo diario y el volumen máximo mensual de lixiviados emitidos. Los máximos siempre se dan en los primeros años debido a la capa drenante del vertedero que permanece sin cubrir. Por ello hubiera sido necesario definir otro tipo de parámetros, quizás estadísticos relacionados con la desviación estándar o la varianza. La conclusión de este hecho es que **no siempre unos coeficientes de determinación altos indican resultados correctos**. Es necesario contrastarlos.

Tras estas consideraciones generales se presenta, a continuación, un resumen de los efectos de las variables de diseño analizadas, en los diferentes parámetros de control seleccionados para representar los impactos más importantes que produce el vertedero.

En cuanto a la **generación de lixiviados**, como cabía esperar, se pone de manifiesto la importancia del aislamiento superficial durante la explotación en primer lugar y el sellado posclausura en segundo lugar a la hora de disminuir la cantidad de contaminación líquida emitida. Otro factor relevante es la presencia de cobertura intermedia entre capas que tiene dos efectos: disminuir la infiltración superficial y servir de freno al flujo vertical en el interior del vertedero impidiendo que la humedad llegue a los sistemas de recolección de lixiviados.

En el periodo de posclausura el factor más importante es el sellado posclausura impermeable, especialmente en climas lluviosos. En otro orden de magnitud aparecen las influencias del aislamiento superficial en explotación y la cobertura. La ausencia de aislamiento superficial en explotación, origina que el punto de partida de humedad en el vertedero sea mucho mayor que si hubiera existido, y esto tiene repercusiones en los primeros años del periodo de posclausura. La cobertura juega su papel de reducción de la infiltración y reducción del flujo vertical, especialmente en contextos de poca humedad.

En el caso de la **variabilidad de emisión de lixiviados** a lo largo del tiempo, dado que no era factible el análisis mediante las herramientas seleccionadas, se procedió al análisis de los datos de forma visual (mediante gráficas de evolución) y se obtuvieron varios resultados esperados: menor variabilidad en clima mediterráneo que en cantábrico y una gran influencia del aislamiento superficial que hace desaparecer prácticamente dicha variabilidad. La variabilidad remanente con aislamiento superficial se atribuye a la secuencia de llenado del vertedero.

Pero aparece una conclusión curiosa con respecto a la cobertura. Con un residuo de tipo europeo, la cobertura disminuye significativamente la variabilidad en la emisión de lixiviados. Mientras que con un residuo de tipo americano la incrementa considerablemente, especialmente en clima cantábrico.

La **cantidad máxima de agua** presente en el vertedero tiene varias connotaciones. Si es razonable, potenciará los procesos de biodegradación. Si es excesiva, provocará problemas en la estabilidad estructural del vertedero. La variable de diseño más influyente en la cantidad máxima de agua presente en el vertedero a lo largo del tiempo es la cobertura, por su capacidad de retener la humedad. Con una influencia menor (la mitad) aparece la densidad de forma que a mayor densidad se obtienen menores máximos de humedad.

Como conclusión, también se comprueba que el efecto de la cobertura se amplifica con bajas densidades, que potencian su capacidad de retención de agua. Y que cuando no existe cobertura, la densidad tiene un efecto menor, ya que el efecto de una mayor porosidad se ve contrarrestado por una mayor conductividad hidráulica.

Sorprendentemente, ni el aislamiento superficial durante la explotación ni el sellado posclausura tienen un efecto significativo en los máximos de humedad presente en el vertedero. Solamente cuando no existe cobertura, es apreciable su efecto. En ese caso, el aislamiento superficial disminuye un poco los máximos durante el periodo de explotación, y el sellado posclausura origina una pérdida progresiva de humedad en el periodo de posclausura.

El clima tampoco es un factor determinante, tal y como se podría pensar. Tiene una influencia comparativamente mínima. Y también es interesante el efecto que tiene el tipo de residuo. Se podría sospechar, a priori, que el residuo de tipo americano, al ser más húmedo, presenta unas mayores humedades máximas. La conclusión es la contraria, presenta unas menores humedades máximas, debido a una menor capacidad de retención de agua (menor porosidad) y a una mayor facilidad de transmisión de humedad por alcanzar mayores grados de saturación.

En cuanto a **los asentamientos**, las conclusiones establecen que el factor más influyente es la densidad de compactación, asentando más cuanto menor es dicha densidad. En segundo lugar aparece la cobertura por su efecto de retención de humedad que reduce la capacidad de asentamiento al no permitir el drenaje libre. Por último, aparece el tamaño de capa de vertido como factor destacable, incluso cuando no existe cobertura. Este hecho llevó a un análisis más detallado de los datos del cual se concluye la necesidad de ajustar la densidad inicial de colocación del residuo en base a la altura de la capa de vertido que se considere.

El factor más influyente en la **contaminación remanente** es la cobertura por su capacidad para retener la humedad. Con un alto porcentaje de saturación la velocidad de biodegradación es mayor y, por consiguiente, la contaminación remanente es menor.

Tanto el aislamiento superficial en explotación como el sellado posclausura impermeable reducen la infiltración y por consiguiente originan una mayor contaminación remanente. Pero ambos son factores de segundo orden con respecto a la cobertura y muy dependientes del escenario evaluado.

Otro factor es el tipo de residuo. El residuo americano tiene inicialmente una mayor cantidad de carbono que el europeo. Con presencia de cobertura, la rápida velocidad de degradación consigue que las diferencias iniciales desaparezcan, mientras que en ausencia de cobertura, el tipo de residuo pasa a ser el siguiente factor en importancia.

Un factor sorprendente es la altura de capa. A menor altura de capa existe una mayor degradación del residuo y, por lo tanto, una menor contaminación remanente. Los nuevos residuos vertidos generan una transmisión diferida de la humedad en profundidad. Con capas menores, esta transmisión es más continua que con capas mayores, generando un porcentaje de saturación medio mayor en todo el vertedero.

Este interesante efecto podría ser equivalente a un riego superficial pequeño y frecuente en el caso de capas de poca altura, o bien, mayor pero más espaciado en el tiempo para capas de mayor altura. Dicho efecto, al que podemos llamar abreviadamente “riego diferido”, se analiza en detalle en el apartado de análisis de resultados, comprobando los efectos en profundidad en el porcentaje de saturación de los residuos vertidos en superficie a lo largo de varias capas.

Además, el efecto diferido del flujo vertical de humedad es mayor al aumentar la densidad. Al existir menor volumen de poros, el porcentaje de saturación originado por el flujo de humedad es mayor.

En cuanto a la importancia relativa de la presencia de carbono sólido remanente frente al carbono disuelto remanente y cuál es su distribución dentro del vertedero, se ha analizado un caso concreto del cual se pueden destacar las siguientes conclusiones:

El carbono disuelto remanente es mucho menor que el carbono sólido remanente, y al final del periodo de posclausura prácticamente inexistente. Por ello, no es útil como parámetro para medir la contaminación remanente.

La cantidad de carbono sólido remanente en cada capa del vertedero es relativamente homogénea dentro de la capa. Existen unas variaciones del orden del 4% debidas al orden de llenado (efecto de “riego diferido”).

La principal variación se da de unas capas a otras, de forma que a medida que profundizamos en el vertedero, el residuo se ha degradado más. Estas diferencias se acentúan al final del periodo de posclausura con respecto al final del periodo de explotación. También cabe destacar que la cantidad de carbono sólido remanente en las capas más superficiales permanece prácticamente constante a lo largo de todo el periodo de posclausura. Todas estas observaciones se explican por la exposición de las capas a mayor cantidad de agua durante la vida útil del vertedero y por una mayor compactación de las capas inferiores (mayor porcentaje de saturación para la misma humedad).

En cuanto a **la energía generada**, las conclusiones son que sin cobertura se obtiene menos energía y, en todo caso, se puede obtener algo con residuo de tipo americano y densidades de compactación altas.

Con cobertura se obtiene mucha más energía, especialmente con residuo americano. En los casos con cobertura, se puede optimizar la obtención de energía con residuo americano utilizando capas de vertido de menor espesor y en el caso de residuo europeo, con una mayor densidad de compactación.

El aislamiento superficial durante la explotación afecta de forma negativa a la capacidad del vertedero de generar energía, si bien, su efecto es pequeño comparado con la densidad y, especialmente, con la cobertura.

Del análisis de la **calidad del lixiviado**, se concluye que la influencia de las variables de diseño estudiadas es similar a la descrita en el apartado de contaminación remanente, pero de forma inversa. Aquellas variables que favorecen una menor contaminación remanente, también favorecen una mayor emisión de contaminantes en el lixiviado.

Es necesario tener presente para la interpretación de las conclusiones, que estamos hablando de presencia de contaminantes en términos absolutos y no en términos relativos de concentración, dado que los coeficientes de determinación del modelo de regresión lineal indicaron un ajuste deficiente de los parámetros de control de concentración de contaminantes.

Así, una menor altura de capa facilita una mayor degradación, especialmente con residuo de tipo americano, que tiene más humedad. Para el residuo europeo, una mayor densidad produce más degradación. La presencia de cobertura, al provocar una mayor biodegradación, también favorece una mayor contaminación del lixiviado. Pero en este caso su efecto es menor que en la contaminación remanente ya que compensa el incremento de biodegradación con el efecto de retención de la humedad y el aumento de la generación de biogás.

Los dos factores más influyentes en la disminución de los contaminantes emitidos son el aislamiento durante la explotación y el sellado posclausura, ya que impiden la infiltración superficial por precipitaciones, limitando así no solo lo que se degrada el vertedero, sino principalmente el flujo vertical que arrastra a los contaminantes.

En algunos casos, el modelo de regresión nos proporciona una información útil, pero es necesario el árbol de decisión para matizar e interpretar esa información. Aquí tenemos un ejemplo representativo. Si nos centramos en la contaminación DQO emitida durante el periodo de posclausura, el modelo de regresión indica que el aislamiento superficial durante la explotación tiene una influencia negativa cuantificada por los coeficientes -0,16 y -0,17 en el clima cantábrico.

Esto puede parecer sorprendente. Pero el árbol de decisión, matiza esa información de la siguiente forma: En los casos en los que no existe sellado posclausura el aislamiento superficial en explotación incrementa la contaminación emitida. Este dato ayuda a interpretarlo. Durante el periodo de explotación, el aislamiento ha generado mayor potencial de degradación para el futuro y no ha permitido expulsar los contaminantes generados fuera del vertedero. El hecho de no aislar de forma impermeable o aislar incorrectamente en el periodo de posclausura origina que la medida inicial de aislamiento durante la explotación tenga consecuencias negativas en el futuro.

Respecto a la **recirculación de lixiviados** por riego superficial y por pozos, los modelos de regresión lineal múltiple indican que dicha recirculación favorece la generación de energía, disminuye la contaminación remanente, aumenta la humedad máxima alcanzada y favorece los asientos.

No obstante, para una evaluación cuantitativa de estos efectos, los coeficientes de regresión obtenidos indican una influencia mínima de la recirculación en los parámetros de control. Ante estos datos, se realiza un estudio detallado que concluye que, si bien las condiciones de recirculación son las mismas para todos los modelos, los volúmenes realmente recirculados son dependientes del resto de las variables de diseño. Es decir, cuando una variable de diseño establece un grado de compactación inicial del residuo de 700 kg/m^3 , esto se lleva a cabo así con independencia del resto de variables de diseño. En el caso de la recirculación esto no ocurre y el volumen real recirculado es dependiente del resto de variables.

Dado que las metodologías de análisis planteadas en este trabajo se fundamentan en modelos que requieren la independencia de las variables de diseño a estudiar, no se consideran aplicables al caso de la recirculación tal y como se ha modelizado.

La metodología basada en la simulación de los diferentes modelos de vertedero sigue resultando de utilidad para obtener conclusiones respecto a la influencia de la recirculación en los parámetros de control, pero no serían válidas las herramientas de análisis de datos presentadas. Sería necesario un análisis menos sistemático representando los datos de forma gráfica en cada uno de los escenarios, o bien la búsqueda de otras herramientas de análisis más sistemáticas que admitan la dependencia de las variables predictoras. Tal análisis queda fuera del alcance que se pretende dar a este trabajo.

Para finalizar, se ha intentado hacer un ejercicio de síntesis y resumir en unas tablas los efectos de cada variable de diseño en los grupos de parámetros de control estudiados. En la Tabla 42 queda patente la diferencia de la influencia de las variables de diseño entre los diferentes escenarios. Por último, teniendo presentes las limitaciones que tiene generalizar, se presenta en la Tabla 43 un resumen con las conclusiones globales para cualquier escenario.

	Cantidad de lixiviados	Calidad de lixiviados	Generación de energía	Asentamientos	Contaminación remanente	Estabilidad geotécnica	Cantidad de lixiviados	Calidad de lixiviados	Generación de energía	Asentamientos	Contaminación remanente	Estabilidad geotécnica
	Cantábrico - Europeo						Cantábrico - Americano					
Capa (<)					+			-			+	
Compact. (>)		-	+	+++	++	++		-		+++	+	++
Cobertura	+		++	+	+++	--	+	--	+++		+++	--
Aislamiento	+++	+++	-		--		+++	+++			--	
Sellado	+++	+++			--	+	+++	+++			--	+
	Mediterráneo - Europeo						Mediterráneo - Americano					
Capa (<)		-			+			-			+	
Compact. (>)	-	--	+	+++	++	++		-		+++	+	++
Cobertura	++		++	+	+++	--	++	--	+++		+++	--
Aislamiento	+++	+++	-		--		+++	+++			-	
Sellado	++	++			-	+	++	++			-	+

Tabla 42. Efectos de las variables de diseño según escenarios.

	Cantidad de lixiviados	Calidad de lixiviados	Generación de energía	Asentamientos	Contaminación remanente	Estabilidad geotécnica
Altura de capa (menor)		-			+	
Compactación (mayor)		-	+	+++	++	++
Cobertura	+	-	+++	+	+++	--
Aislamiento superficial	+++	+++	-		--	
Sellado posclausura	++	++			-	+

Tabla 43. Efectos globales de las variables de diseño.

6.2. Conclusiones finales

Se ha propuesto un nuevo método para la optimización del diseño de vertederos de residuos sólidos basado en la simulación de modelos y en el uso de herramientas de análisis estadístico. El método propuesto ha demostrado su eficacia a lo largo de este trabajo.

La herramienta de simulación desarrollada, Moduelo v4, ha permitido gestionar una gran cantidad de modelos y simularlos sobre el supercomputador Altamira.

Así mismo, las técnicas de análisis de datos seleccionadas: modelos de regresión lineal múltiple y árboles de decisión, han mostrado ser útiles y complementarse a la hora de interpretar los resultados.

Con el método propuesto se han estudiado los impactos de la altura de capa, la compactación, la cobertura, el aislamiento superficial y el sellado posclausura sobre la contaminación líquida y gaseosa emitida, los asentamientos, la generación de energía o la contaminación remanente en el vertedero.

Se ha demostrado que el efecto de las variables de diseño en los impactos generados por el vertedero es dependiente de los escenarios en los que se estudien. Es decir, para una misma morfología, dependen del clima y de las características del residuo. Por tanto, si se quieren optimizar los criterios de diseño debe realizarse un estudio en cada caso concreto. El método propuesto permite realizar de forma rápida y sistemática estos estudios.

Para los escenarios estudiados se han obtenido las siguientes conclusiones:

- La altura de capa es la variable que menor impacto tiene en el vertedero. Sin embargo, una menor altura de capa puede reducir la contaminación remanente al final de cada etapa de gestión, empeorar la calidad del lixiviado y, en algunos casos, potenciar la generación de energía.
- Se han comprobado los beneficios de una mayor compactación del residuo. No solo disminuye el asentamiento y favorece la estabilidad geotécnica del vertedero, sino que hace disminuir la contaminación remanente y, en algunos casos, mejora la generación de energía. Como efecto adverso, puede producir un incremento en los contaminantes evacuados por el vertedero.

- Se ha descubierto la importancia de la cobertura de baja permeabilidad entre capas del vertedero cuando no hay aportes externos de líquidos en el vertedero. La presencia de la misma es decisiva para lograr una menor contaminación remanente, una mayor generación de energía y una menor emisión de lixiviados. Como contrapartida, puede comprometer la estabilidad geotécnica del vertedero y aumenta el nivel de contaminantes emitidos en el lixiviado.
- También se ha confirmado la utilidad del aislamiento superficial durante la explotación y el sellado posclausura en la reducción de los contaminantes líquidos emitidos por el vertedero. Como contrapartida, originan una mayor contaminación remanente y, con residuos de poca humedad, puede perjudicar la generación de energía.
- La utilización de aislamiento superficial durante la explotación, además, puede tener repercusiones diferidas al periodo de posclausura ya que genera una “contaminación potencial” no evacuada que puede resultar perjudicial si no se realiza un correcto sellado posclausura. Incluso con un correcto sellado, el efecto de la contaminación permanecerá latente en el tiempo.

6.3. Líneas futuras

Como continuación de esta investigación, aparecen múltiples líneas de trabajo. En lo que respecta al **programa de simulación Moduelo** se proponen las siguientes mejoras para un futuro:

- Permitir la visualización tridimensional del progreso de una simulación o del estado final de la misma, coloreando cada celda del vertedero según una escala vinculada con un determinado valor medido en la celda. El usuario seleccionaría la magnitud en cada caso, como por ejemplo, el porcentaje de saturación o la cantidad de carbono presente en la celda.
- Capacitar al motor de simulación de ejecución paralela en sistemas con varios núcleos de proceso. Con ello se lograría reducir en varios órdenes de magnitud el tiempo necesario para realizar una simulación.
- Establecer los procesos de cálculo de Moduelo como un servicio en la nube disponibles desde cualquier aplicación cliente. Esto eliminaría la necesidad de contar con la infraestructura necesaria para realizar simulaciones de forma eficiente por parte de cada organismo o empresa que utilizase Moduelo. Además, la nube proporciona los recursos necesarios para poder realizar simulaciones de forma rápida, pagando únicamente por los recursos utilizados.
- Crear mecanismos para evaluar la propagación de errores en los cálculos del motor de simulación. Conocidos los márgenes de error en la medición de ciertas magnitudes, acotar los errores que se producirían en los resultados de las simulaciones.
- Incorporar en el programa mecanismos para el seguimiento y la elaboración de informes de vertederos reales en explotación. Con ello se crearía un valor añadido al programa de utilidad para su explotación con fines comerciales.

En lo que respecta al **presente trabajo de investigación**, se abren las siguientes posibilidades:

- Realizar un análisis detallado de los procesos de cálculo de recirculación y de los resultados del presente trabajo relativos a los mismos. Buscar un mecanismo que permita analizar estos resultados de forma sistemática y extraer conclusiones.
- Evaluación de otras variables de diseño que no se han estudiado en el presente trabajo pero que pueden resultar de interés. Por ejemplo, la distribución de los sistemas de recolección de lixiviados o el orden de llenado del vertedero.
- Aplicación de esta metodología a un vertedero real, evaluando sobre él los efectos de las variables de diseño seleccionadas. Realizando un contraste de los resultados obtenidos frente a los del presente trabajo realizados sobre un vertedero teórico.
- Analizar por qué no ha sido posible modelizar ciertos parámetros de control con un modelo de regresión lineal múltiple. Investigar si existen otras herramientas de análisis que permitan ajustarlos.
- Valorar económicamente cada una de las variables de diseño y cada uno de los impactos representados por los parámetros de control. Por ejemplo, el colocar o no aislamiento superficial durante la explotación, en términos económicos, cómo se compara con la diferencia de compactación entre 700 y 900 kg/m³. Y estos con el tratamiento de una tonelada de lixiviado contaminado o con el efecto de una determinada contaminación remanente al final del periodo de posclausura. Una vez valorados económicamente todos los elementos, se podrían establecer conclusiones más precisas y crear mejores sistemas para la asistencia en la toma de decisiones de diseño en vertederos de residuos sólidos.
- A partir de los resultados del presente trabajo o de otros similares, una vez obtenido el efecto cuantitativo y cualitativo de las variables de diseño en los parámetros de control, crear un sistema experto que asista al usuario en las decisiones de diseño. Por ejemplo, tras introducir un peso relativo para cada parámetro de control, el sistema debería indicar los valores más adecuados para las variables de diseño.

Referencias

- Alexander, A., C. Burklin, y A. Singleton. *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02. User's Guide*, Washington, USA: Air Pollution Prevention and Control Division, EPA, 2005.
- Arias, A., y otros. «Estimating material losses in sanitary landfills through biological degradation.» *Sardinia 1995, Fifth International Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italia: Centro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1995. p. 2-6.
- Beaven, R. P. «Results of the second landfill modelling challenge.» *4th International Workshop. Hydro-Physico-Mechanics of Landfills*. Santander, 2011.
- Beaven, R. P., J. K. White, y P. Lucas. «Modelling the performance of a horizontal leachate drain.» *Tenth International Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italy, 2005.
- Beck, Kent, et al. *Manifesto for Agile Software Development*. 2001. <http://agilemanifesto.org/> (accessed 10 18, 2012).
- Bente, S. *Interaction of degradation, deformation and transport processes in municipal solid waste landfills*. Tesis doctoral, Braunschweig: Institut für Statik. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina., 2011.
- Bleiker, D.E., G. Farquhar, y E. McBean. «Landfill settlement and the impact on site capacity and refuse hydraulic conductivity.» *Waste management and research*, 1995: nº 13, p. 533-554.
- Bostrom, N. «Are we living in a computer simulation ?» *The Philosophical Quarterly*, 2003: vol. 53, nº 211, p. 243-255.
- Brooks, F. *The Mythical Man-Month: Essays on software engineering*. Reading, MA (USA): Addison-Wesley, 1975.
- Burton, S. A. Q., R. P. Beaven, y J. White. «The effect of moisture content in controlling landfill gas production and its application to a model for landfill refuse decomposition.» *Proceedings of the Waste Conference*. Stratford-upon-Avon, Warwickshire, UK, 2004.
- Chen, P. «The entity-relationship model - toward a unified view of data.» *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, 1976: vol. 1, nº 1, p. 9-36.
- Clewes, H., E. Flugges, S. Davies, y R. G. Gregory. «Modelling the landfill process using Gassim2.» *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Waste and Resource Management*, 2008: vol 161, nº 3, p. 105-111.
- Coleman, D., D. Ash, B. Lowther, y P. Oman. «Using metrics to evaluate software system maintainability.» *Computer vol. 27 Issue 8*, 1994: 44 - 49.

- Daniluk, Andrzej. «Visual modeling for scientific software architecture design. A practical approach.» *Computer Physics Communications*, vol. 183, n. 2, 2012: p. 213-230.
- Denning, P J. *Computer science: the discipline. Encyclopedia of Computer Science, 4th edn.* London: Nature Publishing Group, 2000.
- Dupuit, Paul. *Simulación de producción de lixiviados en vertederos basado en Moduelo.* Tesina de Máster en Ingeniería Sanitaria, Santander: Dpto. Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente. Universidad de Cantabria, 2000.
- Edil, T.B., V.J. Ranguette, y W.W. Wuellner. «Settlement of Municipal Refuse.» *Geotechnics of waste fills - Theory and Practice, ASTM STP 1070 Philadelphia*, 1990.
- Fayer, Mike J. *UNSAT-H Versión 3.0: Unsaturated soil water and heat flow model. Theory, user manual and examples.* Technical report, Springfield (USA): National Technical Information Service. U.S. Department of Commerce., 2000.
- Fenn, Dennis G, Keith J Hanley, y Truett V Degeare. *Use of the water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites.* Technical Report, Washington, DC (USA): Environmental protection agency, 1975.
- Gobierno de Cantabria. *Plan de Residuos de Cantabria 2006 - 2010.* Santander, España: Consejería de Medio Ambiente, 2006.
- Golder Associates. *GasSim 2.5.* Febrero de 2012. <http://www.gassim.co.uk/index.html> (último acceso: 29 de 11 de 2012).
- Gonzalorena, R., A. Lopez, y A. Lobo. «Modelización de una celda vertedero experimental con Moduelo 4.0.» *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2012: Vol. 28 nº especial.
- Grupo de Ingeniería Ambiental. *Aplicación de MODUELO 3.0 a un vertedero de CESPAS GR.* Informe final de proyecto, Santander: Universidad de Cantabria. CESPAS Gestión de residuos S.A., 2006a.
- Grupo de Ingeniería Ambiental. *Diseño de programas de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos en Cantabria.* Informe Final de Proyecto, Santander: Universidad de Cantabria. Empresa de Residuos de Cantabria S.A., 1998.
- Grupo de Ingeniería Ambiental. *Metodología optimizada de biorrecuperación in situ de suelos contaminados por residuos urbanos (SCRU) mediante simulación.* Proyecto 2-6-361/2005/3-B, Madrid: Ministerio de Medio Ambiente. Subprograma Nacional de Tecnologías para la gestión sostenible del medioambiente, 2006b.
- Halstead, Maurice H. *Elements of software science.* New York: Elsevier, 1977.
- Haughey, R.D. «Report: landfill alternative daily cover: conserving airspace and reducing landfill operating cost.» *Waste management and research*, 2001: vol. 19, nº 1, p. 89-95.

- Hossain, M.S., K.K. Penmethsa, y L. Hoyos. «Permeability of municipal solid waste in bioreactor landfill with degradation.» *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009: 27: 43-51
DOI 10.1007/s10706-008-9210-7.
- Huber, W.C., y R.E. Dickinson. *Storm water management model, version 4*. Environmental Protection Agency, USA, 1988.
- Hudson, A., J. White, R. P. Beaven, y W. Powrie. «Modelling the compression behaviour of landfilled domestic waste.» *Waste Management and Research*, 2004: vol 24.
- Huitric, R.L., S. Raksit, y R.T. Haug. *Moisture retention of landfilled solid waste*. Technical Report, Los Angeles, USA: County Sanitation Districts of Los Angeles, 1980.
- Kamalan, H., M. Sabour, y N. Shariatmadari. «A review on available landfill gas models.» *Journal of Environmental Science and Technology*, 2011: v. 4, nº 2, p. 79-92.
- Knisel, Walter G. *CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems*. Technical report, Tucson, Arizona (USA): Department of agriculture. Conservation Research Report No. 26 640 pp., 1980.
- Lobo, A, y I Tejero. «Application of simulation models to the diagnosis of MSW landfills: an example.» *Waste Management*, 2007: Vol 27, nº 5, p. 691-703.
- Lobo, A, y I Tejero. «MODUELO 2: a new version of an integrated simulation model for municipal solid waste landfills.» *Environmental Engineering and Software*, 2007: Vol. 22, nº 1, p. 59-72.
- Lobo, A. *Desarrollo de Moduelo 2: herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos*. Tesis Doctoral, Santander: Dpt. Ciencias y Técnicas del Agua y medio Ambiente. E.T.S Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria., 2003a.
- Lobo, A., A. Lopez, N. Cobo, y I. Tejero. «Simulation of the municipal solid waste reactors using Moduelo.» *Waste and Resource Management*, 2008: Vol. 161 nº 4, p. 99-104.
- Lobo, A., A.L. Esteban, B. Domínguez, J. Muñoz, y I. Tejero. «Reducción de la vida de vertederos mediante biorrecuperación.» *Revista Técnica de Medio Ambiente. C&M Publicaciones.*, 2001: Nº 81, p. 57-67.
- Lobo, A., J. Herrero, O. Montero, M. Fantelli, y I. Tejero. «Modelling for Environmental Assessment of Municipal Solid Waste Landfills. Part 1: Hydrology.» *Waste Management and Research*, 2002a: Vol. 20, nº 2, p. 198-210.
- Lobo, A., J. Herrero, O. Montero, M. Fantelli, y I. Tejero. «Modelling for Environmental Assessment of Municipal Solid Waste Landfills. Part 2: Biodegradation.» *Waste Management and Research*, 2002b: Vol. 20, nº 6, p. 514-528.
- Lobo, A., M. Sanchez, A.L. Esteban, J. Cruces, y I. Tejero. *Moduelo 3. Herramienta de gestión y biorrecuperación de suelos contaminados por vertederos de residuos sólidos urbanos*.

- Manual de usuario y manual técnico, Madrid: Ministerio de Ciencia y Tecnología - Ministerio de Medio Ambiente. REF 2000/032, 2003.
- Lobo, A., N. Cobo, A. López, y L. Cacho. «Advances in old landfill assessment.» *Landfill Research Trends. Nova Science Publishers.*, 2007: p. 167-189.
- Lobo, Amaya, Ana López, y Noelia Cobo. «Mathematical simulation of a landfill within the assessment of municipal solid waste management alternatives.» *17th International Landfill Symposium*. CISA, Cagliari: Actas del Congreso Sardinia, 2007.
- Loddo, Alessandra. *Analisi del modello MODUELO per la simulazione idrologica e degradazione biologica nello scarico controllato: applicazione al caso di Meruelo (Cantabria)*. Cagliari: Ingegneria per l'Ambiente ed il territorio. Università degli Studi di Cagliari., 2001.
- López, A., I. Tejero, M. Cuartas, y A. Lobo. «A case of simulation as a help for landfill management planning.» *Actas del 3rd International Workshop. Hydro-Physico-Mechanics of Wastes*. Braunschweig (Alemania), 2009.
- López, A., N. Cobo, M. Cuartas, y A. Lobo. «Estimating the future emissions of an old landfill by simulation.» *Actas de Congreso Sardinia, 12th International Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italia: ISBN 978-88-6265-007-6, 2009.
- López, A., N. Cobo, y A. Lobo. «Modelling of biodegradation in an old European unregulated landfill.» *Journal of Environmental Engineering. American Society of Civil Engineers.*, 2011: Vol. 137 Nº 1, p. 93-96.
- Manassero, M., W.F. Van Impe, y A. Bouazza. «Waste Disposal and Containment.» *Environmental Geotechnics. Kamon. Rotterdam*, 1997: p. 1425 - 1473.
- Martínez, A.L., G.F. Simões, A.L.G. Cortázar, R.S. Padilla, C.A.A. Catapreta, y V.F.O. Morais. «Water balance of an experimental landfill using MODUELO.» *Actas del Congreso Sardinia, 12th International Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italia, 2009.
- McCabe, T. J. «A complexity measure.» *Software Engineering, IEEE Transactions on*, 1976: v. SE-2, Issue 4, p. 308 - 320.
- McDougall, J. R., y I. C. Pyrah. «Modelling load, creep and biodegradation settlement in landfill.» *Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italy: Christensen, Cossu & Stegmann, 2003.
- McDougall, J. R., y I. C. Pyrah. «Phase relations for decomposable soils.» *Geotechnique*, 2004: v. 54, nº 7, p. 487-494.
- McDougall, J. R., y J. C. Philp. «Parametric study of landfill biodegradation modelling: methanogenesis and initial conditions.» *Waste Management and Landfill Symposium*. Cagliari, Italia: Christensen, Cossu & Stegmann, 2001. vol 1, p. 79-88.

- McDougall, J. R., y J. Hay. «Hydro-bio-mechanical modelling of landfilled waste: formulation and testing.» *Workshop on Hydro-Physico-Mechanics of Landfills*. Grenoble, France: University of Grenoble, 2005.
- Miliarium. *Software de modelización de vertederos y de residuos urbanos*. 2004.
<http://www.miliarium.com/proyectos/vertederos/RSU/Software/Modsimulvrsu.htm>
 (último acceso: 16 de 11 de 2012).
- Ministerio de la Presidencia. *Real decreto 252/2006, de 3 de marzo, por el que se revisan los objetivos de reciclado y valorización establecidos en la Ley 11/1997, de 24 de abril, de envases y residuos de envases, y por el que se modifica el Reglamento para su ejecución*. Madrid, España: BOE nº 54 de 4 de marzo de 2006, 2006.
- Ministerio de Medio Ambiente. *Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero*. Madrid, España: BOE Nº 25 de 29 de enero de 2002, 2002.
- Napier University. *Hydro-Bio-Mechanical Modelling of Landfill & Other Decomposable Soils*. s.f.
<http://www.sbe.napier.ac.uk/HBM/> (último acceso: 30 de 11 de 2012).
- Nayagum, D., J. K. White, T. Rees-White, D. Holmes, y K. Zardava. «Modelling study of field-scale aerobic treatment of waste using forced-air injection.» *Twelfth International Waste Management and Landfill Symposium*. Sardinia, Italy, 2009b.
- Nayagum, D., J. White, T. Rees-White, D. Holmes, y K. Zardava. «Numerical modelling of the flow dynamics of air and leachate through waste material under vertical drainage and forced-air flow.» *3rd International Workshop in Hydro-Physico-Mechanics of Landfills*. Braunschweig, Germany, 2009a.
- Needham, A., G.J. Fowmes, J. McDougall, y P. Braithwaite. «Predicting long-term settlement of landfills using a fundamental model of waste behavior.» *Proceedings Waste 2008: Waste and Resource Management - a Shared Responsibility*. Stratford upon Avon, Warwickshire, England, 2008.
- Oman, P., J. Hagemester, y D. Ash. *A definition and taxonomy for software maintainability*. SETL Report 91-08-TR, Idaho (USA): University of Idaho, 1991.
- Pacey, J., D. Augenstein, R. Morck, D. Reinhart, y R. Yazdani. *The bioreactor landfill - An innovation in solid waste management*. Silver Springs, Maryland: Solid Waste Association of North America (SWANA), 1999.
- Palma, J.H. *Comportamiento geotécnico de vertederos controlados de residuos sólidos urbanos*. Tesis Doctoral, Santander: ETSI de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria, 1995.
- Peña, Luis. *Modelización del vertedero de residuos no peligrosos de Meruelo*. Proyecto Fin de Carrera, Santander: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria., 2008.

- Perrier, Eugene R, y Anthony C Gibson. *Hydrologic simulation on solid waste disposal sites (HSSWDS)*. Cincinnati: Municipal Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, 1980.
- Petchsri, P., S. Towprayoon, P. Chaiprasert, y A. Nopharatana. «Biogas production from simulated landfill bioreactor with leachate recirculation under various waste densities.» *The joint international conference on "Sustainable energy and environment (SEE)"*. Hua Hin, Thailand, 2004.
- Pohland, F.G. *Sanitary landfill stabilization with leachate recycle and residual treatment*. EPA-600/2-75-043, Cincinnati, Ohio, USA: U.S. Environmental Protection Agency, 1975.
- Pohland, F.G., W.H. Cross, J.P. Gould, y D.R. Reinhart. *The behavior and assimilation of organic priority pollutants codisposed with municipal refuse*. US EPA, EPA Coop. Agreement Cr-812158, 1992.
- PowerSoftware. *Krakatau metrics professional*. 10 de 3 de 2012.
<http://www.powersoftware.com/kp/> (último acceso: 18 de 10 de 2012).
- Powrie, W., R.P. Beaven, y A.P. Hudson. «Factors affecting the hydraulic conductivity of waste.» *International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of Landfills" en LIRIGM*. Grenoble, France, 2005.
- Powrie, W., y R. P. Beaven. «Hydraulic properties of household waste and implications for landfills.» *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering*, 1999: v. 137, p. 235-247.
- Rees-White, T. C., R. P. Beaven, J. K. White, R. Nyagum, P. Braithwaite, y B. Purcell. «Monitoring and modeling air flow and distribution at a forced-air aerobic waste treatment plant.» *Global Waste Management Symposium*. Stratford-upon-Avon, UK: University of Southampton, 2008. p. 59-68.
- Reinhart, D., P.T. McCreanor, y T. Townsend. «The bioreactor landfill: Its status and future.» *Waste Management & Research*, 2002: vol. 20, 2, p. 172-186.
- Rosqvist, H., y G. Destouni. «Solute transport through preferential pathways in municipal solid waste.» *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000: 46.
- Sanin, F.D., y M.A. Barlaz. «Natural attenuation of hazardous organics during refuse decomposition in a municipal landfill.» *SWANA's Wastecon, 36th Annual international solid waste exhibition*. Charlotte, USA, 1998. p. 35-39.
- Schroeder, P R, T S Dozier, P A Zappi, B M McEnroe, J W Sjostrom, y R L Peyton. *The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model: Engineering Documentation for Version 3*. Technical Report, Washington, DC (USA): U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, 1994.

- Scientific Software Group. *WHI UnSat Suite Plus Description*. 1998. http://www.ground-water-models.com/products/whiunsat_details/whiunsat_details.html (último acceso: 19 de 09 de 2012).
- Sowers, G.F. «Settlement of waste disposal fills.» *Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Moscow, 1973. vol. 2, p. 207-210.
- Staub, M., B. Galietti, L. Oxarango, M.V. Khire, y J.P. Gourc. «Porosity and hydraulic conductivity of MSW using laboratory-scale tests.» *Third International Workshop "Hydro-Physico-Mechanics of landfills"*. Braunschweig, Germany, 2009.
- Tchobanoglous, G., H. Theisen, y S. Vigil. *Gestión integral de residuos sólidos*. Madrid: McGraw Hill, 1994.
- Thorneloe, S.A., A. Reisdorph, M. Laur, R. Pelt, R.L. Bass, y C. Burklin. «The US environmental protection agency's Landfill gas emissions model (LandGEM).» *Proceedings of Sardinia 99 Sixth International Landfill Symposium, Volume IV Environmental Impact, Aftercare and Remediation of Landfills*. 1999. p. 11-18.
- Thorntwaite, C W, y J R Mather. «Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance.» *Drexel Institute of Technology. Publications in climatology, v.10, no.3*, 1957: p. 185-311.
- Van Genuchten, M. Th. «A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils.» *Soil Science Society of America journal*, 1980: Vol. 44 N° 5, p. 892-898.
- Verifysoft Technology. *Maintainability Index*. 05 24, 2011.
http://www.verifysoft.com/en_maintainability.html (accessed 10 18, 2012).
- White, J. K., J. P. Robinson, y Q. Ren. «A framework to contain a spatially distributed model of the degradation of solid waste in landfills.» *Journal of Waste Management and Research*, 2003: vol. 21, part 4.
- White, J. K., J. P. Robinson, y Q. Ren. «Modelling the biochemical degradation of solid waste in landfills.» *Waste Management*, 2004: vol. 23, nº3, p. 227-240.
- White, J.K., y D. Nayagum. «HPM4 Landfill modeling challenge. Application of the University of Southampton landfill process model LDAT.» *Fourth International Workshop "hydro-Physico-Mechanics of Landfill"*. Santander, Spain: Grupo de Ingeniería Ambiental. Universidad de Cantabria., 2011.
- Yin, J.H., y J. Graham. «Viscous-elastic-plastic modelling of one-dimensional time-dependent behaviour of clays.» *Canadian Geotechnical Journal*, 1989: v. 26(2), p. 199-209.
- Zardava, K., W. Powrie, y J. White. «The determination of the moisture retention characteristics of waste materials using vertical drainage experiments.» *3rd International Workshop in Hydro-Physico-Mechanics of Landfills*. Braunschweig, Germany, 2009.

Anexo I. Resultados de las simulaciones.

Modelo	VTotal	VTotalExp	VTotalPos	VMaxDia	VMaxMes
3_700_00_0_0	3.567.874	2.786.874	780.999	2.104	33.424
3_700_00_0_1	2.870.889	2.700.299	170.589	2.104	33.424
3_700_00_1_0	1.248.844	522.949	725.895	1.677	21.414
3_700_00_1_1	549.926	437.606	112.320	1.677	21.414
3_700_03_0_0	2.679.634	1.910.618	769.015	1.978	31.801
3_700_03_0_1	1.980.758	1.857.462	123.295	1.978	31.801
3_700_03_1_0	833.446	243.001	590.445	1.591	20.102
3_700_03_1_1	212.916	206.214	6.701	1.591	20.102
3_900_00_0_0	3.747.362	2.995.617	751.745	2.248	34.303
3_900_00_0_1	3.051.437	2.925.169	126.267	2.248	34.300
3_900_00_1_0	1.347.449	625.199	722.250	1.914	24.605
3_900_00_1_1	650.878	556.954	93.924	1.914	24.605
3_900_03_0_0	2.985.357	2.244.825	740.532	2.156	32.806
3_900_03_0_1	2.259.775	2.193.426	66.349	2.156	32.806
3_900_03_1_0	1.113.348	407.857	705.490	1.835	23.519
3_900_03_1_1	386.002	356.616	29.385	1.835	23.519
5_700_00_0_0	3.977.949	3.188.277	789.671	2.127	32.571
5_700_00_0_1	3.354.398	3.169.284	185.114	2.127	32.571
5_700_00_1_0	1.281.381	566.931	714.450	1.900	26.600
5_700_00_1_1	655.778	549.254	106.523	1.900	26.600
5_700_03_0_0	2.749.904	2.041.977	707.926	2.061	31.530
5_700_03_0_1	2.073.246	2.012.992	60.253	2.061	31.530
5_700_03_1_0	951.593	379.153	572.440	1.867	26.199
5_700_03_1_1	365.695	358.413	7.281	1.867	26.199
5_900_00_0_0	4.015.911	3.233.648	782.262	2.237	33.466
5_900_00_0_1	3.361.879	3.203.611	158.267	2.237	33.466
5_900_00_1_0	1.460.345	748.082	712.263	2.048	28.708
5_900_00_1_1	805.001	718.559	86.442	2.048	28.708
5_900_03_0_0	3.083.146	2.355.239	727.907	2.181	32.770
5_900_03_0_1	2.364.801	2.312.424	52.376	2.181	32.770
5_900_03_1_0	1.274.488	567.072	707.415	2.010	28.462
5_900_03_1_1	554.173	524.656	29.516	2.010	28.462

Tabla 44. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - europeo. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes
3_700_00_0_0	15.293.329	9.193.486	6.099.842	71.518	9.103
3_700_00_0_1	10.129.726	8.875.143	1.254.583	70.844	9.166
3_700_00_1_0	10.465.477	1.060.433	9.405.044	30.484	14.953
3_700_00_1_1	2.313.580	708.080	1.605.500	13.151	18.096
3_700_03_0_0	18.920.105	11.152.996	7.767.109	104.922	10.718
3_700_03_0_1	11.842.532	10.647.037	1.195.494	104.942	9.868
3_700_03_1_0	13.832.880	257.614	13.575.266	58.376	28.769
3_700_03_1_1	18.919	7.897	11.022	189	2.155
3_900_00_0_0	21.435.149	14.611.198	6.823.950	129.419	10.937
3_900_00_0_1	15.076.257	14.126.002	950.255	128.275	9.399
3_900_00_1_0	15.710.337	2.926.053	12.784.284	46.919	21.230
3_900_00_1_1	4.272.790	2.181.930	2.090.859	24.331	26.883
3_900_03_0_0	23.292.810	15.540.863	7.751.946	164.187	11.856
3_900_03_0_1	15.600.138	15.000.450	599.688	164.187	9.798
3_900_03_1_0	19.235.048	2.129.542	17.105.505	69.678	34.505
3_900_03_1_1	1.856.975	993.688	863.286	22.121	32.277
5_700_00_0_0	13.603.892	8.461.889	5.142.003	70.381	7.412
5_700_00_0_1	9.375.308	8.377.569	997.739	69.427	5.966
5_700_00_1_0	7.698.236	363.830	7.334.405	24.802	12.115
5_700_00_1_1	953.329	299.021	654.307	4.874	7.817
5_700_03_0_0	17.121.723	9.295.129	7.826.594	101.324	12.038
5_700_03_0_1	9.641.746	9.063.832	577.914	99.819	9.702
5_700_03_1_0	11.357.491	77.513	11.279.977	53.092	25.748
5_700_03_1_1	18.101	16.688	1.412	365	205
5_900_00_0_0	20.269.326	13.757.180	6.512.145	120.823	9.747
5_900_00_0_1	14.598.276	13.562.649	1.035.627	120.594	7.694
5_900_00_1_0	13.718.313	1.604.327	12.113.985	40.627	19.910
5_900_00_1_1	2.639.881	1.326.789	1.313.092	14.084	19.263
5_900_03_0_0	22.040.355	13.772.541	8.267.814	140.669	12.726
5_900_03_0_1	13.847.119	13.327.702	519.416	140.026	10.002
5_900_03_1_0	17.652.842	753.786	16.899.056	65.180	30.933
5_900_03_1_1	719.835	314.815	405.020	8.075	16.856

Tabla 45. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - europeo. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes
3_700_00_0_0	1.586.664	794.683	791.980	7.289	1.214
3_700_00_0_1	914.191	760.511	153.679	6.955	1.217
3_700_00_1_0	1.307.625	110.120	1.197.505	3.912	1.926
3_700_00_1_1	271.058	72.743	198.314	1.555	2.360
3_700_03_0_0	2.293.245	1.213.681	1.079.563	10.314	1.584
3_700_03_0_1	1.301.209	1.150.469	150.740	10.289	1.292
3_700_03_1_0	1.838.469	31.810	1.806.658	7.687	3.798
3_700_03_1_1	1.895	461	1.433	12	284
3_900_00_0_0	2.150.115	1.227.264	922.850	10.962	1.503
3_900_00_0_1	1.294.848	1.173.366	121.482	10.407	1.284
3_900_00_1_0	1.959.745	294.530	1.665.214	5.635	2.756
3_900_00_1_1	474.613	214.417	260.196	2.917	3.516
3_900_03_0_0	2.665.226	1.548.546	1.116.679	14.992	1.756
3_900_03_0_1	1.559.547	1.482.244	77.303	14.965	1.218
3_900_03_1_0	2.564.056	252.201	2.311.855	8.844	4.437
3_900_03_1_1	223.135	114.083	109.051	2.772	4.150
5_700_00_0_0	1.358.826	713.078	645.748	6.691	961
5_700_00_0_1	818.105	704.135	113.970	6.591	751
5_700_00_1_0	942.815	33.706	909.109	3.118	1.523
5_700_00_1_1	104.770	27.013	77.756	546	988
5_700_03_0_0	2.062.441	1.002.617	1.059.824	11.196	1.693
5_700_03_0_1	1.044.851	974.375	70.476	11.022	1.208
5_700_03_1_0	1.495.898	8.039	1.487.858	7.049	3.414
5_700_03_1_1	699	601	98	9	14
5_900_00_0_0	1.996.717	1.141.703	855.013	9.699	1.314
5_900_00_0_1	1.244.045	1.120.447	123.598	9.670	997
5_900_00_1_0	1.679.361	142.060	1.537.300	5.188	2.539
5_900_00_1_1	268.237	113.647	154.589	1.544	2.416
5_900_03_0_0	2.502.145	1.357.728	1.144.417	13.989	1.797
5_900_03_0_1	1.369.260	1.304.970	64.290	13.855	1.257
5_900_03_1_0	2.310.855	77.832	2.233.023	8.457	4.022
5_900_03_1_1	76.813	27.524	49.289	955	2.122

Tabla 46. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - europeo. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
3_700_00_0_0	12.995.271	310	12.616.449	617.391	543.671
3_700_00_0_1	7.590.435	221	7.243.626	581.575	411.163
3_700_00_1_0	11.554.785	0	11.279.611	569.843	546.669
3_700_00_1_1	4.322.416	0	4.051.250	528.382	416.095
3_700_03_0_0	26.115.333	55.115	13.360.761	1.107.419	1.045.229
3_700_03_0_1	24.427.651	52.194	12.316.777	1.066.684	943.523
3_700_03_1_0	22.594.773	25.530	16.649.581	1.058.460	1.049.020
3_700_03_1_1	19.725.439	14.415	16.232.979	875.667	868.968
3_900_00_0_0	16.909.882	5.354	15.510.237	520.518	473.154
3_900_00_0_1	10.932.465	2.027	10.246.549	497.736	360.796
3_900_00_1_0	15.983.382	1.364	15.477.506	493.640	475.504
3_900_00_1_1	8.212.589	0	8.022.341	457.683	363.792
3_900_03_0_0	27.901.202	63.482	13.263.413	798.907	765.318
3_900_03_0_1	26.921.327	62.798	12.420.716	768.183	701.977
3_900_03_1_0	29.621.253	66.643	14.245.527	774.343	766.585
3_900_03_1_1	27.858.319	64.124	13.060.774	734.372	705.008
5_700_00_0_0	11.513.247	713	11.029.353	663.171	581.136
5_700_00_0_1	7.059.318	640	6.589.965	635.346	450.452
5_700_00_1_0	9.144.263	0	8.850.908	602.561	585.400
5_700_00_1_1	2.472.606	0	2.177.589	563.262	456.769
5_700_03_0_0	24.044.636	43.049	14.034.791	1.011.164	999.858
5_700_03_0_1	21.464.494	38.110	12.538.585	945.086	883.036
5_700_03_1_0	21.070.644	19.779	16.420.047	1.014.632	1.003.601
5_700_03_1_1	16.983.729	5.379	15.482.074	803.299	796.019
5_900_00_0_0	17.240.579	5.486	15.769.503	580.524	506.024
5_900_00_0_1	11.417.149	2.757	10.560.410	556.423	398.388
5_900_00_1_0	15.820.510	117	15.607.999	520.314	508.581
5_900_00_1_1	7.472.336	0	7.274.297	488.664	402.259
5_900_03_0_0	27.504.531	58.150	14.056.264	757.012	735.713
5_900_03_0_1	25.991.241	57.306	12.730.883	728.825	676.559
5_900_03_1_0	27.936.403	58.456	14.424.653	745.051	737.101
5_900_03_1_1	24.958.751	54.140	12.435.955	709.409	679.916

Tabla 47. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - europeo. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
3_700_00_0_0	30,97	31,22	31,05	30,61	0,17
3_700_00_0_1	30,63	30,88	30,71	30,61	0,17
3_700_00_1_0	30,77	30,84	30,80	30,10	0,05
3_700_00_1_1	30,20	30,34	30,26	30,08	0,07
3_700_03_0_0	27,26	27,38	27,30	26,74	0,08
3_700_03_0_1	27,06	27,21	27,12	26,72	0,09
3_700_03_1_0	27,32	27,35	27,33	26,18	0,01
3_700_03_1_1	26,62	26,80	26,70	26,11	0,10
3_900_00_0_0	23,91	24,12	24,00	23,59	0,12
3_900_00_0_1	23,60	23,80	23,68	23,59	0,12
3_900_00_1_0	23,74	23,85	23,79	23,12	0,06
3_900_00_1_1	23,30	23,36	23,33	23,10	0,03
3_900_03_0_0	20,87	21,03	20,93	20,59	0,10
3_900_03_0_1	20,83	21,00	20,89	20,57	0,10
3_900_03_1_0	20,84	20,95	20,89	20,43	0,06
3_900_03_1_1	20,76	20,83	20,79	20,40	0,04
5_700_00_0_0	23,66	23,94	23,77	23,38	0,17
5_700_00_0_1	23,34	23,61	23,44	23,37	0,17
5_700_00_1_0	23,27	23,37	23,32	22,67	0,05
5_700_00_1_1	22,60	22,79	22,70	22,61	0,09
5_700_03_0_0	22,72	22,81	22,76	22,02	0,05
5_700_03_0_1	22,33	22,46	22,38	21,94	0,08
5_700_03_1_0	22,79	22,82	22,80	21,39	0,02
5_700_03_1_1	21,81	21,96	21,88	21,21	0,08
5_900_00_0_0	18,09	18,26	18,16	17,73	0,10
5_900_00_0_1	17,74	17,93	17,81	17,73	0,12
5_900_00_1_0	17,81	17,95	17,87	17,10	0,09
5_900_00_1_1	17,15	17,32	17,21	17,04	0,11
5_900_03_0_0	17,38	17,59	17,46	17,07	0,12
5_900_03_0_1	17,32	17,53	17,41	17,05	0,12
5_900_03_1_0	17,36	17,51	17,42	16,84	0,09
5_900_03_1_1	17,18	17,30	17,24	16,82	0,06

Tabla 48. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - europeo. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
3_700_00_0_0	59.821.050	59.998.800	38.685.075	38.713.991	296.969
3_700_00_0_1	61.086.289	61.250.026	57.061.177	57.068.975	236.472
3_700_00_1_0	75.802.123	75.969.856	43.241.468	43.285.363	388.338
3_700_00_1_1	77.566.639	77.708.657	70.179.517	70.191.141	364.681
3_700_03_0_0	34.695.754	34.954.923	14.182.002	14.198.668	731.633
3_700_03_0_1	36.100.360	36.340.751	18.811.085	18.838.690	1.508.901
3_700_03_1_0	51.380.900	51.657.471	16.572.139	16.604.388	1.062.929
3_700_03_1_1	53.319.656	53.561.713	26.366.386	26.383.584	2.458.042
3_900_00_0_0	47.695.234	47.883.580	25.519.520	25.545.815	284.700
3_900_00_0_1	49.599.449	49.757.550	45.236.794	45.244.633	329.977
3_900_00_1_0	64.539.421	64.820.147	27.718.774	27.755.298	370.849
3_900_00_1_1	67.334.087	67.569.448	56.592.062	56.615.688	694.970
3_900_03_0_0	31.269.373	31.549.150	13.124.884	13.138.325	408.085
3_900_03_0_1	31.984.931	32.249.646	15.707.039	15.728.698	1.378.255
3_900_03_1_0	38.690.719	39.054.329	13.874.907	13.893.383	463.768
3_900_03_1_1	40.039.591	40.371.454	20.584.799	20.627.285	2.509.696
5_700_00_0_0	62.947.666	63.123.046	45.604.020	45.635.510	243.779
5_700_00_0_1	63.414.093	63.576.933	60.903.421	60.917.811	178.991
5_700_00_1_0	81.158.574	81.265.165	53.298.015	53.352.657	352.746
5_700_00_1_1	81.878.574	81.962.131	78.554.482	78.569.102	204.655
5_700_03_0_0	40.871.264	41.136.602	17.091.770	17.115.960	810.027
5_700_03_0_1	42.970.789	43.200.309	24.954.743	25.000.332	1.486.388
5_700_03_1_0	60.881.522	61.143.428	21.146.526	21.196.108	1.191.313
5_700_03_1_1	63.067.837	63.282.428	35.146.953	35.169.150	2.075.213
5_900_00_0_0	50.045.614	50.284.654	28.030.010	28.060.365	322.758
5_900_00_0_1	51.089.141	51.303.894	47.241.149	47.258.502	294.817
5_900_00_1_0	70.614.701	70.871.798	31.933.154	31.983.938	469.784
5_900_00_1_1	72.168.664	72.389.794	63.908.784	63.953.386	611.097
5_900_03_0_0	35.019.555	35.335.370	14.638.721	14.656.222	472.305
5_900_03_0_1	35.882.252	36.180.677	19.118.523	19.156.483	1.403.935
5_900_03_1_0	46.528.792	46.921.962	16.031.860	16.062.824	595.618
5_900_03_1_1	48.197.355	48.542.601	28.466.087	28.510.898	2.323.319

Tabla 49. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - europeo. Contaminación remanente.

Modelo	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes
3_700_00_0_0	4.030.978	3.257.145	773.832	2.243	35.919
3_700_00_0_1	3.312.602	3.170.942	141.660	2.243	35.919
3_700_00_1_0	1.709.634	963.596	746.038	1.827	24.003
3_700_00_1_1	990.233	877.518	112.714	1.827	24.003
3_700_03_0_0	3.174.003	2.422.965	751.038	2.139	33.590
3_700_03_0_1	2.418.513	2.353.469	65.043	2.139	33.590
3_700_03_1_0	1.334.212	606.315	727.897	1.747	22.728
3_700_03_1_1	579.015	537.396	41.618	1.747	22.728
3_900_00_0_0	3.989.472	3.246.084	743.388	2.304	35.442
3_900_00_0_1	3.278.387	3.173.726	104.660	2.307	35.445
3_900_00_1_0	1.580.570	854.226	726.344	2.006	25.816
3_900_00_1_1	869.624	782.118	87.505	2.006	25.816
3_900_03_0_0	3.215.915	2.481.834	734.080	2.238	33.626
3_900_03_0_1	2.489.990	2.429.633	60.357	2.238	33.626
3_900_03_1_0	1.328.784	619.532	709.251	1.949	25.048
3_900_03_1_1	605.575	568.555	37.019	1.949	25.048
5_700_00_0_0	4.424.847	3.644.246	780.601	2.239	34.322
5_700_00_0_1	3.778.778	3.623.857	154.921	2.239	34.322
5_700_00_1_0	1.754.706	1.021.208	733.498	2.010	28.644
5_700_00_1_1	1.107.280	1.001.015	106.264	2.010	28.644
5_700_03_0_0	3.244.374	2.520.205	724.169	2.186	33.316
5_700_03_0_1	2.493.445	2.460.198	33.246	2.186	33.316
5_700_03_1_0	1.460.818	739.995	720.823	1.987	28.133
5_700_03_1_1	709.872	680.182	29.690	1.987	28.133
5_900_00_0_0	4.247.253	3.474.196	773.056	2.275	34.211
5_900_00_0_1	3.579.570	3.443.792	135.777	2.275	34.211
5_900_00_1_0	1.707.843	996.859	710.983	2.088	29.700
5_900_00_1_1	1.039.464	966.573	72.890	2.088	29.700
5_900_03_0_0	3.318.217	2.596.380	721.836	2.256	33.282
5_900_03_0_1	2.602.403	2.553.059	49.344	2.256	33.282
5_900_03_1_0	1.516.236	813.702	702.533	2.091	29.172
5_900_03_1_1	802.339	770.966	31.373	2.091	29.172

Tabla 50. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - americano. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes
3_700_00_0_0	24.205.914	15.495.150	8.710.763	134.273	13.386
3_700_00_0_1	16.535.824	15.080.558	1.455.265	133.395	11.358
3_700_00_1_0	16.621.107	4.238.180	12.382.926	54.251	19.486
3_700_00_1_1	5.639.837	3.713.854	1.925.982	47.132	18.854
3_700_03_0_0	34.171.875	21.905.235	12.266.639	243.495	18.826
3_700_03_0_1	21.851.718	20.902.109	949.609	240.837	14.685
3_700_03_1_0	29.348.313	7.681.501	21.666.812	122.583	36.767
3_700_03_1_1	7.307.860	5.768.764	1.539.095	73.675	37.213
3_900_00_0_0	35.840.414	24.287.330	11.553.083	212.520	19.492
3_900_00_0_1	24.806.372	23.531.936	1.274.436	209.264	14.484
3_900_00_1_0	26.296.366	6.427.732	19.868.634	86.202	33.605
3_900_00_1_1	7.808.578	5.247.998	2.560.580	58.941	34.770
3_900_03_0_0	40.154.252	27.301.341	12.852.911	295.441	20.728
3_900_03_0_1	27.309.967	26.406.943	903.023	295.441	15.767
3_900_03_1_0	33.801.312	8.532.202	25.269.109	147.155	49.674
3_900_03_1_1	8.271.911	6.440.484	1.831.427	80.657	50.176
5_700_00_0_0	21.344.504	14.483.052	6.861.451	125.616	9.768
5_700_00_0_1	15.567.187	14.356.899	1.210.287	125.389	8.034
5_700_00_1_0	12.057.096	2.313.485	9.743.610	31.108	15.179
5_700_00_1_1	3.205.689	2.167.467	1.038.222	21.745	10.547
5_700_03_0_0	31.373.528	18.677.311	12.696.216	245.133	19.826
5_700_03_0_1	18.342.307	17.877.470	464.837	241.372	14.812
5_700_03_1_0	26.181.689	4.166.831	22.014.857	116.408	35.072
5_700_03_1_1	3.793.376	2.967.473	825.902	56.928	28.822
5_900_00_0_0	33.991.111	23.122.844	10.868.266	201.779	16.676
5_900_00_0_1	24.265.501	22.808.053	1.457.448	200.827	11.830
5_900_00_1_0	22.924.382	4.002.584	18.921.797	64.511	31.573
5_900_00_1_1	5.049.163	3.536.936	1.512.227	36.147	24.628
5_900_03_0_0	38.496.877	24.548.713	13.948.164	284.409	22.501
5_900_03_0_1	24.631.795	23.801.649	830.146	282.517	17.314
5_900_03_1_0	31.454.854	4.522.145	26.932.709	108.848	48.440
5_900_03_1_1	4.529.587	3.365.580	1.164.007	46.082	39.073

Tabla 51. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - americano. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes
3_700_00_0_0	2.293.238	1.209.792	1.083.445	12.113	1.710
3_700_00_0_1	1.333.814	1.167.514	166.300	11.652	1.428
3_700_00_1_0	1.896.278	369.514	1.526.764	5.790	2.454
3_700_00_1_1	539.531	316.999	222.531	4.985	2.345
3_700_03_0_0	3.869.611	2.281.754	1.587.857	24.516	2.511
3_700_03_0_1	2.273.617	2.160.434	113.183	24.128	1.780
3_700_03_1_0	3.700.935	923.644	2.777.291	15.097	4.525
3_700_03_1_1	876.714	687.427	189.286	9.033	4.596
3_900_00_0_0	3.378.078	1.898.373	1.479.705	17.783	2.540
3_900_00_0_1	1.970.702	1.818.974	151.728	17.112	1.847
3_900_00_1_0	3.064.053	569.631	2.494.421	9.670	4.273
3_900_00_1_1	751.580	450.351	301.229	6.575	4.374
3_900_03_0_0	4.300.877	2.608.632	1.692.245	25.616	2.781
3_900_03_0_1	2.612.526	2.502.747	109.779	25.616	1.864
3_900_03_1_0	4.191.617	954.144	3.237.472	17.895	6.068
3_900_03_1_1	928.491	705.963	222.527	9.753	6.211
5_700_00_0_0	1.927.226	1.102.690	824.536	10.864	1.214
5_700_00_0_1	1.218.535	1.089.996	128.538	10.521	925
5_700_00_1_0	1.326.569	163.665	1.162.904	3.789	1.855
5_700_00_1_1	260.194	150.040	110.153	1.971	1.224
5_700_03_0_0	3.562.935	1.933.929	1.629.005	26.575	2.600
5_700_03_0_1	1.893.109	1.839.289	53.820	26.094	1.688
5_700_03_1_0	3.296.444	484.629	2.811.814	14.156	4.455
5_700_03_1_1	439.999	339.631	100.368	6.853	3.554
5_900_00_0_0	3.144.068	1.784.958	1.359.109	17.093	2.144
5_900_00_0_1	1.914.523	1.751.820	162.703	16.851	1.439
5_900_00_1_0	2.611.613	298.549	2.313.064	8.031	3.928
5_900_00_1_1	414.714	254.373	160.341	3.297	2.878
5_900_03_0_0	4.100.520	2.300.076	1.800.443	27.657	2.950
5_900_03_0_1	2.312.885	2.214.595	98.289	27.497	2.042
5_900_03_1_0	3.850.199	448.082	3.402.117	13.235	6.081
5_900_03_1_1	455.299	319.567	135.732	5.264	4.679

Tabla 52. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - americano. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
3_700_00_0_0	15.559.481	4.157	14.384.726	523.173	456.976
3_700_00_0_1	8.703.107	1.275	8.170.106	491.510	350.059
3_700_00_1_0	13.767.271	311	13.489.042	500.279	460.690
3_700_00_1_1	4.934.433	0	4.701.199	467.417	354.797
3_700_03_0_0	39.946.230	102.637	16.257.757	966.808	922.894
3_700_03_0_1	39.251.517	101.368	15.838.106	945.173	880.298
3_700_03_1_0	44.312.677	115.857	17.588.547	946.940	924.738
3_700_03_1_1	43.048.040	113.377	16.874.183	923.409	881.848
3_900_00_0_0	21.573.775	22.499	16.254.895	445.410	409.040
3_900_00_0_1	13.091.329	17.222	8.968.526	424.982	312.443
3_900_00_1_0	20.118.618	7.224	18.327.541	433.271	412.886
3_900_00_1_1	8.767.470	1.921	8.171.949	403.588	316.150
3_900_03_0_0	38.738.171	97.795	16.194.590	739.333	712.314
3_900_03_0_1	37.977.588	96.423	15.716.638	711.636	651.432
3_900_03_1_0	43.098.025	111.214	17.476.159	723.302	715.566
3_900_03_1_1	41.402.432	107.349	16.627.730	688.938	651.968
5_700_00_0_0	14.057.209	3.666	12.967.563	570.446	497.821
5_700_00_0_1	8.934.159	2.578	8.079.479	545.392	390.720
5_700_00_1_0	11.025.157	0	10.794.020	530.222	502.715
5_700_00_1_1	3.622.572	0	3.366.742	503.154	396.971
5_700_03_0_0	39.986.586	101.037	16.636.874	898.316	880.716
5_700_03_0_1	38.639.251	98.925	15.763.079	874.022	840.880
5_700_03_1_0	41.862.518	106.159	17.340.642	897.360	882.432
5_700_03_1_1	39.576.582	102.584	15.861.468	872.235	842.612
5_900_00_0_0	22.569.001	27.249	16.153.367	509.005	444.043
5_900_00_0_1	14.537.433	24.971	8.627.349	486.842	351.323
5_900_00_1_0	20.424.594	3.252	19.544.892	456.280	447.882
5_900_00_1_1	8.541.787	48	8.373.810	428.686	355.858
5_900_03_0_0	39.128.440	94.431	17.339.417	695.343	680.221
5_900_03_0_1	37.551.503	91.497	16.400.615	669.207	619.987
5_900_03_1_0	40.969.642	100.330	17.833.196	691.152	683.041
5_900_03_1_1	37.695.712	94.446	15.868.428	652.222	620.890

Tabla 53. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - americano. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
3_700_00_0_0	30,04	30,32	30,14	29,32	0,18
3_700_00_0_1	29,33	29,63	29,43	29,32	0,20
3_700_00_1_0	29,71	30,00	29,79	28,66	0,21
3_700_00_1_1	28,71	29,01	28,82	28,65	0,20
3_700_03_0_0	27,60	27,79	27,66	26,69	0,13
3_700_03_0_1	27,54	27,74	27,61	26,69	0,13
3_700_03_1_0	27,54	27,70	27,59	26,49	0,11
3_700_03_1_1	27,43	27,57	27,47	26,48	0,10
3_900_00_0_0	24,13	24,35	24,22	23,29	0,13
3_900_00_0_1	23,32	23,50	23,41	23,28	0,09
3_900_00_1_0	23,99	24,05	24,01	22,58	0,04
3_900_00_1_1	22,82	22,85	22,84	22,57	0,01
3_900_03_0_0	21,54	21,72	21,61	20,89	0,11
3_900_03_0_1	21,50	21,67	21,57	20,88	0,11
3_900_03_1_0	21,47	21,52	21,48	20,57	0,04
3_900_03_1_1	21,35	21,36	21,35	20,56	0,00
5_700_00_0_0	22,35	22,64	22,46	21,82	0,18
5_700_00_0_1	21,79	22,08	21,90	21,82	0,18
5_700_00_1_0	21,71	21,88	21,81	20,86	0,07
5_700_00_1_1	20,78	21,00	20,90	20,81	0,10
5_700_03_0_0	23,09	23,25	23,15	22,02	0,10
5_700_03_0_1	22,97	23,12	23,02	22,02	0,10
5_700_03_1_0	23,03	23,13	23,07	21,79	0,07
5_700_03_1_1	22,79	22,88	22,82	21,78	0,05
5_900_00_0_0	18,09	18,30	18,18	17,25	0,12
5_900_00_0_1	17,28	17,51	17,37	17,24	0,14
5_900_00_1_0	17,76	17,89	17,83	16,27	0,06
5_900_00_1_1	16,31	16,49	16,38	16,20	0,10
5_900_03_0_0	18,03	18,27	18,13	17,28	0,14
5_900_03_0_1	17,93	18,16	18,03	17,28	0,13
5_900_03_1_0	17,94	18,08	18,00	16,84	0,09
5_900_03_1_1	17,65	17,78	17,71	16,84	0,07

Tabla 54. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - americano. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
3_700_00_0_0	88.259.648	88.542.937	58.925.065	58.971.477	325.415
3_700_00_0_1	89.823.828	90.087.728	86.700.621	86.716.184	217.101
3_700_00_1_0	108.140.551	108.434.395	67.006.797	67.071.814	410.597
3_700_00_1_1	110.192.192	110.460.192	105.041.580	105.064.213	308.344
3_700_03_0_0	38.895.555	39.421.793	9.173.768	9.190.679	738.532
3_700_03_0_1	39.506.886	40.024.729	12.769.647	12.801.369	2.190.294
3_700_03_1_0	45.623.298	46.205.151	10.671.233	10.697.332	846.840
3_700_03_1_1	46.514.452	47.084.523	17.436.534	17.486.912	3.405.732
3_900_00_0_0	67.688.841	68.000.286	29.544.873	29.595.016	378.939
3_900_00_0_1	70.666.977	70.922.731	66.502.973	66.519.395	356.998
3_900_00_1_0	94.684.753	95.168.556	34.337.092	34.408.678	503.517
3_900_00_1_1	99.012.451	99.425.884	89.095.359	89.138.128	707.644
3_900_03_0_0	34.182.122	34.698.393	6.990.273	7.002.012	396.668
3_900_03_0_1	35.370.505	35.858.322	10.669.199	10.698.365	1.927.723
3_900_03_1_0	44.563.339	45.227.088	7.997.551	8.018.979	460.882
3_900_03_1_1	46.577.776	47.204.835	17.231.477	17.310.384	3.353.685
5_700_00_0_0	91.811.464	92.095.120	70.255.749	70.299.142	254.921
5_700_00_0_1	92.431.091	92.696.721	90.402.617	90.430.977	189.952
5_700_00_1_0	116.072.789	116.299.501	83.083.692	83.154.581	362.618
5_700_00_1_1	116.960.455	117.160.588	114.351.689	114.391.910	231.104
5_700_03_0_0	46.793.160	47.350.977	13.508.792	13.535.373	864.566
5_700_03_0_1	47.518.431	48.066.573	19.756.923	19.815.687	2.291.615
5_700_03_1_0	55.820.303	56.429.303	16.652.434	16.694.006	1.008.997
5_700_03_1_1	56.878.614	57.466.199	27.966.888	28.038.042	3.429.308
5_900_00_0_0	70.335.521	70.749.643	34.066.743	34.122.987	434.910
5_900_00_0_1	72.075.173	72.445.532	68.156.776	68.193.449	348.402
5_900_00_1_0	104.178.977	104.627.991	42.295.745	42.390.737	646.116
5_900_00_1_1	106.760.965	107.150.766	99.597.520	99.697.759	641.320
5_900_03_0_0	40.514.321	41.090.690	8.795.138	8.817.128	509.909
5_900_03_0_1	41.979.545	42.524.866	15.934.281	15.994.219	2.010.517
5_900_03_1_0	56.484.986	57.238.128	11.165.151	11.209.742	663.900
5_900_03_1_1	58.841.225	59.545.885	28.534.794	28.667.893	3.380.784

Tabla 55. Resultados sin recirculación. Escenario cantábrico - americano. Contaminación remanente.

Modelo	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes
3_700_00_0_0	1.646.124	1.351.289	294.835	1.169	13.614
3_700_00_0_1	1.487.590	1.331.127	156.463	1.169	13.614
3_700_00_1_0	602.309	352.735	249.573	1.130	10.004
3_700_00_1_1	443.253	332.935	110.318	1.130	10.004
3_700_03_0_0	950.169	722.602	227.566	1.138	12.136
3_700_03_0_1	784.326	715.785	68.541	1.138	12.136
3_700_03_1_0	202.073	124.480	77.593	1.117	9.904
3_700_03_1_1	127.049	121.168	5.880	1.117	9.904
3_900_00_0_0	1.762.021	1.494.458	267.563	1.264	14.568
3_900_00_0_1	1.597.699	1.478.025	119.673	1.265	14.563
3_900_00_1_0	681.333	439.729	241.603	1.217	11.358
3_900_00_1_1	516.561	423.868	92.693	1.217	11.358
3_900_03_0_0	1.216.916	984.820	232.095	1.234	13.434
3_900_03_0_1	1.023.370	973.044	50.326	1.234	13.434
3_900_03_1_0	461.183	250.721	210.461	1.210	11.180
3_900_03_1_1	266.627	238.592	28.035	1.210	11.180
5_700_00_0_0	1.832.809	1.534.761	298.047	1.161	13.852
5_700_00_0_1	1.694.513	1.530.953	163.559	1.161	13.852
5_700_00_1_0	619.234	379.891	239.343	1.125	12.051
5_700_00_1_1	480.698	376.478	104.219	1.125	12.051
5_700_03_0_0	975.203	789.598	185.605	1.136	13.154
5_700_03_0_1	840.199	789.012	51.187	1.136	13.154
5_700_03_1_0	251.689	203.366	48.323	1.116	11.829
5_700_03_1_1	209.923	202.638	7.285	1.116	11.829
5_900_00_0_0	1.883.195	1.600.173	283.021	1.245	14.933
5_900_00_0_1	1.727.944	1.593.574	134.369	1.245	14.933
5_900_00_1_0	733.484	500.005	233.478	1.214	13.293
5_900_00_1_1	577.718	493.551	84.167	1.214	13.293
5_900_03_0_0	1.265.011	1.041.311	223.699	1.230	14.196
5_900_03_0_1	1.076.723	1.032.203	44.520	1.230	14.196
5_900_03_1_0	532.982	324.133	208.848	1.196	13.107
5_900_03_1_1	343.431	314.968	28.463	1.196	13.107

Tabla 56. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - europeo. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes
3_700_00_0_0	8.048.920	5.127.328	2.921.592	38.785	11.225
3_700_00_0_1	6.687.735	5.059.882	1.627.852	38.230	12.543
3_700_00_1_0	4.094.301	702.968	3.391.333	14.288	16.147
3_700_00_1_1	2.216.821	649.780	1.567.040	12.407	18.097
3_700_03_0_0	9.346.375	5.382.180	3.964.195	45.074	18.137
3_700_03_0_1	6.474.030	5.292.315	1.181.715	44.877	17.391
3_700_03_1_0	914.532	16.121	898.410	10.209	18.019
3_700_03_1_1	13.266	6.434	6.832	147	1.478
3_900_00_0_0	12.896.209	9.339.075	3.557.133	62.512	16.710
3_900_00_0_1	10.620.119	9.194.307	1.425.812	61.171	14.189
3_900_00_1_0	7.982.313	2.278.597	5.703.715	28.247	27.058
3_900_00_1_1	4.183.974	2.108.114	2.075.859	23.353	27.110
3_900_03_0_0	13.856.563	9.621.453	4.235.110	72.522	19.472
3_900_03_0_1	10.252.424	9.418.134	834.290	71.580	16.941
3_900_03_1_0	8.732.375	1.097.431	7.634.944	27.895	39.237
3_900_03_1_1	1.669.627	867.982	801.645	19.938	31.694
5_700_00_0_0	6.606.545	4.334.983	2.271.561	35.626	8.176
5_700_00_0_1	5.521.952	4.315.291	1.206.661	35.276	8.011
5_700_00_1_0	2.141.084	290.611	1.850.472	5.953	10.086
5_700_00_1_1	902.847	280.610	622.237	4.487	7.640
5_700_03_0_0	6.444.470	3.470.207	2.974.263	39.902	17.941
5_700_03_0_1	4.264.806	3.464.575	800.231	39.925	16.015
5_700_03_1_0	187.743	16.224	171.518	1.969	6.095
5_700_03_1_1	17.324	15.864	1.460	276	215
5_900_00_0_0	11.750.762	8.499.138	3.251.624	58.828	14.380
5_900_00_0_1	9.807.543	8.445.141	1.362.401	58.669	11.700
5_900_00_1_0	5.771.144	1.351.283	4.419.861	15.398	23.998
5_900_00_1_1	2.563.937	1.294.321	1.269.616	13.723	19.113
5_900_03_0_0	11.911.640	7.588.063	4.323.577	63.238	21.534
5_900_03_0_1	8.221.111	7.454.789	766.321	62.178	17.729
5_900_03_1_0	5.985.035	351.367	5.633.667	21.422	36.049
5_900_03_1_1	660.065	285.567	374.497	7.163	16.018

Tabla 57. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - europeo. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes
3_700_00_0_0	867.914	497.774	370.139	4.293	1.505
3_700_00_0_1	690.452	490.242	200.209	4.186	1.654
3_700_00_1_0	502.570	72.668	429.902	1.698	2.134
3_700_00_1_1	260.507	66.874	193.632	1.465	2.362
3_700_03_0_0	1.171.445	641.563	529.881	5.385	2.576
3_700_03_0_1	780.163	630.026	150.137	5.360	2.258
3_700_03_1_0	123.658	1.575	122.082	1.385	2.443
3_700_03_1_1	1.172	294	878	6	193
3_900_00_0_0	1.356.451	889.901	466.549	7.033	2.295
3_900_00_0_1	1.053.763	872.962	180.800	6.868	1.902
3_900_00_1_0	961.167	226.703	734.463	3.400	3.637
3_900_00_1_1	466.182	207.714	258.468	2.805	3.546
3_900_03_0_0	1.654.534	1.077.119	577.415	8.537	2.845
3_900_03_0_1	1.158.448	1.051.584	106.863	8.413	2.212
3_900_03_1_0	1.145.260	127.764	1.017.496	3.508	5.294
3_900_03_1_1	200.832	99.557	101.275	2.497	4.081
5_700_00_0_0	687.439	411.025	276.413	3.780	1.057
5_700_00_0_1	549.889	408.892	140.996	3.732	1.009
5_700_00_1_0	254.896	26.372	228.524	766	1.301
5_700_00_1_1	99.298	25.325	73.972	503	965
5_700_03_0_0	793.773	406.546	387.227	4.830	2.453
5_700_03_0_1	505.595	405.848	99.747	4.833	2.034
5_700_03_1_0	23.742	614	23.127	268	830
5_700_03_1_1	673	576	97	7	14
5_900_00_0_0	1.212.581	802.179	410.402	6.249	1.928
5_900_00_0_1	960.321	796.176	164.145	6.153	1.503
5_900_00_1_0	667.719	116.940	550.778	1.859	3.149
5_900_00_1_1	260.486	111.085	149.401	1.509	2.396
5_900_03_0_0	1.404.082	833.854	570.228	7.401	3.000
5_900_03_0_1	913.467	817.571	95.895	7.238	2.257
5_900_03_1_0	769.124	32.155	736.968	2.907	4.897
5_900_03_1_1	70.137	24.654	45.482	843	2.010

Tabla 58. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - europeo. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
3_700_00_0_0	8.497.573	0	8.225.029	584.981	492.466
3_700_00_0_1	6.562.318	0	6.274.816	569.130	412.794
3_700_00_1_0	6.860.032	0	6.611.638	543.724	495.376
3_700_00_1_1	4.232.091	0	3.963.943	526.513	416.227
3_700_03_0_0	23.845.676	41.577	14.204.245	1.034.280	1.008.231
3_700_03_0_1	22.665.290	39.828	13.397.182	1.012.705	944.223
3_700_03_1_0	20.816.084	14.901	17.305.844	1.017.120	1.012.764
3_700_03_1_1	19.273.597	10.873	16.587.600	863.818	857.939
3_900_00_0_0	14.383.620	582	14.053.886	494.276	428.979
3_900_00_0_1	10.486.773	447	10.176.046	481.225	361.674
3_900_00_1_0	13.076.663	6	12.904.478	471.053	430.680
3_900_00_1_1	8.190.164	0	8.000.107	456.484	363.824
3_900_03_0_0	28.584.518	65.029	13.575.206	765.373	735.073
3_900_03_0_1	27.760.520	64.568	12.856.941	752.351	702.104
3_900_03_1_0	29.101.545	64.731	14.169.376	745.367	736.004
3_900_03_1_1	27.725.915	63.666	13.033.645	732.061	704.047
5_700_00_0_0	6.658.651	113	6.322.624	626.479	530.976
5_700_00_0_1	5.560.065	106	5.220.034	616.042	452.633
5_700_00_1_0	4.143.734	0	3.861.806	573.148	534.985
5_700_00_1_1	2.387.628	0	2.096.413	561.071	456.883
5_700_03_0_0	21.140.693	29.405	14.268.601	982.072	976.683
5_700_03_0_1	19.402.603	27.414	12.936.968	935.087	883.969
5_700_03_1_0	18.480.658	6.594	16.837.223	976.460	975.109
5_700_03_1_1	16.690.471	4.522	15.379.354	796.441	789.157
5_900_00_0_0	13.936.906	622	13.592.730	543.769	463.236
5_900_00_0_1	10.702.486	541	10.365.090	533.683	399.460
5_900_00_1_0	12.051.546	0	11.875.657	497.644	465.423
5_900_00_1_1	7.390.916	0	7.192.679	486.292	402.161
5_900_03_0_0	27.487.050	58.014	14.071.628	733.514	711.546
5_900_03_0_1	26.176.176	57.544	12.865.194	721.181	676.735
5_900_03_1_0	27.175.809	55.475	14.355.776	720.329	712.592
5_900_03_1_1	24.869.763	53.836	12.416.995	707.485	679.044

Tabla 59. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - europeo. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
3_700_00_0_0	30,66	30,88	30,74	30,48	0,14
3_700_00_0_1	30,53	30,75	30,61	30,48	0,14
3_700_00_1_0	30,39	30,55	30,43	30,06	0,12
3_700_00_1_1	30,18	30,37	30,25	30,06	0,12
3_700_03_0_0	27,14	27,21	27,17	26,57	0,04
3_700_03_0_1	26,98	27,08	27,02	26,57	0,06
3_700_03_1_0	27,07	27,10	27,08	26,06	0,02
3_700_03_1_1	26,61	26,75	26,66	26,05	0,10
3_900_00_0_0	23,70	23,84	23,78	23,44	0,07
3_900_00_0_1	23,50	23,64	23,57	23,44	0,07
3_900_00_1_0	23,56	23,63	23,58	23,09	0,05
3_900_00_1_1	23,29	23,36	23,31	23,08	0,05
3_900_03_0_0	20,84	20,92	20,88	20,51	0,04
3_900_03_0_1	20,82	20,89	20,85	20,50	0,04
3_900_03_1_0	20,80	20,90	20,83	20,39	0,07
3_900_03_1_1	20,76	20,84	20,78	20,39	0,06
5_700_00_0_0	23,22	23,37	23,30	23,12	0,07
5_700_00_0_1	23,14	23,28	23,21	23,12	0,07
5_700_00_1_0	22,75	22,91	22,82	22,58	0,08
5_700_00_1_1	22,60	22,73	22,66	22,58	0,07
5_700_03_0_0	22,59	22,65	22,61	21,87	0,03
5_700_03_0_1	22,30	22,37	22,33	21,86	0,04
5_700_03_1_0	22,44	22,48	22,46	21,21	0,02
5_700_03_1_1	21,81	21,93	21,85	21,18	0,08
5_900_00_0_0	17,77	17,85	17,81	17,50	0,05
5_900_00_0_1	17,57	17,66	17,61	17,50	0,05
5_900_00_1_0	17,46	17,62	17,51	17,02	0,12
5_900_00_1_1	17,09	17,33	17,17	17,01	0,16
5_900_03_0_0	17,35	17,47	17,41	16,98	0,06
5_900_03_0_1	17,30	17,41	17,35	16,97	0,06
5_900_03_1_0	17,30	17,42	17,35	16,81	0,07
5_900_03_1_1	17,18	17,29	17,23	16,81	0,06

Tabla 60. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - europeo. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
3_700_00_0_0	66.196.958	66.371.760	54.666.414	54.686.442	378.337
3_700_00_0_1	66.379.944	66.553.626	61.231.919	61.241.722	295.796
3_700_00_1_0	77.598.207	77.740.590	60.986.822	61.017.261	493.351
3_700_00_1_1	77.867.764	78.006.674	70.498.857	70.510.365	362.785
3_700_03_0_0	38.803.564	39.078.267	16.922.823	16.944.064	1.723.610
3_700_03_0_1	39.608.047	39.874.670	20.513.782	20.548.167	1.956.738
3_700_03_1_0	53.432.959	53.679.937	22.572.777	22.610.182	2.516.531
3_700_03_1_1	54.339.475	54.576.135	26.903.278	26.921.380	2.431.458
3_900_00_0_0	53.468.401	53.666.382	35.304.396	35.331.325	666.574
3_900_00_0_1	54.310.623	54.499.708	48.414.870	48.426.652	442.095
3_900_00_1_0	66.372.274	66.618.095	38.857.996	38.898.450	912.327
3_900_00_1_1	67.497.742	67.730.520	56.717.279	56.740.929	698.420
3_900_03_0_0	33.963.486	34.262.573	14.462.579	14.480.588	1.339.494
3_900_03_0_1	34.370.109	34.664.851	16.883.940	16.914.218	1.725.948
3_900_03_1_0	39.606.706	39.946.736	15.520.226	15.547.963	1.798.339
3_900_03_1_1	40.260.776	40.590.424	20.720.202	20.761.589	2.526.398
5_700_00_0_0	69.598.168	69.762.168	62.855.980	62.874.087	234.016
5_700_00_0_1	69.682.970	69.844.976	66.634.663	66.652.261	223.178
5_700_00_1_0	81.905.910	81.989.943	72.420.222	72.447.740	292.979
5_700_00_1_1	82.035.683	82.115.761	78.842.477	78.856.770	198.964
5_700_03_0_0	46.532.025	46.805.933	22.705.442	22.739.064	1.846.417
5_700_03_0_1	47.477.013	47.735.875	28.009.869	28.061.125	1.904.174
5_700_03_1_0	62.769.065	62.995.209	31.096.797	31.119.401	2.250.102
5_700_03_1_1	63.682.479	63.893.693	35.600.529	35.623.773	2.053.980
5_900_00_0_0	56.164.017	56.391.928	40.646.781	40.678.470	589.922
5_900_00_0_1	56.503.498	56.725.571	51.487.647	51.512.404	408.591
5_900_00_1_0	71.774.054	71.998.742	46.926.077	46.982.537	880.259
5_900_00_1_1	72.258.894	72.474.534	64.263.681	64.308.318	604.957
5_900_03_0_0	38.579.018	38.915.130	16.960.267	16.990.903	1.460.207
5_900_03_0_1	39.015.774	39.346.016	21.228.718	21.278.127	1.772.457
5_900_03_1_0	47.688.052	48.045.050	19.393.945	19.442.007	1.993.099
5_900_03_1_1	48.390.226	48.733.304	28.633.559	28.677.613	2.323.306

Tabla 61. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - europeo. Contaminación remanente.

Modelo	VTotTotal	VTotTotalExp	VTotTotalPos	VMaxDia	VMaxMes
3_700_00_0_0	2.086.353	1.804.852	281.501	1.294	15.372
3_700_00_0_1	1.916.052	1.784.339	131.713	1.294	15.372
3_700_00_1_0	1.042.889	781.043	261.846	1.252	12.149
3_700_00_1_1	872.279	760.557	111.722	1.252	12.149
3_700_03_0_0	1.418.724	1.177.402	241.322	1.251	14.045
3_700_03_0_1	1.212.818	1.159.637	53.180	1.251	14.045
3_700_03_1_0	676.645	448.020	228.625	1.224	11.924
3_700_03_1_1	471.007	430.417	40.589	1.224	11.924
3_900_00_0_0	1.986.965	1.731.289	255.675	1.313	15.456
3_900_00_0_1	1.813.573	1.713.612	99.961	1.313	15.458
3_900_00_1_0	902.819	659.331	243.487	1.266	12.346
3_900_00_1_1	729.229	641.722	87.506	1.266	12.346
3_900_03_0_0	1.433.992	1.206.807	227.184	1.264	14.243
3_900_03_0_1	1.245.145	1.194.906	50.239	1.264	14.243
3_900_03_1_0	667.793	454.972	212.821	1.241	11.872
3_900_03_1_1	480.509	443.486	37.023	1.241	11.872
5_700_00_0_0	2.265.565	1.981.762	283.803	1.265	15.398
5_700_00_0_1	2.115.594	1.977.670	137.923	1.265	15.398
5_700_00_1_0	1.064.285	813.530	250.754	1.226	13.526
5_700_00_1_1	914.074	809.481	104.593	1.226	13.526
5_700_03_0_0	1.452.993	1.233.894	219.098	1.205	14.942
5_700_03_0_1	1.250.158	1.218.738	31.419	1.205	14.942
5_700_03_1_0	731.547	514.568	216.978	1.179	13.606
5_700_03_1_1	528.753	499.475	29.277	1.179	13.606
5_900_00_0_0	2.104.578	1.833.796	270.782	1.294	15.502
5_900_00_0_1	1.941.373	1.827.117	114.256	1.294	15.502
5_900_00_1_0	961.326	731.334	229.991	1.244	13.918
5_900_00_1_1	797.564	724.668	72.895	1.244	13.918
5_900_03_0_0	1.487.883	1.270.666	217.217	1.255	15.013
5_900_03_0_1	1.305.106	1.261.324	43.781	1.255	15.013
5_900_03_1_0	756.862	553.009	203.853	1.228	13.955
5_900_03_1_1	575.235	543.854	31.380	1.228	13.955

Tabla 62. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - americano. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes
3_700_00_0_0	12.919.681	9.562.306	3.357.375	75.976	12.449
3_700_00_0_1	11.231.593	9.478.446	1.753.146	74.850	14.553
3_700_00_1_0	7.749.421	3.734.377	4.015.043	48.138	15.783
3_700_00_1_1	5.556.109	3.641.867	1.914.241	46.763	18.895
3_700_03_0_0	19.984.397	14.365.122	5.619.274	117.042	24.629
3_700_03_0_1	15.219.900	14.021.328	1.198.571	114.457	22.609
3_700_03_1_0	14.514.346	5.999.208	8.515.137	83.897	38.055
3_700_03_1_1	7.040.604	5.523.190	1.517.414	72.307	37.653
3_900_00_0_0	21.216.146	15.851.394	5.364.751	112.979	27.641
3_900_00_0_1	17.427.691	15.635.910	1.791.781	111.090	20.868
3_900_00_1_0	13.659.767	5.522.702	8.137.064	65.017	41.595
3_900_00_1_1	7.808.669	5.248.011	2.560.657	58.925	34.769
3_900_03_0_0	24.825.516	18.388.731	6.436.785	138.818	30.923
3_900_03_0_1	19.363.869	18.081.551	1.282.317	137.402	25.688
3_900_03_1_0	18.087.218	6.911.450	11.175.768	95.381	54.449
3_900_03_1_1	8.271.342	6.439.711	1.831.631	80.776	50.211
5_700_00_0_0	10.639.372	8.107.856	2.531.515	69.558	9.944
5_700_00_0_1	9.442.058	8.080.954	1.361.104	69.072	10.196
5_700_00_1_0	4.541.179	2.164.386	2.376.792	22.083	10.427
5_700_00_1_1	3.153.845	2.139.210	1.014.634	21.379	10.450
5_700_03_0_0	16.100.254	11.088.200	5.012.053	116.218	24.448
5_700_03_0_1	11.543.426	10.834.933	708.492	115.418	22.805
5_700_03_1_0	10.126.365	3.120.101	7.006.263	66.228	36.160
5_700_03_1_1	3.669.715	2.858.547	811.168	55.380	28.757
5_900_00_0_0	19.414.969	14.614.661	4.800.307	106.712	21.934
5_900_00_0_1	16.292.156	14.534.334	1.757.822	106.450	17.017
5_900_00_1_0	9.938.270	3.631.692	6.306.577	37.710	35.227
5_900_00_1_1	5.049.328	3.536.853	1.512.475	36.102	24.507
5_900_03_0_0	21.732.806	15.172.488	6.560.318	130.387	34.462
5_900_03_0_1	16.125.818	14.960.344	1.165.473	129.684	27.626
5_900_03_1_0	13.280.601	3.585.565	9.695.036	54.542	55.645
5_900_03_1_1	4.529.030	3.364.550	1.164.479	46.052	39.012

Tabla 63. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - americano. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes
3_700_00_0_0	1.228.337	822.241	406.096	7.987	1.534
3_700_00_0_1	1.015.681	813.430	202.250	7.857	1.823
3_700_00_1_0	808.413	321.227	487.186	5.111	2.029
3_700_00_1_1	533.365	311.959	221.406	4.953	2.351
3_700_03_0_0	2.368.000	1.645.384	722.615	13.757	3.309
3_700_03_0_1	1.747.529	1.602.100	145.428	13.425	2.777
3_700_03_1_0	1.817.381	719.838	1.097.542	10.337	5.005
3_700_03_1_1	846.773	659.896	186.877	8.876	4.651
3_900_00_0_0	2.076.610	1.402.587	674.023	11.938	3.630
3_900_00_0_1	1.592.826	1.378.677	214.149	11.644	2.656
3_900_00_1_0	1.491.136	478.943	1.012.193	7.279	5.427
3_900_00_1_1	751.580	450.341	301.238	6.574	4.375
3_900_03_0_0	2.794.597	1.965.387	829.209	15.760	4.157
3_900_03_0_1	2.085.057	1.927.929	157.128	15.586	3.205
3_900_03_1_0	2.188.536	762.440	1.426.096	11.568	7.056
3_900_03_1_1	928.427	705.876	222.550	9.767	6.197
5_700_00_0_0	965.289	674.437	290.851	6.701	1.137
5_700_00_0_1	819.661	671.701	147.959	6.650	1.181
5_700_00_1_0	422.747	150.780	271.967	2.035	1.224
5_700_00_1_1	256.169	148.452	107.716	1.955	1.208
5_700_03_0_0	1.901.538	1.263.228	638.310	13.617	3.241
5_700_03_0_1	1.317.702	1.232.366	85.336	13.513	2.731
5_700_03_1_0	1.257.426	359.446	897.979	7.998	4.773
5_700_03_1_1	426.350	327.673	98.677	6.675	3.539
5_900_00_0_0	1.863.358	1.282.258	581.100	10.579	2.830
5_900_00_0_1	1.473.515	1.273.617	199.898	10.436	2.077
5_900_00_1_0	1.011.846	263.393	748.452	3.497	4.490
5_900_00_1_1	414.720	254.362	160.357	3.293	2.858
5_900_03_0_0	2.409.799	1.580.731	829.067	15.004	4.536
5_900_03_0_1	1.695.853	1.555.854	139.998	14.696	3.326
5_900_03_1_0	1.557.070	343.937	1.213.132	6.190	7.246
5_900_03_1_1	455.286	319.518	135.767	5.255	4.669

Tabla 64. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - americano. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
3_700_00_0_0	8.648.243	126	8.389.019	497.478	418.621
3_700_00_0_1	7.379.418	114	7.115.720	483.508	351.952
3_700_00_1_0	6.760.392	0	6.538.419	481.099	421.228
3_700_00_1_1	4.913.253	0	4.680.060	466.494	354.868
3_700_03_0_0	41.870.093	109.032	16.704.909	943.308	904.128
3_700_03_0_1	41.475.997	108.396	16.446.746	934.177	881.106
3_700_03_1_0	43.703.896	114.159	17.362.223	932.287	905.212
3_700_03_1_1	43.044.492	113.365	16.873.284	922.453	881.922
3_900_00_0_0	17.877.783	15.656	14.142.808	425.194	372.012
3_900_00_0_1	12.397.055	12.925	9.265.643	413.449	313.633
3_900_00_1_0	15.848.682	3.684	14.877.212	416.150	374.332
3_900_00_1_1	8.767.441	1.921	8.171.920	403.590	316.152
3_900_03_0_0	41.023.265	104.155	17.016.409	713.621	688.542
3_900_03_0_1	40.197.899	102.883	16.450.973	701.765	651.629
3_900_03_1_0	42.825.108	109.448	17.604.610	701.794	690.446
3_900_03_1_1	41.402.434	107.349	16.627.715	688.943	651.969
5_700_00_0_0	7.291.457	319	6.951.160	540.597	459.495
5_700_00_0_1	7.025.074	311	6.693.870	531.003	393.247
5_700_00_1_0	4.179.095	0	3.917.817	512.030	463.065
5_700_00_1_1	3.591.177	0	3.334.803	501.569	397.058
5_700_03_0_0	39.978.708	102.766	16.225.816	883.028	865.846
5_700_03_0_1	39.510.112	102.079	15.909.829	873.061	841.730
5_700_03_1_0	40.389.123	103.482	16.475.198	882.212	866.870
5_700_03_1_1	39.561.336	102.534	15.857.765	871.926	842.713
5_900_00_0_0	17.714.902	19.514	13.080.808	476.258	408.038
5_900_00_0_1	13.568.520	18.348	9.184.620	466.773	352.671
5_900_00_1_0	14.845.177	848	14.517.337	439.104	410.664
5_900_00_1_1	8.541.787	48	8.373.810	428.689	355.855
5_900_03_0_0	39.970.880	96.890	17.617.761	675.374	660.125
5_900_03_0_1	38.547.342	95.048	16.580.661	663.928	620.239
5_900_03_1_0	40.141.923	97.221	17.718.513	666.372	661.923
5_900_03_1_1	37.695.660	94.446	15.868.412	652.226	620.887

Tabla 65. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - americano. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
3_700_00_0_0	29,25	29,58	29,35	29,07	0,23
3_700_00_0_1	29,11	29,42	29,21	29,07	0,21
3_700_00_1_0	28,90	29,24	29,00	28,62	0,24
3_700_00_1_1	28,67	29,02	28,80	28,63	0,22
3_700_03_0_0	27,53	27,67	27,58	26,59	0,09
3_700_03_0_1	27,49	27,63	27,54	26,59	0,09
3_700_03_1_0	27,47	27,63	27,52	26,47	0,11
3_700_03_1_1	27,41	27,57	27,46	26,47	0,11
3_900_00_0_0	23,66	23,80	23,73	23,07	0,07
3_900_00_0_1	23,18	23,30	23,24	23,07	0,07
3_900_00_1_0	23,48	23,51	23,49	22,57	0,02
3_900_00_1_1	22,82	22,85	22,84	22,57	0,01
3_900_03_0_0	21,48	21,57	21,52	20,75	0,05
3_900_03_0_1	21,44	21,53	21,48	20,75	0,05
3_900_03_1_0	21,44	21,46	21,44	20,56	0,02
3_900_03_1_1	21,35	21,36	21,35	20,56	0,00
5_700_00_0_0	21,46	21,63	21,55	21,43	0,08
5_700_00_0_1	21,43	21,60	21,52	21,43	0,08
5_700_00_1_0	20,85	21,06	20,94	20,78	0,11
5_700_00_1_1	20,78	20,96	20,86	20,78	0,10
5_700_03_0_0	22,96	23,04	22,99	21,92	0,05
5_700_03_0_1	22,91	22,99	22,94	21,92	0,05
5_700_03_1_0	22,88	22,97	22,91	21,77	0,06
5_700_03_1_1	22,79	22,87	22,81	21,77	0,06
5_900_00_0_0	17,43	17,50	17,46	16,92	0,04
5_900_00_0_1	17,05	17,10	17,07	16,92	0,03
5_900_00_1_0	17,00	17,11	17,05	16,21	0,06
5_900_00_1_1	16,31	16,49	16,38	16,20	0,10
5_900_03_0_0	17,96	18,10	18,03	17,14	0,07
5_900_03_0_1	17,87	18,00	17,93	17,14	0,07
5_900_03_1_0	17,84	17,97	17,90	16,84	0,08
5_900_03_1_1	17,65	17,78	17,71	16,84	0,07

Tabla 66. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - americano. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
3_700_00_0_0	97.596.879	97.870.060	88.993.236	89.008.891	235.002
3_700_00_0_1	97.706.845	97.981.738	93.820.019	93.838.519	262.207
3_700_00_1_0	110.154.120	110.417.127	97.931.924	97.955.632	312.082
3_700_00_1_1	110.316.128	110.581.029	105.191.183	105.213.702	308.779
3_700_03_0_0	42.179.840	42.721.392	12.685.815	12.702.063	2.100.464
3_700_03_0_1	42.334.829	42.878.021	14.418.986	14.458.153	2.651.692
3_700_03_1_0	46.385.826	46.952.772	14.543.816	14.566.802	2.578.630
3_700_03_1_1	46.598.548	47.167.041	17.493.497	17.543.496	3.433.460
3_900_00_0_0	77.634.091	77.950.625	50.701.261	50.746.065	859.518
3_900_00_0_1	78.828.434	79.132.439	73.214.086	73.236.966	476.387
3_900_00_1_0	97.371.404	97.800.838	57.922.661	57.989.294	1.165.440
3_900_00_1_1	99.012.465	99.425.909	89.095.372	89.138.149	707.643
3_900_03_0_0	38.197.829	38.738.557	8.927.413	8.947.947	1.818.400
3_900_03_0_1	38.854.602	39.388.799	12.364.701	12.406.536	2.387.148
3_900_03_1_0	45.637.980	46.274.287	10.627.849	10.663.116	2.355.812
3_900_03_1_1	46.578.357	47.205.447	17.231.883	17.310.807	3.353.733
5_700_00_0_0	102.117.444	102.378.802	98.715.224	98.726.414	124.738
5_700_00_0_1	102.192.553	102.452.400	99.750.139	99.783.923	230.666
5_700_00_1_0	116.915.754	117.113.020	112.202.296	112.220.258	150.851
5_700_00_1_1	117.016.247	117.211.315	114.524.497	114.564.509	228.515
5_700_03_0_0	51.060.740	51.629.409	20.936.478	20.960.041	2.238.903
5_700_03_0_1	51.218.999	51.787.986	22.915.444	22.982.046	2.745.460
5_700_03_1_0	56.719.037	57.306.324	24.491.355	24.522.688	2.746.354
5_700_03_1_1	56.929.183	57.515.101	28.010.189	28.080.332	3.441.296
5_900_00_0_0	80.688.921	81.071.043	59.800.729	59.850.988	721.229
5_900_00_0_1	81.226.463	81.600.506	76.244.191	76.293.681	478.320
5_900_00_1_0	105.976.397	106.378.444	72.118.081	72.210.718	1.098.215
5_900_00_1_1	106.760.965	107.150.854	99.597.520	99.697.802	641.314
5_900_03_0_0	45.859.233	46.465.262	13.269.984	13.312.710	2.021.564
5_900_03_0_1	46.595.422	47.193.654	19.137.232	19.217.702	2.502.821
5_900_03_1_0	57.844.538	58.562.170	17.235.093	17.310.195	2.719.426
5_900_03_1_1	58.841.671	59.546.627	28.535.155	28.668.475	3.380.784

Tabla 67. Resultados sin recirculación. Escenario mediterráneo - americano. Contaminación remanente.

Modelo	VTotal	VTotalExp	VTotalPos	VMaxDia	VMaxMes	VFinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	5.454.742	4.645.952	808.790	2.104	52.871	2.243.485
RS_3_700_00_0_1	4.385.784	4.190.260	195.523	2.107	52.865	1.800.118
RS_3_700_03_0_0	4.749.911	3.854.728	895.182	1.978	42.310	1.445.177
RS_3_700_03_0_1	3.570.580	3.359.041	211.539	1.978	42.310	803.929
RS_3_900_00_0_0	5.503.955	4.743.658	760.297	2.248	53.739	2.449.416
RS_3_900_00_0_1	4.488.757	4.354.558	134.198	2.248	53.742	1.996.134
RS_3_900_03_0_0	4.981.315	4.200.153	781.162	2.156	42.136	1.791.735
RS_3_900_03_0_1	3.859.910	3.768.801	91.108	2.156	42.136	1.117.375
RS_5_700_00_0_0	5.721.420	4.898.845	822.574	2.127	46.747	2.494.787
RS_5_700_00_0_1	4.930.638	4.717.785	212.852	2.127	46.746	2.013.002
RS_5_700_03_0_0	4.561.999	3.830.660	731.339	2.061	37.692	1.724.184
RS_5_700_03_0_1	3.457.434	3.378.634	78.800	2.055	37.690	1.105.086
RS_5_900_00_0_0	5.595.395	4.782.743	812.652	2.236	48.670	2.852.084
RS_5_900_00_0_1	4.726.552	4.543.255	183.297	2.236	48.670	2.379.580
RS_5_900_03_0_0	4.817.264	4.065.938	751.325	2.178	37.255	2.164.528
RS_5_900_03_0_1	3.744.374	3.673.299	71.075	2.178	37.255	1.493.074

Tabla 68. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - europeo. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes	CODFinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	25.575.559	19.352.841	6.222.718	160.562	8.920	14.573.683
RS_3_700_00_0_1	17.800.075	16.374.955	1.425.120	133.879	8.924	9.859.246
RS_3_700_03_0_0	38.805.498	28.068.535	10.736.962	206.887	12.726	16.774.173
RS_3_700_03_0_1	25.636.017	23.168.178	2.467.839	191.783	11.885	8.715.401
RS_3_900_00_0_0	34.776.746	27.962.307	6.814.439	265.468	10.558	18.809.068
RS_3_900_00_0_1	25.378.114	24.311.706	1.066.408	265.529	9.572	13.268.306
RS_3_900_03_0_0	44.956.930	35.588.354	9.368.575	318.706	13.385	20.228.697
RS_3_900_03_0_1	31.957.253	30.949.031	1.008.222	318.706	11.429	11.757.029
RS_5_700_00_0_0	22.436.382	16.921.026	5.515.355	164.978	7.585	13.292.228
RS_5_700_00_0_1	16.970.369	15.707.512	1.262.856	165.000	6.557	9.167.214
RS_5_700_03_0_0	29.601.453	21.429.135	8.172.317	203.066	12.437	16.360.787
RS_5_700_03_0_1	18.774.947	18.045.693	729.253	176.933	9.572	8.794.280
RS_5_900_00_0_0	31.370.279	24.711.490	6.658.789	259.448	9.359	18.789.531
RS_5_900_00_0_1	23.995.108	22.712.465	1.282.642	259.448	7.959	13.696.865
RS_5_900_03_0_0	36.614.376	28.207.770	8.406.606	268.636	12.593	20.578.173
RS_5_900_03_0_1	25.486.986	24.771.596	715.389	268.636	10.165	12.588.114

Tabla 69. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - europeo. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes	NH4FinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	2.598.428	1.780.243	818.185	18.669	1.197	1.692.533
RS_3_700_00_0_1	1.639.381	1.461.361	178.020	15.106	1.197	1.018.961
RS_3_700_03_0_0	4.594.047	3.099.444	1.494.602	24.329	1.859	2.251.669
RS_3_700_03_0_1	2.833.380	2.511.587	321.793	18.656	1.591	1.088.648
RS_3_900_00_0_0	3.459.734	2.529.178	930.555	25.115	1.458	2.206.854
RS_3_900_00_0_1	2.261.544	2.122.348	139.196	20.006	1.321	1.366.899
RS_3_900_03_0_0	5.044.768	3.696.461	1.348.307	31.952	1.958	2.688.810
RS_3_900_03_0_1	3.263.679	3.129.562	134.117	28.371	1.543	1.422.757
RS_5_700_00_0_0	2.199.798	1.498.690	701.107	15.747	990	1.468.914
RS_5_700_00_0_1	1.516.138	1.367.947	148.191	15.036	841	910.593
RS_5_700_03_0_0	3.373.972	2.255.637	1.118.334	23.495	1.764	2.068.850
RS_5_700_03_0_1	1.969.547	1.878.990	90.557	20.465	1.213	1.009.487
RS_5_900_00_0_0	3.030.437	2.147.102	883.335	20.975	1.267	2.064.009
RS_5_900_00_0_1	2.085.043	1.927.148	157.894	18.319	1.049	1.322.167
RS_5_900_03_0_0	3.947.071	2.770.412	1.176.659	26.175	1.791	2.532.000
RS_5_900_03_0_1	2.471.847	2.380.273	91.573	22.897	1.300	1.373.012

Tabla 70. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - europeo. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
RS_3_700_00_0_0	14.031.407	2.838	13.053.900	651.488	542.528
RS_3_700_00_0_1	8.987.367	796	8.499.641	618.044	409.580
RS_3_700_03_0_0	27.083.616	59.872	13.232.421	1.230.781	1.043.042
RS_3_700_03_0_1	25.466.118	56.395	12.387.451	1.167.608	940.998
RS_3_900_00_0_0	17.493.135	12.602	14.436.600	553.975	472.672
RS_3_900_00_0_1	11.883.554	6.631	10.137.243	528.243	360.110
RS_3_900_03_0_0	27.599.985	63.038	13.068.229	867.789	764.235
RS_3_900_03_0_1	26.833.518	62.329	12.435.479	831.383	701.539
RS_5_700_00_0_0	12.502.636	1.478	11.832.472	694.276	579.830
RS_5_700_00_0_1	8.384.169	1.174	7.787.289	662.685	448.856
RS_5_700_03_0_0	25.148.191	50.615	13.392.622	1.052.882	998.828
RS_5_700_03_0_1	22.648.952	44.821	12.178.696	994.137	882.081
RS_5_900_00_0_0	17.714.372	12.586	14.616.756	608.602	505.589
RS_5_900_00_0_1	12.262.365	6.558	10.522.202	580.482	397.671
RS_5_900_03_0_0	27.135.347	58.431	13.635.579	806.442	734.965
RS_5_900_03_0_1	25.911.814	57.581	12.582.782	775.399	676.412

Tabla 71. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - europeo. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
RS_3_700_00_0_0	31,25	31,44	31,30	30,94	0,14
RS_3_700_00_0_1	30,92	31,12	30,97	30,89	0,15
RS_3_700_03_0_0	27,62	27,92	27,76	26,24	0,17
RS_3_700_03_0_1	27,36	27,57	27,42	26,63	0,15
RS_3_900_00_0_0	24,11	24,25	24,16	23,80	0,09
RS_3_900_00_0_1	23,79	23,92	23,85	23,77	0,07
RS_3_900_03_0_0	21,03	21,34	21,22	20,78	0,12
RS_3_900_03_0_1	20,95	21,19	21,07	20,77	0,11
RS_5_700_00_0_0	23,93	24,19	24,05	23,71	0,14
RS_5_700_00_0_1	23,61	23,85	23,70	23,64	0,15
RS_5_700_03_0_0	22,85	22,98	22,91	22,24	0,07
RS_5_700_03_0_1	22,46	22,62	22,54	22,12	0,09
RS_5_900_00_0_0	18,30	18,44	18,35	17,99	0,09
RS_5_900_00_0_1	17,93	18,11	18,00	17,93	0,11
RS_5_900_03_0_0	17,60	17,79	17,68	17,33	0,11
RS_5_900_03_0_1	17,51	17,68	17,58	17,25	0,10

Tabla 72. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - europeo. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
RS_3_700_00_0_0	54.390.487	54.569.757	36.851.758	36.876.199	268.035
RS_3_700_00_0_1	56.473.259	56.641.287	53.287.599	53.293.946	281.385
RS_3_700_03_0_0	31.567.813	31.806.131	13.650.015	13.664.527	804.327
RS_3_700_03_0_1	33.593.002	33.812.278	17.774.039	17.796.675	1.768.853
RS_3_900_00_0_0	43.834.793	43.998.370	24.852.448	24.876.493	261.387
RS_3_900_00_0_1	46.246.229	46.385.891	42.822.023	42.827.905	356.949
RS_3_900_03_0_0	28.927.851	29.180.582	12.808.060	12.820.608	406.814
RS_3_900_03_0_1	30.053.633	30.295.422	14.950.769	14.967.316	1.552.178
RS_5_700_00_0_0	58.323.711	58.519.681	43.383.560	43.410.370	223.226
RS_5_700_00_0_1	59.331.031	59.510.171	57.140.538	57.153.152	234.215
RS_5_700_03_0_0	37.738.851	37.977.902	16.345.831	16.365.924	838.080
RS_5_700_03_0_1	40.469.237	40.679.225	23.346.314	23.386.270	1.587.671
RS_5_900_00_0_0	46.174.743	46.421.317	27.116.780	27.143.886	297.200
RS_5_900_00_0_1	47.755.364	47.976.040	44.596.830	44.610.591	323.681
RS_5_900_03_0_0	32.346.456	32.629.717	14.263.486	14.278.895	465.611
RS_5_900_03_0_1	33.682.154	33.956.011	17.929.228	17.958.380	1.452.877

Tabla 73. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - europeo. Contaminación remanente.

Modelo	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes	VFinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	5.902.377	5.115.924	786.453	2.260	55.429	2.730.000
RS_3_700_00_0_1	4.821.477	4.668.143	153.333	2.261	55.430	2.264.183
RS_3_700_03_0_0	5.229.442	4.436.046	793.395	2.139	47.288	1.961.213
RS_3_700_03_0_1	4.005.657	3.906.713	98.944	2.139	47.288	1.263.851
RS_3_900_00_0_0	5.708.098	4.960.431	747.667	2.304	54.682	2.716.035
RS_3_900_00_0_1	4.683.497	4.574.881	108.615	2.307	54.684	2.237.272
RS_3_900_03_0_0	5.188.762	4.427.476	761.286	2.238	46.178	2.049.047
RS_3_900_03_0_1	4.075.369	3.994.486	80.883	2.238	46.178	1.374.614
RS_5_700_00_0_0	6.129.882	5.329.430	800.451	2.239	51.245	2.980.662
RS_5_700_00_0_1	5.321.153	5.148.765	172.388	2.239	51.245	2.473.452
RS_5_700_03_0_0	5.021.518	4.292.507	729.011	2.186	42.666	2.247.028
RS_5_700_03_0_1	3.853.659	3.816.773	36.886	2.183	42.664	1.553.923
RS_5_900_00_0_0	5.790.575	4.994.549	796.025	2.282	50.770	3.116.982
RS_5_900_00_0_1	4.914.679	4.759.399	155.280	2.282	50.770	2.629.864
RS_5_900_03_0_0	5.004.926	4.264.912	740.013	2.256	40.918	2.425.920
RS_5_900_03_0_1	3.942.768	3.879.751	63.017	2.256	40.918	1.752.327

Tabla 74. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - americano. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes	CODFinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	38.600.142	30.231.235	8.368.906	266.787	12.543	23.797.412
RS_3_700_00_0_1	27.748.184	26.157.691	1.590.492	226.554	11.360	16.942.882
RS_3_700_03_0_0	61.379.939	47.277.450	14.102.488	404.792	20.219	31.377.458
RS_3_700_03_0_1	41.548.312	39.928.461	1.619.851	367.430	16.580	18.253.802
RS_3_900_00_0_0	55.597.239	44.752.402	10.844.837	415.122	17.532	32.255.641
RS_3_900_00_0_1	40.688.536	39.304.882	1.383.653	415.097	14.650	22.896.245
RS_3_900_03_0_0	72.070.008	57.958.249	14.111.758	540.263	21.340	35.221.082
RS_3_900_03_0_1	52.231.071	50.833.919	1.397.152	540.263	18.066	22.102.432
RS_5_700_00_0_0	34.188.495	27.147.876	7.040.619	268.291	9.844	21.365.386
RS_5_700_00_0_1	26.846.514	25.364.115	1.482.398	268.291	8.807	15.857.306
RS_5_700_03_0_0	49.820.234	36.978.033	12.842.201	405.298	19.946	30.689.919
RS_5_700_03_0_1	32.116.158	31.616.841	499.316	366.575	14.505	17.554.676
RS_5_900_00_0_0	51.244.103	40.617.538	10.626.564	443.107	15.412	32.201.541
RS_5_900_00_0_1	39.229.279	37.463.272	1.766.006	443.107	12.175	23.653.003
RS_5_900_03_0_0	60.972.944	47.458.024	13.514.920	454.020	21.250	36.383.952
RS_5_900_03_0_1	43.145.985	42.100.372	1.045.613	454.020	16.987	23.309.461

Tabla 75. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - americano. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes	NH4FinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	3.563.278	2.513.814	1.049.463	26.925	1.613	2.486.080
RS_3_700_00_0_1	2.298.703	2.113.679	185.024	21.964	1.446	1.550.366
RS_3_700_03_0_0	6.820.450	4.970.814	1.849.636	46.879	2.717	3.876.032
RS_3_700_03_0_1	4.323.033	4.122.597	200.435	40.682	2.088	2.108.402
RS_3_900_00_0_0	5.145.883	3.746.004	1.399.879	41.320	2.293	3.475.215
RS_3_900_00_0_1	3.351.554	3.182.373	169.181	33.611	1.892	2.147.122
RS_3_900_03_0_0	7.602.745	5.722.305	1.880.440	49.714	2.873	4.331.924
RS_3_900_03_0_1	5.062.352	4.885.075	177.276	48.087	2.321	2.508.238
RS_5_700_00_0_0	3.043.020	2.189.105	853.915	23.770	1.229	2.126.507
RS_5_700_00_0_1	2.172.231	2.009.933	162.297	22.193	1.047	1.409.881
RS_5_700_03_0_0	5.362.828	3.696.797	1.666.030	44.117	2.634	3.609.339
RS_5_700_03_0_1	3.183.863	3.124.983	58.879	39.560	1.685	1.882.380
RS_5_900_00_0_0	4.606.129	3.266.808	1.339.321	34.370	1.988	3.265.090
RS_5_900_00_0_1	3.144.448	2.940.732	203.716	30.515	1.511	2.086.465
RS_5_900_03_0_0	6.162.727	4.397.636	1.765.090	43.700	2.812	4.147.889
RS_5_900_03_0_1	3.949.724	3.821.958	127.766	37.838	2.061	2.379.901

Tabla 76. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - americano. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
RS_3_700_00_0_0	16.802.757	14.975	13.135.137	537.965	455.173
RS_3_700_00_0_1	10.477.804	10.724	7.770.755	509.784	348.145
RS_3_700_03_0_0	37.581.142	95.097	15.625.086	1.024.200	921.252
RS_3_700_03_0_1	37.650.676	96.076	15.454.835	996.003	878.704
RS_3_900_00_0_0	22.192.394	30.025	15.135.432	472.736	408.068
RS_3_900_00_0_1	14.354.785	25.380	8.353.573	451.702	311.521
RS_3_900_03_0_0	37.180.644	93.711	15.572.124	801.379	710.287
RS_3_900_03_0_1	36.908.547	93.734	15.267.746	768.896	650.752
RS_5_700_00_0_0	15.277.151	11.898	12.290.511	588.563	496.037
RS_5_700_00_0_1	10.584.590	7.760	8.537.046	562.395	388.836
RS_5_700_03_0_0	38.132.624	95.217	16.118.681	901.189	879.232
RS_5_700_03_0_1	37.388.244	94.646	15.495.560	878.383	839.848
RS_5_900_00_0_0	23.028.490	36.924	14.382.251	530.182	443.302
RS_5_900_00_0_1	15.626.502	34.555	7.510.498	505.203	350.397
RS_5_900_03_0_0	37.534.515	89.857	16.792.716	734.765	678.886
RS_5_900_03_0_1	36.503.453	88.817	15.969.090	706.192	619.618

Tabla 77. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - americano. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
RS_3_700_00_0_0	30,39	30,59	30,44	29,76	0,14
RS_3_700_00_0_1	29,70	29,94	29,77	29,68	0,16
RS_3_700_03_0_0	27,86	27,99	27,91	27,03	0,08
RS_3_700_03_0_1	27,75	27,92	27,81	26,95	0,11
RS_3_900_00_0_0	24,32	24,45	24,36	23,56	0,09
RS_3_900_00_0_1	23,55	23,68	23,61	23,51	0,07
RS_3_900_03_0_0	21,74	21,99	21,89	21,23	0,11
RS_3_900_03_0_1	21,65	21,90	21,78	21,15	0,13
RS_5_700_00_0_0	22,69	22,96	22,82	22,27	0,14
RS_5_700_00_0_1	22,14	22,41	22,25	22,18	0,16
RS_5_700_03_0_0	23,23	23,40	23,29	22,24	0,11
RS_5_700_03_0_1	23,10	23,26	23,16	22,18	0,10
RS_5_900_00_0_0	18,31	18,47	18,38	17,58	0,10
RS_5_900_00_0_1	17,51	17,75	17,62	17,51	0,14
RS_5_900_03_0_0	18,29	18,48	18,37	17,63	0,11
RS_5_900_03_0_1	18,16	18,36	18,24	17,54	0,12

Tabla 78. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - americano. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
RS_3_700_00_0_0	79.612.572	79.890.155	54.954.679	54.993.931	286.049
RS_3_700_00_0_1	82.525.400	82.787.895	80.012.507	80.026.298	257.250
RS_3_700_03_0_0	35.190.502	35.679.740	8.534.960	8.548.631	759.641
RS_3_700_03_0_1	36.562.369	37.053.059	11.465.912	11.490.859	2.407.571
RS_3_900_00_0_0	60.640.590	60.909.828	28.069.416	28.114.173	340.896
RS_3_900_00_0_1	64.601.864	64.825.940	61.364.296	61.377.470	378.907
RS_3_900_03_0_0	30.500.835	30.962.577	6.694.402	6.704.048	381.029
RS_3_900_03_0_1	32.294.037	32.740.852	9.536.392	9.557.029	2.078.807
RS_5_700_00_0_0	84.362.962	84.671.949	65.824.155	65.861.106	226.143
RS_5_700_00_0_1	85.843.064	86.129.160	84.078.771	84.104.739	241.076
RS_5_700_03_0_0	43.178.673	43.707.196	12.364.357	12.386.141	863.514
RS_5_700_03_0_1	44.655.585	45.182.352	17.706.354	17.757.902	2.381.858
RS_5_900_00_0_0	63.421.419	63.848.234	32.091.639	32.140.954	391.677
RS_5_900_00_0_1	66.123.788	66.504.838	62.900.768	62.931.283	379.021
RS_5_900_03_0_0	36.234.459	36.757.096	8.256.008	8.273.516	486.532
RS_5_900_03_0_1	38.496.925	39.002.143	14.049.510	14.095.736	2.018.303

Tabla 79. Resultados recirculación RS. Escenario cantábrico - americano. Contaminación remanente.

Modelo	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes	VFinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	2.282.066	1.969.953	312.112	1.169	31.039	318.483
RS_3_700_00_0_1	2.179.504	2.005.175	174.329	1.169	31.039	183.983
RS_3_700_03_0_0	1.311.799	1.071.051	240.747	1.138	25.378	242.185
RS_3_700_03_0_1	1.131.067	1.051.839	79.228	1.138	25.378	80.860
RS_3_900_00_0_0	2.598.708	2.317.674	281.033	1.264	31.836	296.390
RS_3_900_00_0_1	2.473.814	2.340.664	133.150	1.265	31.828	152.958
RS_3_900_03_0_0	1.823.286	1.575.014	248.271	1.234	25.853	253.861
RS_3_900_03_0_1	1.612.988	1.549.219	63.769	1.234	25.853	69.257
RS_5_700_00_0_0	2.733.638	2.419.210	314.428	1.161	27.716	318.257
RS_5_700_00_0_1	2.646.831	2.464.508	182.323	1.161	27.716	188.162
RS_5_700_03_0_0	1.539.480	1.343.769	195.711	1.140	22.943	199.948
RS_5_700_03_0_1	1.372.469	1.312.675	59.794	1.140	22.943	64.560
RS_5_900_00_0_0	3.120.424	2.824.903	295.521	1.246	28.780	297.757
RS_5_900_00_0_1	2.923.646	2.750.052	173.594	1.246	28.780	191.015
RS_5_900_03_0_0	2.138.397	1.903.723	234.673	1.228	23.636	238.778
RS_5_900_03_0_1	1.879.390	1.825.855	53.535	1.228	23.636	57.970

Tabla 80. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - europeo. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes	CODFinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	16.738.080	11.673.955	5.064.124	94.453	17.148	5.163.571
RS_3_700_00_0_1	15.291.907	12.282.810	3.009.097	102.502	19.708	3.161.763
RS_3_700_03_0_0	13.704.144	8.560.945	5.143.199	85.941	22.623	5.172.592
RS_3_700_03_0_1	9.953.381	8.267.734	1.685.646	85.941	21.671	1.719.508
RS_3_900_00_0_0	34.098.232	26.513.405	7.584.826	245.281	28.846	7.983.265
RS_3_900_00_0_1	30.497.558	26.915.104	3.582.453	248.983	29.555	4.094.858
RS_3_900_03_0_0	28.607.591	21.055.970	7.551.621	277.036	31.929	7.711.040
RS_3_900_03_0_1	22.209.299	20.370.716	1.838.583	277.036	29.435	1.994.212
RS_5_700_00_0_0	16.128.484	11.813.351	4.315.132	119.227	14.291	4.362.994
RS_5_700_00_0_1	14.782.740	12.302.244	2.480.495	119.227	14.489	2.554.308
RS_5_700_03_0_0	11.129.731	7.556.947	3.572.783	88.193	20.401	3.646.054
RS_5_700_03_0_1	8.336.255	7.274.855	1.061.400	88.193	18.431	1.144.084
RS_5_900_00_0_0	34.036.561	26.797.732	7.238.829	342.775	25.164	7.290.289
RS_5_900_00_0_1	28.679.037	24.828.462	3.850.574	277.672	24.314	4.201.195
RS_5_900_03_0_0	26.711.301	20.087.039	6.624.261	249.945	30.721	6.728.528
RS_5_900_03_0_1	20.107.441	18.731.747	1.375.694	216.197	26.904	1.488.114

Tabla 81. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - europeo. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes	NH4FinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	1.900.777	1.242.619	658.158	11.753	2.307	670.502
RS_3_700_00_0_1	1.698.957	1.313.369	385.587	12.582	2.627	404.517
RS_3_700_03_0_0	1.660.954	971.228	689.726	7.374	3.188	693.505
RS_3_700_03_0_1	1.152.560	934.747	217.812	7.114	2.848	222.132
RS_3_900_00_0_0	3.887.165	2.873.713	1.013.452	25.811	3.938	1.065.282
RS_3_900_00_0_1	3.403.689	2.929.993	473.695	28.320	3.997	540.379
RS_3_900_03_0_0	3.340.450	2.311.249	1.029.200	27.391	4.538	1.050.150
RS_3_900_03_0_1	2.466.287	2.223.248	243.039	27.391	3.927	263.466
RS_5_700_00_0_0	1.770.812	1.218.692	552.120	12.503	1.878	557.995
RS_5_700_00_0_1	1.587.140	1.275.448	311.691	12.503	1.892	320.720
RS_5_700_03_0_0	1.279.821	810.602	469.219	7.988	2.795	478.441
RS_5_700_03_0_1	915.103	780.267	134.836	7.309	2.369	145.242
RS_5_900_00_0_0	3.793.071	2.835.691	957.379	42.427	3.381	964.007
RS_5_900_00_0_1	3.099.514	2.599.805	499.709	35.063	3.234	544.317
RS_5_900_03_0_0	3.011.091	2.123.969	887.122	28.056	4.260	900.642
RS_5_900_03_0_1	2.146.587	1.967.342	179.245	24.054	3.531	193.790

Tabla 82. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - europeo. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
RS_3_700_00_0_0	9.452.406	55	9.161.288	601.107	491.726
RS_3_700_00_0_1	7.763.375	61	7.456.080	585.949	411.799
RS_3_700_03_0_0	24.747.744	50.375	13.083.656	1.046.772	1.007.660
RS_3_700_03_0_1	23.562.894	48.789	12.235.733	1.023.268	944.108
RS_3_900_00_0_0	15.231.264	1.375	14.719.512	506.172	428.585
RS_3_900_00_0_1	11.611.678	682	11.239.462	497.103	361.068
RS_3_900_03_0_0	28.580.509	64.932	13.592.092	780.687	734.607
RS_3_900_03_0_1	27.849.459	64.505	12.959.178	765.637	701.977
RS_5_700_00_0_0	7.815.038	296	7.431.266	641.315	529.743
RS_5_700_00_0_1	6.960.100	297	6.571.357	633.350	451.224
RS_5_700_03_0_0	22.269.850	36.698	13.719.959	981.337	976.013
RS_5_700_03_0_1	20.602.495	34.672	12.468.246	943.186	883.483
RS_5_900_00_0_0	14.868.255	5.918	13.292.425	555.303	462.518
RS_5_900_00_0_1	12.144.441	6.094	10.520.875	571.595	398.339
RS_5_900_03_0_0	27.339.148	58.376	13.835.095	743.696	711.118
RS_5_900_03_0_1	26.238.822	57.895	12.844.740	730.058	676.623

Tabla 83. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - europeo. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
RS_3_700_00_0_0	30,71	31,11	30,86	30,61	0,26
RS_3_700_00_0_1	30,61	30,96	30,75	30,63	0,21
RS_3_700_03_0_0	27,16	27,35	27,20	26,63	0,15
RS_3_700_03_0_1	27,01	27,20	27,05	26,62	0,14
RS_3_900_00_0_0	23,82	24,07	23,92	23,62	0,15
RS_3_900_00_0_1	23,64	23,87	23,75	23,64	0,12
RS_3_900_03_0_0	20,86	21,01	20,92	20,56	0,09
RS_3_900_03_0_1	20,83	20,97	20,89	20,55	0,08
RS_5_700_00_0_0	23,27	23,71	23,47	23,31	0,24
RS_5_700_00_0_1	23,22	23,61	23,41	23,33	0,20
RS_5_700_03_0_0	22,59	22,68	22,63	21,91	0,04
RS_5_700_03_0_1	22,31	22,41	22,36	21,89	0,05
RS_5_900_00_0_0	17,88	18,07	17,94	17,68	0,13
RS_5_900_00_0_1	17,88	18,02	17,96	17,87	0,06
RS_5_900_03_0_0	17,38	17,60	17,45	17,04	0,15
RS_5_900_03_0_1	17,33	17,54	17,40	17,03	0,13

Tabla 84. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - europeo. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
RS_3_700_00_0_0	64.005.258	64.196.425	53.264.790	53.283.113	631.430
RS_3_700_00_0_1	63.614.564	63.802.034	58.930.560	58.939.355	672.270
RS_3_700_03_0_0	37.898.770	38.172.417	16.593.537	16.613.448	2.215.677
RS_3_700_03_0_1	38.793.328	39.058.811	20.022.270	20.054.917	2.535.000
RS_3_900_00_0_0	51.166.965	51.368.007	34.539.911	34.564.451	990.789
RS_3_900_00_0_1	51.449.519	51.637.029	46.444.761	46.453.943	1.035.406
RS_3_900_03_0_0	33.056.164	33.350.327	14.260.970	14.277.521	1.954.292
RS_3_900_03_0_1	33.486.758	33.776.905	16.327.716	16.354.234	2.644.744
RS_5_700_00_0_0	66.357.967	66.529.177	60.349.473	60.365.001	461.679
RS_5_700_00_0_1	66.004.550	66.176.284	63.197.033	63.212.621	586.552
RS_5_700_03_0_0	44.662.008	44.928.725	21.673.742	21.703.828	2.202.904
RS_5_700_03_0_1	45.724.891	45.976.648	26.653.027	26.701.365	2.318.012
RS_5_900_00_0_0	51.321.807	51.526.410	38.661.854	38.686.807	921.139
RS_5_900_00_0_1	51.265.450	51.512.052	47.273.752	47.292.241	993.338
RS_5_900_03_0_0	36.655.736	36.973.934	16.416.877	16.442.572	1.988.472
RS_5_900_03_0_1	37.209.714	37.523.778	19.898.317	19.939.305	2.546.834

Tabla 85. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - europeo. Contaminación remanente.

Modelo	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes	VFinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	3.205.288	2.904.988	300.300	1.305	33.522	312.918
RS_3_700_00_0_1	3.165.333	3.013.666	151.666	1.305	33.523	172.519
RS_3_700_03_0_0	2.063.884	1.806.758	257.126	1.251	29.296	263.501
RS_3_700_03_0_1	1.837.018	1.770.408	66.609	1.251	29.296	73.405
RS_3_900_00_0_0	3.126.694	2.863.524	263.170	1.315	33.231	297.518
RS_3_900_00_0_1	2.965.854	2.858.430	107.424	1.313	33.225	146.713
RS_3_900_03_0_0	2.177.278	1.932.659	244.618	1.264	28.478	255.432
RS_3_900_03_0_1	1.971.010	1.905.415	65.594	1.264	28.478	76.288
RS_5_700_00_0_0	3.737.568	3.419.741	317.827	1.265	30.741	335.442
RS_5_700_00_0_1	3.435.629	3.266.230	169.398	1.265	30.741	281.269
RS_5_700_03_0_0	2.407.479	2.182.212	225.267	1.208	26.842	248.088
RS_5_700_03_0_1	2.063.893	2.027.055	36.837	1.208	26.842	56.882
RS_5_900_00_0_0	3.473.807	3.165.257	308.549	1.298	30.387	483.697
RS_5_900_00_0_1	3.114.260	2.966.138	148.122	1.298	30.387	447.741
RS_5_900_03_0_0	2.583.187	2.353.217	229.970	1.251	26.033	238.141
RS_5_900_03_0_1	2.265.504	2.211.039	54.464	1.251	26.033	62.849

Tabla 86. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - americano. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes	CODFinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	39.231.526	31.071.147	8.160.379	309.885	29.428	8.521.697
RS_3_700_00_0_1	38.170.141	33.391.871	4.778.269	361.586	33.875	5.402.280
RS_3_700_03_0_0	39.314.300	29.429.742	9.884.557	269.874	39.972	10.127.961
RS_3_700_03_0_1	30.887.661	28.326.168	2.561.492	269.874	38.740	2.819.486
RS_3_900_00_0_0	67.828.698	55.166.758	12.661.940	622.793	49.215	14.279.977
RS_3_900_00_0_1	58.578.455	53.183.718	5.394.737	601.460	54.273	7.231.630
RS_3_900_03_0_0	58.653.342	45.363.946	13.289.395	497.391	56.058	13.847.771
RS_3_900_03_0_1	47.567.135	44.095.643	3.471.492	497.391	53.954	4.017.125
RS_5_700_00_0_0	36.871.373	29.407.717	7.463.655	437.819	25.375	7.864.460
RS_5_700_00_0_1	29.124.936	25.562.854	3.562.081	315.152	21.943	5.661.665
RS_5_700_03_0_0	35.559.907	27.763.315	7.796.592	336.807	36.469	8.613.137
RS_5_700_03_0_1	26.056.792	24.762.664	1.294.127	254.537	35.849	2.005.508
RS_5_900_00_0_0	54.201.107	44.159.595	10.041.511	547.885	33.209	14.781.791
RS_5_900_00_0_1	42.220.498	38.037.812	4.182.686	390.275	29.970	10.864.456
RS_5_900_03_0_0	56.009.475	44.335.743	11.673.732	549.086	53.710	12.054.977
RS_5_900_03_0_1	42.831.395	40.186.574	2.644.820	454.852	49.703	3.032.051

Tabla 87. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - americano. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes	NH4FinalBalsa
RS_3_700_00_0_0	4.323.919	3.279.879	1.044.039	38.093	3.715	1.088.455
RS_3_700_00_0_1	4.144.137	3.540.868	603.268	42.526	4.416	680.234
RS_3_700_03_0_0	4.646.846	3.356.713	1.290.132	28.246	5.354	1.320.932
RS_3_700_03_0_1	3.543.567	3.218.560	325.006	27.049	4.944	357.584
RS_3_900_00_0_0	7.581.542	5.930.840	1.650.701	72.309	6.487	1.855.959
RS_3_900_00_0_1	6.397.725	5.700.749	696.976	73.380	7.132	930.354
RS_3_900_03_0_0	6.706.625	4.961.470	1.745.154	49.755	7.513	1.816.913
RS_3_900_03_0_1	5.249.593	4.801.799	447.793	49.755	6.980	517.835
RS_5_700_00_0_0	3.918.205	2.978.866	939.338	51.997	3.176	987.334
RS_5_700_00_0_1	2.957.566	2.524.560	433.006	36.892	2.789	678.299
RS_5_700_03_0_0	4.070.146	3.059.391	1.010.754	39.235	4.850	1.113.269
RS_5_700_03_0_1	2.883.200	2.720.682	162.517	31.867	4.490	251.654
RS_5_900_00_0_0	5.695.646	4.416.125	1.279.520	66.281	4.320	1.848.204
RS_5_900_00_0_1	4.215.530	3.697.041	518.489	46.631	3.839	1.293.215
RS_5_900_03_0_0	6.188.469	4.668.452	1.520.016	64.787	7.130	1.568.592
RS_5_900_03_0_1	4.533.156	4.195.051	338.104	54.646	6.379	387.306

Tabla 88. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - americano. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
RS_3_700_00_0_0	10.741.670	2.880	9.846.467	513.000	416.902
RS_3_700_00_0_1	10.064.410	7.525	8.094.902	502.434	349.632
RS_3_700_03_0_0	41.276.420	107.021	16.572.997	957.687	903.030
RS_3_700_03_0_1	40.979.185	106.548	16.374.803	946.587	880.117
RS_3_900_00_0_0	19.216.617	26.996	12.870.575	435.760	371.115
RS_3_900_00_0_1	14.448.687	25.015	8.535.396	429.098	312.490
RS_3_900_03_0_0	40.460.484	102.592	16.811.945	729.452	687.436
RS_3_900_03_0_1	39.798.050	101.524	16.363.991	716.398	650.954
RS_5_700_00_0_0	10.141.851	8.240	7.978.422	569.679	456.444
RS_5_700_00_0_1	9.718.378	5.503	8.191.975	560.376	390.474
RS_5_700_03_0_0	39.042.444	99.762	15.978.182	887.035	864.581
RS_5_700_03_0_1	38.815.177	99.506	15.805.723	877.323	840.653
RS_5_900_00_0_0	19.118.052	35.247	10.860.215	510.085	406.858
RS_5_900_00_0_1	15.551.305	33.823	7.606.894	498.988	351.294
RS_5_900_03_0_0	38.874.692	93.948	17.194.774	686.398	659.034
RS_5_900_03_0_1	37.903.076	92.968	16.413.864	673.966	619.647

Tabla 89. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - americano. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
RS_3_700_00_0_0	29,47	29,89	29,64	29,40	0,25
RS_3_700_00_0_1	29,49	29,77	29,62	29,51	0,16
RS_3_700_03_0_0	27,59	27,86	27,68	26,72	0,18
RS_3_700_03_0_1	27,56	27,78	27,64	26,70	0,14
RS_3_900_00_0_0	23,82	24,06	23,95	23,37	0,10
RS_3_900_00_0_1	23,39	23,64	23,53	23,40	0,11
RS_3_900_03_0_0	21,55	21,78	21,63	20,88	0,15
RS_3_900_03_0_1	21,51	21,73	21,59	20,88	0,14
RS_5_700_00_0_0	21,97	22,33	22,20	22,09	0,13
RS_5_700_00_0_1	21,91	22,21	22,11	22,03	0,10
RS_5_700_03_0_0	23,03	23,21	23,11	22,06	0,10
RS_5_700_03_0_1	22,98	23,16	23,06	22,05	0,10
RS_5_900_00_0_0	17,77	17,98	17,88	17,46	0,10
RS_5_900_00_0_1	17,41	17,61	17,52	17,39	0,09
RS_5_900_03_0_0	18,08	18,33	18,15	17,33	0,18
RS_5_900_03_0_1	18,01	18,24	18,08	17,32	0,16

Tabla 90. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - americano. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
RS_3_700_00_0_0	91.142.497	91.443.995	83.901.418	83.914.159	570.284
RS_3_700_00_0_1	88.929.706	89.223.654	85.810.398	85.826.427	904.821
RS_3_700_03_0_0	40.846.126	41.389.457	12.014.204	12.028.808	3.173.838
RS_3_700_03_0_1	41.058.393	41.601.871	13.509.678	13.545.313	4.076.966
RS_3_900_00_0_0	71.551.151	71.848.341	48.141.189	48.179.630	1.179.810
RS_3_900_00_0_1	71.210.583	71.483.066	66.932.502	66.949.813	1.380.852
RS_3_900_03_0_0	36.450.572	36.979.999	8.494.793	8.512.321	2.813.990
RS_3_900_03_0_1	37.111.575	37.634.999	11.332.354	11.367.251	3.995.218
RS_5_700_00_0_0	91.441.493	91.763.263	88.692.681	88.701.886	486.718
RS_5_700_00_0_1	92.652.214	92.969.517	90.498.802	90.529.448	726.457
RS_5_700_03_0_0	48.221.089	48.780.478	18.979.717	18.999.861	3.102.591
RS_5_700_03_0_1	48.705.633	49.266.860	20.712.642	20.774.136	3.896.239
RS_5_900_00_0_0	70.545.875	70.980.161	54.199.987	54.238.289	952.896
RS_5_900_00_0_1	72.380.428	72.806.507	68.312.535	68.351.719	963.676
RS_5_900_03_0_0	41.954.824	42.520.095	11.912.136	11.944.640	2.916.782
RS_5_900_03_0_1	43.042.330	43.604.640	16.591.792	16.654.090	3.910.589

Tabla 91. Resultados recirculación RS. Escenario mediterráneo - americano. Contaminación remanente.

Modelo	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes	VFinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	19.103.664	6.743.232	12.360.432	2.104	46.799	3.544.401
RP_3_700_00_0_1	18.470.904	6.656.623	11.814.280	2.104	45.912	2.841.702
RP_3_700_00_1_0	16.696.962	4.483.153	12.213.808	1.677	41.311	1.225.484
RP_3_700_00_1_1	16.145.060	4.397.674	11.747.385	1.677	40.870	520.908
RP_3_700_03_0_0	9.135.375	3.584.234	5.551.140	1.973	31.798	2.416.359
RP_3_700_03_0_1	9.245.393	3.671.918	5.573.474	1.978	31.799	1.692.271
RP_3_700_03_1_0	7.155.982	2.225.508	4.930.474	1.590	20.096	572.926
RP_3_700_03_1_1	4.740.940	2.115.279	2.625.661	1.590	20.096	0
RP_3_900_00_0_0	6.887.735	3.652.142	3.235.593	2.248	34.300	3.736.184
RP_3_900_00_0_1	6.189.885	3.581.683	2.608.202	2.248	34.300	3.035.773
RP_3_900_00_1_0	4.483.636	1.279.463	3.204.172	1.914	24.605	1.336.300
RP_3_900_00_1_1	3.785.132	1.211.099	2.574.032	1.914	24.605	635.263
RP_3_900_03_0_0	3.353.516	2.404.468	949.047	2.156	32.806	2.943.769
RP_3_900_03_0_1	2.641.773	2.353.072	288.700	2.156	32.806	2.228.801
RP_3_900_03_1_0	1.511.130	596.435	914.695	1.835	23.519	1.091.455
RP_3_900_03_1_1	798.894	544.939	253.955	1.835	23.519	374.490
RP_5_700_00_0_0	28.542.064	9.828.633	18.713.430	2.527	72.538	3.953.657
RP_5_700_00_0_1	27.932.135	9.809.604	18.122.530	2.505	72.055	3.325.064
RP_5_700_00_1_0	25.831.860	7.204.395	18.627.464	2.310	64.254	1.257.215
RP_5_700_00_1_1	25.220.041	7.186.547	18.033.494	2.287	63.826	626.599
RP_5_700_03_0_0	13.094.853	5.775.665	7.319.187	2.061	42.674	2.539.373
RP_5_700_03_0_1	12.567.111	5.764.573	6.802.537	2.061	42.399	1.842.738
RP_5_700_03_1_0	11.210.514	4.083.215	7.127.299	1.867	32.911	737.376
RP_5_700_03_1_1	10.688.755	4.054.579	6.634.176	1.867	32.755	76.044
RP_5_900_00_0_0	9.153.241	4.530.769	4.622.472	2.237	33.466	4.003.682
RP_5_900_00_0_1	8.501.785	4.500.698	4.001.087	2.237	33.466	3.345.513
RP_5_900_00_1_0	6.596.209	2.044.238	4.551.971	2.048	28.708	1.448.159
RP_5_900_00_1_1	5.943.723	2.014.559	3.929.164	2.048	28.708	788.710
RP_5_900_03_0_0	3.953.921	2.774.970	1.178.950	2.181	32.770	3.040.465
RP_5_900_03_0_1	3.251.422	2.732.349	519.073	2.181	32.770	2.332.520
RP_5_900_03_1_0	2.176.940	1.015.371	1.161.569	2.010	28.462	1.252.733
RP_5_900_03_1_1	1.467.435	970.924	496.511	2.010	28.462	542.604

Tabla 92. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - europeo. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes	CODFinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	63.886.181	20.334.320	43.551.861	174.315	4.747	12.837.822
RP_3_700_00_0_1	54.726.573	20.001.629	34.724.943	169.983	4.719	7.928.349
RP_3_700_00_1_0	94.148.162	11.930.711	82.217.450	276.064	8.234	9.980.342
RP_3_700_00_1_1	68.932.805	11.374.123	57.558.681	175.017	5.489	2.844.679
RP_3_700_03_0_0	59.667.304	19.780.928	39.886.375	153.029	7.927	16.689.795
RP_3_700_03_0_1	58.759.223	19.958.079	38.801.143	148.328	7.608	11.546.369
RP_3_700_03_1_0	101.325.121	16.157.269	85.167.852	300.657	19.016	9.127.858
RP_3_700_03_1_1	63.226.574	14.986.054	48.240.519	196.353	19.640	0
RP_3_900_00_0_0	34.423.145	17.392.829	17.030.316	140.697	6.344	19.114.321
RP_3_900_00_0_1	27.122.426	16.888.938	10.233.487	139.534	6.215	12.895.964
RP_3_900_00_1_0	41.339.728	6.241.464	35.098.264	107.418	11.853	14.775.471
RP_3_900_00_1_1	24.164.807	5.368.238	18.796.568	75.774	9.790	4.641.238
RP_3_900_03_0_0	25.543.805	16.480.148	9.063.656	169.552	10.411	22.843.649
RP_3_900_03_0_1	17.982.155	15.937.109	2.045.045	169.552	9.235	15.369.817
RP_3_900_03_1_0	22.933.269	3.311.397	19.621.872	73.424	28.141	18.940.021
RP_3_900_03_1_1	5.081.565	2.140.210	2.941.355	26.516	19.535	2.985.437
RP_5_700_00_0_0	77.048.082	24.034.705	53.013.377	220.905	3.310	11.426.068
RP_5_700_00_0_1	67.375.884	23.937.145	43.438.739	218.187	3.269	7.374.993
RP_5_700_00_1_0	95.561.425	12.714.253	82.847.171	309.270	6.085	7.533.234
RP_5_700_00_1_1	54.597.083	12.554.575	42.042.507	132.854	2.503	1.563.992
RP_5_700_03_0_0	70.310.612	23.642.018	46.668.593	210.951	7.159	15.744.117
RP_5_700_03_0_1	63.861.026	23.454.569	40.406.456	208.752	6.971	10.638.130
RP_5_700_03_1_0	108.983.362	15.165.223	93.818.138	296.431	13.779	9.776.870
RP_5_700_03_1_1	105.579.186	15.048.908	90.530.277	290.561	14.690	1.116.264
RP_5_900_00_0_0	39.740.020	18.808.460	20.931.559	140.709	5.051	17.932.494
RP_5_900_00_0_1	32.785.163	18.604.227	14.180.935	140.499	5.048	12.375.055
RP_5_900_00_1_0	43.405.729	6.030.798	37.374.931	119.794	9.438	13.072.539
RP_5_900_00_1_1	22.313.183	5.674.795	16.638.388	63.635	4.545	3.367.006
RP_5_900_03_0_0	26.485.864	15.736.915	10.748.948	150.641	9.796	21.553.860
RP_5_900_03_0_1	18.316.932	15.288.844	3.028.088	150.418	8.994	13.677.898
RP_5_900_03_1_0	23.289.816	2.329.957	20.959.859	74.072	21.522	17.598.401
RP_5_900_03_1_1	4.184.421	1.849.509	2.334.912	16.082	7.968	1.966.396

Tabla 93. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - europeo. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes	NH4FinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	6.976.398	1.642.067	5.334.330	17.066	517	1.642.632
RP_3_700_00_0_1	5.751.863	1.603.746	4.148.116	16.518	511	1.000.073
RP_3_700_00_1_0	11.683.993	924.127	10.759.865	37.259	1.111	1.344.285
RP_3_700_00_1_1	8.410.652	858.557	7.552.094	23.834	747	387.062
RP_3_700_03_0_0	7.685.022	2.106.042	5.578.980	17.648	1.075	2.350.286
RP_3_700_03_0_1	7.534.570	2.125.890	5.408.680	17.866	1.015	1.636.075
RP_3_700_03_1_0	13.625.219	1.823.783	11.801.435	42.625	2.572	1.313.284
RP_3_700_03_1_1	8.412.648	1.674.807	6.737.840	24.899	2.870	0
RP_3_900_00_0_0	3.663.690	1.456.410	2.207.280	13.314	759	2.186.134
RP_3_900_00_0_1	2.671.361	1.399.879	1.271.482	12.606	742	1.367.164
RP_3_900_00_1_0	5.199.884	575.500	4.624.383	14.371	1.589	1.972.885
RP_3_900_00_1_1	2.933.088	477.867	2.455.220	8.880	1.148	620.270
RP_3_900_03_0_0	2.942.512	1.640.784	1.301.728	15.257	1.533	2.670.767
RP_3_900_03_0_1	1.851.221	1.574.133	277.087	15.235	1.141	1.600.116
RP_3_900_03_1_0	3.025.190	357.536	2.667.654	9.543	3.649	2.533.051
RP_3_900_03_1_1	605.552	214.848	390.704	3.354	2.483	371.531
RP_5_700_00_0_0	7.975.796	1.838.883	6.136.913	20.359	375	1.423.406
RP_5_700_00_0_1	6.696.320	1.828.040	4.868.279	20.045	315	899.270
RP_5_700_00_1_0	11.332.279	730.140	10.602.139	41.355	813	1.005.689
RP_5_700_00_1_1	6.015.526	711.766	5.303.759	16.575	340	212.427
RP_5_700_03_0_0	8.738.937	2.357.535	6.381.402	22.587	887	2.206.035
RP_5_700_03_0_1	7.851.558	2.333.988	5.517.570	22.709	861	1.498.343
RP_5_700_03_1_0	14.133.678	1.410.500	12.723.178	41.340	1.922	1.391.292
RP_5_700_03_1_1	13.841.347	1.394.799	12.446.548	42.416	2.144	162.857
RP_5_900_00_0_0	4.114.452	1.536.035	2.578.417	13.511	599	2.047.217
RP_5_900_00_0_1	3.172.343	1.513.394	1.658.949	13.060	523	1.320.172
RP_5_900_00_1_0	5.243.496	440.262	4.803.233	15.917	1.258	1.726.510
RP_5_900_00_1_1	2.483.844	401.795	2.082.049	6.440	579	443.581
RP_5_900_03_0_0	3.011.815	1.522.835	1.488.980	14.134	1.377	2.523.463
RP_5_900_03_0_1	1.871.144	1.469.519	401.624	14.012	1.107	1.434.076
RP_5_900_03_1_0	2.971.568	174.761	2.796.807	9.713	2.830	2.312.646
RP_5_900_03_1_1	424.824	119.885	304.939	1.811	970	229.264

Tabla 94. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - europeo. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
RP_3_700_00_0_0	13.653.981	397	13.251.783	638.246	567.144
RP_3_700_00_0_1	8.410.241	255	8.052.328	600.923	440.350
RP_3_700_00_1_0	12.019.753	18	11.740.181	593.546	570.030
RP_3_700_00_1_1	4.935.391	0	4.666.273	553.561	445.113
RP_3_700_03_0_0	27.939.545	62.202	13.592.663	1.327.886	1.292.802
RP_3_700_03_0_1	26.630.834	57.388	13.364.426	1.227.500	1.217.945
RP_3_700_03_1_0	24.964.358	42.314	15.191.711	1.313.783	1.294.136
RP_3_700_03_1_1	22.518.930	32.123	15.014.402	1.076.963	1.071.469
RP_3_900_00_0_0	17.367.759	5.824	15.861.009	525.828	484.332
RP_3_900_00_0_1	11.562.054	2.389	10.796.021	502.358	376.460
RP_3_900_00_1_0	16.300.320	1.481	15.770.246	505.132	486.653
RP_3_900_00_1_1	8.690.998	0	8.504.158	468.500	379.407
RP_3_900_03_0_0	28.087.081	63.877	13.359.469	803.382	773.381
RP_3_900_03_0_1	27.133.292	63.193	12.543.332	773.161	712.149
RP_3_900_03_1_0	29.705.463	66.963	14.257.473	782.205	774.601
RP_3_900_03_1_1	27.972.795	64.377	13.118.359	741.044	715.196
RP_5_700_00_0_0	12.135.572	814	11.620.707	685.614	605.428
RP_5_700_00_0_1	7.792.724	720	7.297.164	656.142	479.785
RP_5_700_00_1_0	9.616.966	0	9.317.530	627.445	609.566
RP_5_700_00_1_1	3.040.082	0	2.742.665	590.860	485.948
RP_5_700_03_0_0	25.654.647	51.118	13.827.781	1.215.943	1.205.848
RP_5_700_03_0_1	23.822.803	43.579	13.682.560	1.119.365	1.109.457
RP_5_700_03_1_0	23.441.791	33.067	15.766.869	1.219.795	1.210.954
RP_5_700_03_1_1	20.954.701	23.290	15.429.232	1.085.782	1.079.480
RP_5_900_00_0_0	17.698.094	6.045	16.099.750	589.167	518.252
RP_5_900_00_0_1	12.025.091	3.180	11.072.761	563.012	414.753
RP_5_900_00_1_0	16.147.333	527	15.841.127	532.613	520.767
RP_5_900_00_1_1	7.956.031	0	7.760.037	502.065	418.549
RP_5_900_03_0_0	27.677.109	58.404	14.172.072	762.920	744.593
RP_5_900_03_0_1	26.203.060	57.570	12.883.718	733.753	687.132
RP_5_900_03_1_0	28.011.664	58.669	14.452.515	753.774	745.687
RP_5_900_03_1_1	25.082.405	54.349	12.513.096	716.875	690.246

Tabla 95. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - europeo. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
RP_3_700_00_0_0	30,97	32,80	31,16	30,69	1,64
RP_3_700_00_0_1	30,63	32,79	30,84	30,69	1,95
RP_3_700_00_1_0	30,77	32,82	30,92	30,22	1,90
RP_3_700_00_1_1	30,20	32,82	30,42	30,19	2,39
RP_3_700_03_0_0	20,35	28,08	25,12	23,77	2,96
RP_3_700_03_0_1	20,85	27,88	25,22	23,82	2,66
RP_3_700_03_1_0	21,90	28,24	26,61	25,11	1,63
RP_3_700_03_1_1	24,04	29,37	27,33	25,19	2,04
RP_3_900_00_0_0	23,91	24,66	24,04	23,62	0,62
RP_3_900_00_0_1	23,60	24,66	23,74	23,62	0,91
RP_3_900_00_1_0	23,74	24,67	23,84	23,18	0,83
RP_3_900_00_1_1	23,30	24,66	23,41	23,17	1,25
RP_3_900_03_0_0	13,67	22,34	20,90	20,53	1,44
RP_3_900_03_0_1	14,93	22,41	20,87	20,52	1,55
RP_3_900_03_1_0	13,56	22,63	20,86	20,38	1,77
RP_3_900_03_1_1	14,55	22,45	20,77	20,36	1,68
RP_5_700_00_0_0	23,66	25,94	23,91	23,48	2,04
RP_5_700_00_0_1	23,34	25,93	23,60	23,48	2,34
RP_5_700_00_1_0	23,27	25,94	23,48	22,82	2,46
RP_5_700_00_1_1	22,60	25,93	22,90	22,77	3,04
RP_5_700_03_0_0	23,08	24,43	23,54	22,38	0,89
RP_5_700_03_0_1	22,61	24,43	23,26	22,31	1,18
RP_5_700_03_1_0	23,15	24,42	23,67	22,11	0,75
RP_5_700_03_1_1	22,59	24,44	23,44	22,00	1,00
RP_5_900_00_0_0	18,09	19,11	18,21	17,79	0,89
RP_5_900_00_0_1	17,74	19,10	17,89	17,78	1,20
RP_5_900_00_1_0	17,81	19,11	17,94	17,19	1,17
RP_5_900_00_1_1	17,15	19,10	17,32	17,14	1,77
RP_5_900_03_0_0	16,73	18,88	17,52	17,11	1,35
RP_5_900_03_0_1	16,83	18,98	17,46	17,09	1,52
RP_5_900_03_1_0	16,24	18,80	17,48	16,89	1,32
RP_5_900_03_1_1	17,18	18,60	17,31	16,88	1,29

Tabla 96. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - europeo. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
RP_3_700_00_0_0	59.092.992	59.267.354	37.923.248	37.952.726	279.070
RP_3_700_00_0_1	60.358.135	60.518.023	55.761.722	55.768.017	210.223
RP_3_700_00_1_0	74.541.462	74.701.742	42.345.202	42.385.067	395.346
RP_3_700_00_1_1	76.305.851	76.440.680	68.487.517	68.491.013	323.777
RP_3_700_03_0_0	32.741.273	32.988.454	12.445.040	12.461.479	800.354
RP_3_700_03_0_1	34.137.397	34.365.293	15.911.095	15.928.926	1.354.653
RP_3_700_03_1_0	43.986.510	44.293.611	13.557.887	13.578.603	1.776.340
RP_3_700_03_1_1	46.108.304	46.379.293	20.368.171	20.389.480	2.762.066
RP_3_900_00_0_0	47.344.560	47.530.239	25.132.401	25.161.108	270.223
RP_3_900_00_0_1	49.247.990	49.403.455	44.335.523	44.344.332	300.505
RP_3_900_00_1_0	63.697.321	63.962.342	27.275.152	27.310.693	381.988
RP_3_900_00_1_1	66.488.964	66.707.149	55.416.956	55.426.597	603.236
RP_3_900_03_0_0	31.149.785	31.427.724	13.041.599	13.055.296	408.899
RP_3_900_03_0_1	31.864.397	32.127.305	15.581.122	15.597.788	1.346.655
RP_3_900_03_1_0	38.371.663	38.725.713	13.774.147	13.792.205	502.254
RP_3_900_03_1_1	39.718.676	40.041.672	20.358.911	20.382.919	2.374.602
RP_5_700_00_0_0	62.176.183	62.347.751	44.784.366	44.816.119	218.310
RP_5_700_00_0_1	62.642.493	62.801.457	59.703.723	59.713.511	152.017
RP_5_700_00_1_0	79.911.978	80.021.084	52.280.704	52.325.882	336.887
RP_5_700_00_1_1	80.631.854	80.719.249	76.899.061	76.903.383	168.959
RP_5_700_03_0_0	39.239.096	39.490.159	14.865.524	14.884.459	807.367
RP_5_700_03_0_1	41.350.899	41.565.875	20.189.920	20.211.500	1.279.155
RP_5_700_03_1_0	54.407.329	54.718.524	16.861.193	16.887.376	1.525.764
RP_5_700_03_1_1	56.541.760	56.809.336	24.661.597	24.687.466	2.407.784
RP_5_900_00_0_0	49.580.472	49.817.625	27.637.828	27.672.359	293.855
RP_5_900_00_0_1	50.623.763	50.836.710	46.397.458	46.412.593	258.746
RP_5_900_00_1_0	69.609.718	69.846.535	31.437.033	31.483.596	448.759
RP_5_900_00_1_1	71.163.372	71.364.125	62.639.908	62.653.893	492.660
RP_5_900_03_0_0	34.825.046	35.136.294	14.530.126	14.547.432	459.089
RP_5_900_03_0_1	35.687.421	35.981.217	18.940.972	18.964.133	1.350.589
RP_5_900_03_1_0	46.033.346	46.418.765	15.892.744	15.920.634	603.490
RP_5_900_03_1_1	47.699.801	48.039.726	28.085.652	28.109.277	2.190.493

Tabla 97. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - europeo. Contaminación remanente.

Modelo	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes	VFinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	33.609.760	9.164.637	24.445.123	3.111	86.720	4.006.373
RP_3_700_00_0_1	32.907.456	9.078.390	23.829.065	3.075	85.492	3.282.954
RP_3_700_00_1_0	31.275.671	6.865.513	24.410.158	2.973	81.794	1.685.113
RP_3_700_00_1_1	30.572.476	6.779.355	23.793.120	2.932	80.819	960.699
RP_3_700_03_0_0	12.577.304	5.930.208	6.647.096	2.137	43.870	3.072.055
RP_3_700_03_0_1	11.725.598	5.857.650	5.867.948	2.137	43.122	2.302.857
RP_3_700_03_1_0	10.611.681	4.155.315	6.456.366	1.747	32.221	1.234.763
RP_3_700_03_1_1	9.861.931	4.086.635	5.775.295	1.747	31.461	465.084
RP_3_900_00_0_0	9.327.231	4.117.548	5.209.682	2.307	35.445	3.977.159
RP_3_900_00_0_1	8.611.562	4.045.183	4.566.379	2.307	35.445	3.261.826
RP_3_900_00_1_0	6.914.426	1.722.746	5.191.680	2.006	25.816	1.568.291
RP_3_900_00_1_1	6.199.185	1.650.588	4.548.597	2.006	25.816	853.074
RP_3_900_03_0_0	3.974.653	2.772.129	1.202.524	2.238	33.626	3.177.323
RP_3_900_03_0_1	3.257.532	2.722.409	535.122	2.238	33.626	2.447.796
RP_3_900_03_1_0	2.078.442	907.446	1.170.996	1.949	25.048	1.307.336
RP_3_900_03_1_1	1.436.323	872.089	564.233	1.949	25.048	578.607
RP_5_700_00_0_0	44.699.100	12.810.435	31.888.664	4.221	117.096	4.399.623
RP_5_700_00_0_1	44.067.520	12.790.002	31.277.518	4.190	116.200	3.748.970
RP_5_700_00_1_0	42.027.821	10.183.662	31.844.159	4.014	110.353	1.729.598
RP_5_700_00_1_1	41.395.289	10.163.393	31.231.896	3.993	109.622	1.077.615
RP_5_700_03_0_0	30.608.142	8.355.850	22.252.291	2.346	71.119	3.169.430
RP_5_700_03_0_1	29.856.054	8.295.638	21.560.415	2.307	69.991	2.407.964
RP_5_700_03_1_0	28.823.333	6.601.764	22.221.569	2.141	66.152	1.386.192
RP_5_700_03_1_1	28.072.950	6.542.153	21.530.796	2.065	63.900	624.677
RP_5_900_00_0_0	12.288.000	5.096.075	7.191.924	2.275	34.211	4.233.858
RP_5_900_00_0_1	11.628.100	5.065.645	6.562.455	2.275	34.211	3.562.215
RP_5_900_00_1_0	9.745.748	2.614.266	7.131.482	2.088	29.700	1.694.496
RP_5_900_00_1_1	9.085.371	2.583.910	6.501.461	2.088	29.700	1.022.147
RP_5_900_03_0_0	4.419.101	3.142.254	1.276.847	2.256	33.282	3.292.578
RP_5_900_03_0_1	3.697.083	3.086.495	610.588	2.256	33.282	2.572.383
RP_5_900_03_1_0	2.682.613	1.423.325	1.259.288	2.091	29.172	1.503.396
RP_5_900_03_1_1	1.961.856	1.367.834	594.022	2.091	29.172	784.975

Tabla 98. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - americano. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes	CODFinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	161.586.875	41.560.024	120.026.851	483.007	6.863	19.611.200
RP_3_700_00_0_1	141.465.822	41.175.728	100.290.093	474.377	6.867	12.222.438
RP_3_700_00_1_0	220.552.844	31.806.970	188.745.873	600.422	9.005	15.022.783
RP_3_700_00_1_1	166.069.343	31.205.256	134.864.086	507.110	8.122	5.275.198
RP_3_700_03_0_0	113.857.212	47.848.491	66.008.721	410.796	11.561	29.669.913
RP_3_700_03_0_1	100.022.952	46.603.155	53.419.796	397.955	11.161	20.311.205
RP_3_700_03_1_0	185.885.855	48.843.436	137.042.419	529.717	22.773	25.042.246
RP_3_700_03_1_1	162.746.220	45.480.093	117.266.126	486.983	21.129	9.510.978
RP_3_900_00_0_0	71.354.613	30.386.340	40.968.272	240.784	10.210	30.990.024
RP_3_900_00_0_1	56.862.763	29.596.727	27.266.035	237.392	10.057	20.177.659
RP_3_900_00_1_0	88.834.773	13.232.396	75.602.376	231.766	16.885	23.903.898
RP_3_900_00_1_1	52.714.121	11.838.617	40.875.504	189.013	15.338	7.377.391
RP_3_900_03_0_0	47.178.133	30.013.985	17.164.148	304.147	16.271	38.550.466
RP_3_900_03_0_1	35.419.169	29.145.854	6.273.315	304.147	14.864	27.008.982
RP_3_900_03_1_0	46.326.190	12.770.495	33.555.695	139.265	38.701	32.261.140
RP_3_900_03_1_1	23.162.446	10.849.693	12.312.752	117.482	32.908	10.757.473
RP_5_700_00_0_0	178.676.661	48.680.032	129.996.629	541.718	5.027	17.365.312
RP_5_700_00_0_1	161.042.470	48.532.030	112.510.439	535.548	4.987	11.779.266
RP_5_700_00_1_0	200.904.156	32.826.959	168.077.196	558.330	6.451	11.026.192
RP_5_700_00_1_1	133.553.518	32.534.527	101.018.990	432.010	4.284	3.168.190
RP_5_700_03_0_0	242.269.358	55.773.465	186.495.892	589.006	10.176	27.593.065
RP_5_700_03_0_1	213.586.659	54.807.969	158.778.690	567.679	9.648	17.568.508
RP_5_700_03_1_0	410.663.449	48.164.997	362.498.452	1.106.619	17.428	23.886.861
RP_5_700_03_1_1	328.750.528	46.321.820	282.428.707	819.712	14.373	8.534.340
RP_5_900_00_0_0	83.509.550	33.563.492	49.946.057	268.630	8.053	29.366.041
RP_5_900_00_0_1	69.675.309	33.228.332	36.446.976	261.945	8.034	19.777.420
RP_5_900_00_1_0	91.577.514	13.036.698	78.540.815	253.100	12.838	21.108.349
RP_5_900_00_1_1	47.394.832	12.430.827	34.964.005	156.515	7.644	5.138.335
RP_5_900_03_0_0	47.530.370	29.006.442	18.523.928	297.803	16.252	37.532.107
RP_5_900_03_0_1	33.976.048	28.111.501	5.864.547	296.039	14.401	24.612.565
RP_5_900_03_1_0	43.807.636	10.404.407	33.403.229	133.129	31.145	31.323.258
RP_5_900_03_1_1	16.505.717	8.994.118	7.511.598	109.120	20.612	8.297.980

Tabla 99. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - americano. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes	NH4FinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	15.983.213	2.902.716	13.080.496	42.345	666	2.380.141
RP_3_700_00_0_1	13.359.218	2.855.604	10.503.613	41.404	660	1.456.377
RP_3_700_00_1_0	25.371.104	2.139.778	23.231.326	78.991	1.184	1.972.501
RP_3_700_00_1_1	18.426.979	2.059.751	16.367.228	47.163	792	698.608
RP_3_700_03_0_0	13.686.282	5.006.190	8.680.092	45.036	1.447	3.899.947
RP_3_700_03_0_1	11.871.578	4.852.159	7.019.418	43.447	1.392	2.671.648
RP_3_700_03_1_0	23.703.634	5.603.565	18.100.068	66.904	2.881	3.364.020
RP_3_700_03_1_1	20.717.353	5.175.011	15.542.341	61.370	2.771	1.284.731
RP_3_900_00_0_0	7.168.746	2.336.221	4.832.525	23.521	1.122	3.431.385
RP_3_900_00_0_1	5.281.890	2.251.893	3.029.997	22.433	1.098	2.079.461
RP_3_900_00_1_0	10.578.290	1.067.431	9.510.858	30.042	2.056	3.094.154
RP_3_900_00_1_1	5.949.587	919.341	5.030.246	19.544	1.659	959.022
RP_3_900_03_0_0	5.143.300	2.874.258	2.269.041	26.148	2.114	4.292.716
RP_3_900_03_0_1	3.592.493	2.771.238	821.254	26.148	1.954	2.792.706
RP_3_900_03_1_0	5.716.733	1.372.247	4.344.485	16.960	4.756	4.068.818
RP_3_900_03_1_1	2.731.937	1.138.555	1.593.382	13.299	4.004	1.328.186
RP_5_700_00_0_0	16.592.807	3.261.411	13.331.396	44.558	469	2.020.099
RP_5_700_00_0_1	14.299.704	3.245.125	11.054.578	43.904	419	1.332.204
RP_5_700_00_1_0	21.520.281	1.659.310	19.860.971	72.711	840	1.432.934
RP_5_700_00_1_1	12.979.907	1.626.453	11.353.453	32.651	386	415.858
RP_5_700_03_0_0	29.619.472	5.344.388	24.275.083	73.889	1.185	3.690.169
RP_5_700_03_0_1	25.827.565	5.225.729	20.601.836	63.163	1.115	2.348.432
RP_5_700_03_1_0	52.637.372	4.748.411	47.888.961	147.648	2.333	3.207.394
RP_5_700_03_1_1	41.862.838	4.516.885	37.345.952	110.590	1.844	1.150.810
RP_5_900_00_0_0	8.116.260	2.513.181	5.603.078	24.942	838	3.222.410
RP_5_900_00_0_1	6.309.160	2.477.103	3.832.057	24.157	754	2.026.572
RP_5_900_00_1_0	10.373.914	816.094	9.557.819	32.739	1.667	2.702.369
RP_5_900_00_1_1	4.736.315	753.875	3.982.439	13.100	657	651.718
RP_5_900_03_0_0	5.077.039	2.667.457	2.409.582	27.727	2.133	4.138.433
RP_5_900_03_0_1	3.319.663	2.566.051	753.611	27.578	1.696	2.478.298
RP_5_900_03_1_0	5.195.846	921.656	4.274.190	15.160	3.968	3.863.129
RP_5_900_03_1_1	1.716.966	766.126	950.839	11.318	2.372	942.874

Tabla 100. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - americano. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
RP_3_700_00_0_0	16.452.060	5.310	15.004.325	545.421	481.580
RP_3_700_00_0_1	9.809.086	2.438	9.001.539	512.306	379.707
RP_3_700_00_1_0	14.418.745	693	14.040.601	524.729	485.211
RP_3_700_00_1_1	5.796.695	31	5.547.065	491.177	384.332
RP_3_700_03_0_0	40.720.427	106.051	16.259.945	1.033.582	1.022.063
RP_3_700_03_0_1	40.280.126	105.001	16.050.305	1.001.118	993.632
RP_3_700_03_1_0	44.623.464	117.864	17.450.838	1.036.537	1.021.541
RP_3_700_03_1_1	43.770.283	116.549	16.888.856	1.002.913	993.555
RP_3_900_00_0_0	22.204.836	23.291	16.704.851	454.183	421.354
RP_3_900_00_0_1	13.972.882	17.909	9.693.701	429.963	329.004
RP_3_900_00_1_0	20.552.003	10.120	18.094.687	444.449	425.165
RP_3_900_00_1_1	9.457.818	2.245	8.787.117	413.891	332.699
RP_3_900_03_0_0	39.110.250	98.666	16.369.434	742.930	729.467
RP_3_900_03_0_1	38.444.297	97.169	16.018.680	717.721	674.810
RP_3_900_03_1_0	43.258.872	112.129	17.428.110	740.115	732.366
RP_3_900_03_1_1	41.763.184	107.972	16.851.970	695.530	676.491
RP_5_700_00_0_0	14.899.460	4.441	13.620.540	593.958	523.046
RP_5_700_00_0_1	9.907.368	3.343	8.866.116	567.262	420.528
RP_5_700_00_1_0	11.672.007	16	11.420.624	557.312	527.823
RP_5_700_00_1_1	4.400.215	14	4.125.060	529.844	426.636
RP_5_700_03_0_0	40.288.250	102.343	16.633.491	964.133	955.346
RP_5_700_03_0_1	39.272.287	100.933	15.935.728	939.783	926.048
RP_5_700_03_1_0	41.692.931	106.387	17.114.352	965.608	956.721
RP_5_700_03_1_1	39.977.771	104.049	15.929.240	940.404	927.470
RP_5_900_00_0_0	23.194.318	28.127	16.576.947	519.143	457.438
RP_5_900_00_0_1	15.371.814	25.675	9.300.385	494.803	368.678
RP_5_900_00_1_0	20.857.020	5.725	19.407.255	469.693	461.229
RP_5_900_00_1_1	9.215.709	184	9.014.675	442.647	373.175
RP_5_900_03_0_0	39.359.604	95.132	17.410.562	701.971	689.691
RP_5_900_03_0_1	37.911.847	92.113	16.624.444	675.119	634.970
RP_5_900_03_1_0	41.051.250	100.736	17.822.294	700.433	692.339
RP_5_900_03_1_1	38.069.096	94.941	16.133.994	661.678	636.069

Tabla 101. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - americano. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
RP_3_700_00_0_0	30,04	32,55	30,29	29,44	2,26
RP_3_700_00_0_1	29,33	32,53	29,62	29,44	2,92
RP_3_700_00_1_0	29,71	32,55	29,96	28,81	2,59
RP_3_700_00_1_1	28,71	32,53	29,05	28,81	3,49
RP_3_700_03_0_0	24,27	30,03	27,90	26,91	2,13
RP_3_700_03_0_1	24,20	29,96	27,88	26,91	2,07
RP_3_700_03_1_0	24,39	30,02	27,89	26,80	2,13
RP_3_700_03_1_1	24,57	29,78	27,86	26,79	1,92
RP_3_900_00_0_0	24,13	25,08	24,28	23,34	0,80
RP_3_900_00_0_1	23,32	25,08	23,51	23,33	1,57
RP_3_900_00_1_0	23,99	25,07	24,07	22,67	1,00
RP_3_900_00_1_1	22,82	25,06	22,98	22,66	2,08
RP_3_900_03_0_0	16,47	22,90	21,62	20,90	1,27
RP_3_900_03_0_1	16,28	22,93	21,59	20,89	1,34
RP_3_900_03_1_0	17,13	22,65	21,51	20,61	1,14
RP_3_900_03_1_1	16,49	22,59	21,43	20,62	1,16
RP_5_700_00_0_0	22,35	25,68	22,66	21,98	3,02
RP_5_700_00_0_1	21,79	25,68	22,13	21,97	3,54
RP_5_700_00_1_0	21,71	25,68	22,05	21,07	3,63
RP_5_700_00_1_1	20,78	25,67	21,20	21,03	4,48
RP_5_700_03_0_0	23,09	24,38	23,42	22,30	0,97
RP_5_700_03_0_1	22,97	24,38	23,38	22,30	1,00
RP_5_700_03_1_0	23,03	24,39	23,39	22,18	1,00
RP_5_700_03_1_1	22,79	24,39	23,31	22,17	1,08
RP_5_900_00_0_0	18,09	19,47	18,25	17,33	1,22
RP_5_900_00_0_1	17,28	19,45	17,50	17,33	1,95
RP_5_900_00_1_0	17,76	19,48	17,93	16,41	1,55
RP_5_900_00_1_1	16,31	19,45	16,57	16,34	2,88
RP_5_900_03_0_0	18,03	19,18	18,21	17,38	0,97
RP_5_900_03_0_1	17,47	19,13	18,13	17,38	1,00
RP_5_900_03_1_0	17,94	19,15	18,12	17,04	1,03
RP_5_900_03_1_1	17,65	19,11	17,89	17,02	1,22

Tabla 102. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - americano. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
RP_3_700_00_0_0	86.889.800	87.170.530	57.422.669	57.471.158	299.978
RP_3_700_00_0_1	88.453.751	88.714.172	84.334.635	84.347.921	189.223
RP_3_700_00_1_0	106.122.293	106.406.097	65.264.559	65.321.969	405.103
RP_3_700_00_1_1	108.173.623	108.428.846	102.114.091	102.120.824	265.483
RP_3_700_03_0_0	37.403.460	37.908.322	8.330.259	8.343.358	755.106
RP_3_700_03_0_1	38.016.268	38.511.716	10.836.421	10.846.261	1.883.148
RP_3_700_03_1_0	42.808.252	43.353.639	9.364.024	9.380.175	1.249.021
RP_3_700_03_1_1	43.709.518	44.239.839	13.767.588	13.778.039	3.155.482
RP_3_900_00_0_0	66.977.706	67.285.243	28.898.819	28.955.288	353.521
RP_3_900_00_0_1	69.954.594	70.206.540	64.840.607	64.859.210	315.474
RP_3_900_00_1_0	93.190.250	93.649.032	33.564.071	33.632.422	506.331
RP_3_900_00_1_1	97.514.324	97.898.743	86.845.393	86.859.930	590.035
RP_3_900_03_0_0	33.872.652	34.383.635	6.852.528	6.864.482	413.963
RP_3_900_03_0_1	35.053.063	35.535.473	10.266.329	10.282.804	1.768.379
RP_3_900_03_1_0	43.643.316	44.283.011	7.780.651	7.799.968	596.120
RP_3_900_03_1_1	45.616.680	46.216.810	16.182.510	16.212.569	3.000.155
RP_5_700_00_0_0	90.416.008	90.695.985	68.693.088	68.740.045	225.218
RP_5_700_00_0_1	91.035.297	91.297.190	88.330.754	88.352.281	159.012
RP_5_700_00_1_0	114.043.396	114.260.761	81.183.749	81.240.071	332.384
RP_5_700_00_1_1	114.930.613	115.121.336	111.652.712	111.663.869	182.186
RP_5_700_03_0_0	44.663.405	45.195.432	12.025.265	12.040.379	805.889
RP_5_700_03_0_1	45.376.263	45.897.238	16.689.792	16.698.938	1.966.396
RP_5_700_03_1_0	51.868.292	52.432.850	14.319.480	14.339.772	1.199.296
RP_5_700_03_1_1	52.900.190	53.443.618	22.486.043	22.495.564	2.940.983
RP_5_900_00_0_0	69.445.042	69.857.190	33.400.802	33.467.067	385.083
RP_5_900_00_0_1	71.184.295	71.552.802	66.669.951	66.702.316	296.586
RP_5_900_00_1_0	102.385.046	102.789.290	41.403.424	41.488.487	592.699
RP_5_900_00_1_1	104.966.391	105.309.456	97.274.872	97.304.467	496.626
RP_5_900_03_0_0	39.953.625	40.520.900	8.653.432	8.673.609	479.794
RP_5_900_03_0_1	41.437.947	41.974.649	15.328.498	15.358.603	1.871.610
RP_5_900_03_1_0	54.659.224	55.377.699	10.837.304	10.874.175	666.287
RP_5_900_03_1_1	57.071.201	57.739.751	26.713.310	26.766.382	2.966.584

Tabla 103. Resultados recirculación RP. Escenario cantábrico - americano. Contaminación remanente.

Modelo	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes	VFinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	17.199.870	5.316.066	11.883.804	1.526	43.507	1.620.090
RP_3_700_00_0_1	17.160.721	5.295.887	11.864.834	1.529	43.726	1.458.439
RP_3_700_00_1_0	16.145.768	4.314.564	11.831.204	1.419	40.800	576.367
RP_3_700_00_1_1	16.024.949	4.294.688	11.730.260	1.414	40.753	414.230
RP_3_700_03_0_0	8.154.004	2.598.138	5.555.866	1.138	19.130	679.560
RP_3_700_03_0_1	7.871.217	2.625.240	5.245.977	1.138	18.244	499.034
RP_3_700_03_1_0	3.355.721	1.639.341	1.716.380	1.116	12.916	6.475
RP_3_700_03_1_1	2.692.647	1.630.670	1.061.977	1.116	13.711	0
RP_3_900_00_0_0	4.901.001	2.152.001	2.749.000	1.265	14.563	1.748.903
RP_3_900_00_0_1	4.734.818	2.135.560	2.599.258	1.265	14.563	1.582.046
RP_3_900_00_1_0	3.818.337	1.094.881	2.723.456	1.217	11.358	668.234
RP_3_900_00_1_1	3.651.664	1.078.979	2.572.684	1.217	11.358	500.937
RP_3_900_03_0_0	1.613.859	1.162.764	451.094	1.234	13.434	1.195.366
RP_3_900_03_0_1	1.422.749	1.149.919	272.830	1.234	13.434	1.004.652
RP_3_900_03_1_0	871.150	439.474	431.675	1.210	11.180	447.210
RP_3_900_03_1_1	678.396	427.241	251.154	1.210	11.180	255.129
RP_5_700_00_0_0	26.406.944	8.176.168	18.230.776	2.447	67.180	1.806.065
RP_5_700_00_0_1	26.270.639	8.172.341	18.098.298	2.433	67.090	1.665.235
RP_5_700_00_1_0	25.189.290	7.018.300	18.170.989	2.299	63.887	592.592
RP_5_700_00_1_1	25.052.738	7.014.851	18.037.886	2.286	63.825	451.524
RP_5_700_03_0_0	11.399.004	4.545.468	6.853.536	1.136	34.858	757.751
RP_5_700_03_0_1	11.359.789	4.549.159	6.810.629	1.136	34.858	611.536
RP_5_700_03_1_0	9.934.712	3.899.589	6.035.123	1.116	32.774	33.388
RP_5_700_03_1_1	8.732.324	3.912.150	4.820.173	1.116	32.772	0
RP_5_900_00_0_0	7.016.594	2.897.899	4.118.694	1.245	18.767	1.868.976
RP_5_900_00_0_1	6.867.034	2.891.291	3.975.743	1.245	18.676	1.711.591
RP_5_900_00_1_0	5.866.801	1.796.463	4.070.338	1.214	14.883	719.305
RP_5_900_00_1_1	5.716.531	1.789.982	3.926.549	1.214	14.808	561.418
RP_5_900_03_0_0	2.163.876	1.478.377	685.498	1.230	14.196	1.242.311
RP_5_900_03_0_1	1.978.375	1.468.066	510.308	1.230	14.196	1.057.140
RP_5_900_03_1_0	1.449.349	777.442	671.906	1.196	13.107	518.836
RP_5_900_03_1_1	1.263.942	767.586	496.355	1.196	13.107	331.831

Tabla 104. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - europeo. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes	CODFinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	69.069.234	18.169.366	50.899.867	198.937	5.652	7.157.561
RP_3_700_00_0_1	66.825.318	18.131.302	48.694.016	200.334	5.673	5.868.762
RP_3_700_00_1_0	85.939.683	12.749.006	73.190.677	250.472	7.769	4.403.446
RP_3_700_00_1_1	80.435.595	12.785.349	67.650.245	206.902	6.499	2.681.728
RP_3_700_03_0_0	86.901.283	19.129.634	67.771.648	240.393	12.626	8.531.197
RP_3_700_03_0_1	82.612.631	19.240.527	63.372.103	226.773	12.482	6.194.013
RP_3_700_03_1_0	46.325.445	12.485.031	33.840.413	158.994	21.379	138.386
RP_3_700_03_1_1	33.129.994	12.393.434	20.736.559	144.357	21.027	0
RP_3_900_00_0_0	31.053.051	12.896.357	18.156.693	96.348	9.235	11.516.531
RP_3_900_00_0_1	28.028.881	12.743.343	15.285.538	94.611	9.169	9.226.494
RP_3_900_00_1_0	34.872.781	5.932.598	28.940.182	95.757	12.896	7.935.954
RP_3_900_00_1_1	28.049.038	5.725.802	22.323.235	82.921	10.397	4.446.318
RP_3_900_03_0_0	17.479.295	10.975.917	6.503.378	79.138	15.301	13.729.980
RP_3_900_03_0_1	13.890.812	10.761.291	3.129.520	78.195	15.124	10.286.635
RP_3_900_03_1_0	12.974.001	2.317.544	10.656.456	33.486	26.466	8.975.956
RP_3_900_03_1_1	5.318.686	2.074.535	3.244.150	25.244	19.451	2.592.877
RP_5_700_00_0_0	80.553.473	21.614.781	58.938.692	233.902	3.870	5.894.996
RP_5_700_00_0_1	77.000.574	21.589.612	55.410.962	233.153	3.857	4.867.483
RP_5_700_00_1_0	78.324.569	14.758.331	63.566.237	222.657	4.523	2.647.703
RP_5_700_00_1_1	67.417.696	14.733.257	52.684.439	157.657	3.180	1.432.234
RP_5_700_03_0_0	90.250.578	21.227.886	69.022.692	213.495	10.539	7.909.413
RP_5_700_03_0_1	89.049.275	21.245.312	67.803.962	204.599	10.225	6.219.942
RP_5_700_03_1_0	114.834.492	18.896.198	95.938.294	347.359	17.334	578.652
RP_5_700_03_1_1	94.256.611	18.927.604	75.329.007	243.548	17.276	0
RP_5_900_00_0_0	37.828.748	14.763.008	23.065.740	118.898	6.754	10.520.468
RP_5_900_00_0_1	34.914.060	14.704.886	20.209.174	117.986	6.722	8.522.016
RP_5_900_00_1_0	35.447.832	6.467.619	28.980.212	102.814	9.347	6.202.573
RP_5_900_00_1_1	27.405.643	6.389.310	21.016.332	74.883	5.642	3.123.168
RP_5_900_03_0_0	18.271.990	10.026.855	8.245.135	76.192	13.983	12.082.717
RP_5_900_03_0_1	14.426.473	9.882.390	4.544.082	74.947	13.838	8.587.149
RP_5_900_03_1_0	11.929.389	2.025.354	9.904.034	37.382	19.557	6.957.603
RP_5_900_03_1_1	4.730.975	1.949.394	2.781.581	17.320	8.014	1.617.676

Tabla 105. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - europeo. Calidad del lixiviado (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes	NH4FinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	8.073.345	1.591.356	6.481.989	21.368	634	957.247
RP_3_700_00_0_1	7.771.059	1.586.460	6.184.599	21.495	636	785.060
RP_3_700_00_1_0	10.691.514	1.032.019	9.659.495	33.968	1.053	596.843
RP_3_700_00_1_1	9.981.714	1.037.085	8.944.629	28.222	886	365.593
RP_3_700_03_0_0	11.672.790	2.174.040	9.498.750	34.754	1.833	1.232.238
RP_3_700_03_0_1	11.088.521	2.190.777	8.897.743	33.029	1.818	898.179
RP_3_700_03_1_0	6.093.948	1.382.034	4.711.914	22.783	3.063	19.830
RP_3_700_03_1_1	4.245.690	1.369.683	2.876.006	17.645	3.051	0
RP_3_900_00_0_0	3.571.653	1.216.049	2.355.604	11.534	1.112	1.444.225
RP_3_900_00_0_1	3.162.767	1.197.897	1.964.870	11.259	1.102	1.139.686
RP_3_900_00_1_0	4.369.182	548.500	3.820.682	12.978	1.748	1.068.087
RP_3_900_00_1_1	3.461.985	524.367	2.937.618	9.836	1.229	599.146
RP_3_900_03_0_0	2.111.071	1.216.904	894.166	9.292	2.118	1.690.406
RP_3_900_03_0_1	1.610.523	1.189.843	420.680	9.162	1.931	1.212.944
RP_3_900_03_1_0	1.676.469	237.862	1.438.607	4.518	3.705	1.194.169
RP_3_900_03_1_1	640.558	207.835	432.722	3.198	2.478	331.480
RP_5_700_00_0_0	8.992.272	1.745.502	7.246.770	23.460	438	779.106
RP_5_700_00_0_1	8.524.995	1.742.609	6.782.386	23.368	396	643.153
RP_5_700_00_1_0	9.189.311	962.013	8.227.298	30.089	611	357.677
RP_5_700_00_1_1	7.765.116	959.073	6.806.043	21.156	434	195.568
RP_5_700_03_0_0	11.639.911	2.173.672	9.466.238	30.770	1.520	1.134.397
RP_5_700_03_0_1	11.480.204	2.175.922	9.304.282	29.596	1.479	895.443
RP_5_700_03_1_0	15.151.063	1.902.732	13.248.330	50.036	2.499	83.411
RP_5_700_03_1_1	12.321.837	1.908.790	10.413.047	35.204	2.505	0
RP_5_900_00_0_0	4.241.868	1.348.589	2.893.279	12.831	777	1.319.830
RP_5_900_00_0_1	3.850.936	1.341.994	2.508.941	12.687	751	1.056.489
RP_5_900_00_1_0	4.229.547	487.900	3.741.646	13.829	1.257	829.249
RP_5_900_00_1_1	3.168.917	479.237	2.689.680	7.985	760	418.550
RP_5_900_03_0_0	2.161.239	1.052.719	1.108.520	8.773	1.772	1.489.717
RP_5_900_03_0_1	1.638.242	1.034.928	603.313	8.625	1.731	1.017.566
RP_5_900_03_1_0	1.458.840	138.446	1.320.394	5.141	2.690	917.339
RP_5_900_03_1_1	496.788	129.857	366.930	1.785	982	204.021

Tabla 106. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - europeo. Calidad del lixiviado (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
RP_3_700_00_0_0	9.129.455	30	8.849.446	606.821	518.499
RP_3_700_00_0_1	7.255.252	12	6.965.279	589.945	441.945
RP_3_700_00_1_0	7.395.377	0	7.147.922	568.672	521.319
RP_3_700_00_1_1	4.843.441	0	4.577.393	551.843	445.250
RP_3_700_03_0_0	25.920.265	51.581	14.012.934	1.279.041	1.265.444
RP_3_700_03_0_1	25.048.320	48.982	13.715.187	1.228.129	1.216.423
RP_3_700_03_1_0	22.882.890	30.422	15.831.515	1.203.192	1.202.368
RP_3_700_03_1_1	21.379.106	27.074	15.012.619	982.909	980.080
RP_3_900_00_0_0	14.857.980	660	14.512.336	501.090	442.097
RP_3_900_00_0_1	11.067.463	487	10.749.872	487.986	377.327
RP_3_900_00_1_0	13.434.622	18	13.262.333	480.293	443.778
RP_3_900_00_1_1	8.661.251	0	8.474.864	467.395	379.448
RP_3_900_03_0_0	28.741.149	65.348	13.660.007	770.383	744.062
RP_3_900_03_0_1	27.935.361	64.895	12.957.980	756.579	712.240
RP_3_900_03_1_0	29.206.487	65.207	14.166.247	751.656	744.979
RP_3_900_03_1_1	27.857.848	63.960	13.099.359	738.780	714.229
RP_5_700_00_0_0	7.266.482	133	6.920.294	650.685	557.720
RP_5_700_00_0_1	6.195.116	133	5.844.104	638.817	481.911
RP_5_700_00_1_0	4.670.951	0	4.385.931	600.877	561.627
RP_5_700_00_1_1	2.952.667	0	2.659.266	588.802	486.057
RP_5_700_03_0_0	23.395.153	40.269	14.060.034	1.196.211	1.189.686
RP_5_700_03_0_1	22.194.247	36.637	13.649.700	1.122.078	1.108.321
RP_5_700_03_1_0	21.740.491	23.725	16.202.675	1.191.892	1.189.170
RP_5_700_03_1_1	20.028.222	19.316	15.392.609	998.133	995.724
RP_5_900_00_0_0	14.415.287	726	14.047.690	553.888	477.455
RP_5_900_00_0_1	11.262.513	601	10.911.985	542.580	415.812
RP_5_900_00_1_0	12.428.521	0	12.254.229	510.884	479.602
RP_5_900_00_1_1	7.867.753	0	7.672.025	499.831	418.462
RP_5_900_03_0_0	27.637.152	58.247	14.169.906	739.860	721.227
RP_5_900_03_0_1	26.356.263	57.763	12.996.566	726.936	687.033
RP_5_900_03_1_0	27.281.766	55.870	14.372.256	727.509	722.209
RP_5_900_03_1_1	25.017.917	54.134	12.498.001	715.180	689.418

Tabla 107. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - europeo. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
RP_3_700_00_0_0	30,66	32,81	30,87	30,57	1,94
RP_3_700_00_0_1	30,53	32,81	30,75	30,57	2,06
RP_3_700_00_1_0	30,39	32,82	30,58	30,17	2,24
RP_3_700_00_1_1	30,18	32,81	30,40	30,18	2,40
RP_3_700_03_0_0	21,57	27,94	25,98	24,57	1,96
RP_3_700_03_0_1	20,85	27,74	25,93	24,69	1,81
RP_3_700_03_1_0	25,08	29,41	27,85	26,01	1,56
RP_3_700_03_1_1	25,52	29,36	27,63	25,92	1,73
RP_3_900_00_0_0	23,70	24,66	23,83	23,48	0,83
RP_3_900_00_0_1	23,50	24,66	23,64	23,48	1,02
RP_3_900_00_1_0	23,56	24,66	23,65	23,15	1,02
RP_3_900_00_1_1	23,29	24,66	23,40	23,15	1,26
RP_3_900_03_0_0	14,63	22,56	20,85	20,46	1,70
RP_3_900_03_0_1	13,74	22,38	20,83	20,46	1,55
RP_3_900_03_1_0	14,48	22,61	20,80	20,34	1,81
RP_3_900_03_1_1	14,12	22,44	20,76	20,35	1,68
RP_5_700_00_0_0	23,22	25,94	23,46	23,24	2,48
RP_5_700_00_0_1	23,14	25,93	23,38	23,24	2,55
RP_5_700_00_1_0	22,75	25,93	23,02	22,74	2,92
RP_5_700_00_1_1	22,60	25,93	22,86	22,73	3,07
RP_5_700_03_0_0	22,99	24,48	23,47	22,28	1,01
RP_5_700_03_0_1	22,66	24,43	23,31	22,26	1,13
RP_5_700_03_1_0	23,02	24,46	23,56	22,01	0,90
RP_5_700_03_1_1	21,81	24,50	23,31	21,97	1,19
RP_5_900_00_0_0	17,77	19,11	17,88	17,56	1,23
RP_5_900_00_0_1	17,57	19,10	17,70	17,56	1,40
RP_5_900_00_1_0	17,46	19,11	17,61	17,12	1,51
RP_5_900_00_1_1	17,09	19,10	17,29	17,11	1,82
RP_5_900_03_0_0	17,35	18,81	17,47	17,03	1,34
RP_5_900_03_0_1	17,30	18,75	17,42	17,02	1,33
RP_5_900_03_1_0	17,30	18,92	17,42	16,86	1,51
RP_5_900_03_1_1	16,55	18,85	17,30	16,86	1,55

Tabla 108. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - europeo. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
RP_3_700_00_0_0	65.298.345	65.466.685	53.463.828	53.481.735	344.776
RP_3_700_00_0_1	65.481.339	65.648.037	59.809.667	59.814.391	265.684
RP_3_700_00_1_0	76.327.198	76.463.040	59.596.463	59.621.500	462.331
RP_3_700_00_1_1	76.596.765	76.728.753	68.794.831	68.798.248	333.267
RP_3_700_03_0_0	35.966.781	36.222.467	14.264.869	14.281.219	1.833.354
RP_3_700_03_0_1	36.847.919	37.096.188	16.779.840	16.798.146	2.055.066
RP_3_700_03_1_0	47.441.449	47.708.397	18.211.428	18.242.470	2.841.424
RP_3_700_03_1_1	48.460.760	48.717.203	22.302.760	22.326.444	2.659.153
RP_3_900_00_0_0	52.985.639	53.178.431	34.668.682	34.695.488	610.940
RP_3_900_00_0_1	53.827.289	54.011.080	47.434.204	47.442.616	402.269
RP_3_900_00_1_0	65.522.440	65.752.091	38.133.821	38.169.100	841.322
RP_3_900_00_1_1	66.646.650	66.862.642	55.538.115	55.547.538	619.542
RP_3_900_03_0_0	33.781.960	34.076.728	14.352.322	14.369.054	1.311.782
RP_3_900_03_0_1	34.188.323	34.478.694	16.734.253	16.754.746	1.681.564
RP_3_900_03_1_0	39.279.663	39.611.266	15.387.491	15.411.043	1.758.718
RP_3_900_03_1_1	39.933.155	40.254.609	20.489.965	20.513.489	2.409.228
RP_5_700_00_0_0	68.664.944	68.822.142	61.616.961	61.630.008	198.056
RP_5_700_00_0_1	68.749.718	68.904.861	65.288.464	65.295.350	189.837
RP_5_700_00_1_0	80.653.861	80.741.426	70.934.287	70.952.683	255.564
RP_5_700_00_1_1	80.783.621	80.867.439	77.174.702	77.178.951	175.135
RP_5_700_03_0_0	43.933.008	44.190.199	18.210.322	18.228.939	1.739.030
RP_5_700_03_0_1	44.885.027	45.126.807	21.668.299	21.690.293	1.822.372
RP_5_700_03_1_0	56.090.595	56.371.364	22.261.320	22.291.400	2.600.019
RP_5_700_03_1_1	57.076.435	57.341.604	26.670.190	26.699.697	2.470.496
RP_5_900_00_0_0	55.555.424	55.777.551	39.959.026	39.987.382	516.465
RP_5_900_00_0_1	55.894.888	56.111.111	50.533.668	50.546.985	356.901
RP_5_900_00_1_0	70.765.965	70.972.026	46.071.992	46.112.606	759.265
RP_5_900_00_1_1	71.250.783	71.447.684	62.978.954	62.992.352	504.421
RP_5_900_03_0_0	38.305.422	38.631.483	16.812.815	16.836.770	1.384.719
RP_5_900_03_0_1	38.742.256	39.062.414	21.006.788	21.033.683	1.681.691
RP_5_900_03_1_0	47.186.485	47.538.167	19.195.008	19.230.782	1.857.233
RP_5_900_03_1_1	47.888.185	48.226.555	28.248.253	28.271.782	2.209.245

Tabla 109. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - europeo. Contaminación remanente.

Modelo	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes	VFinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	31.675.017	7.710.454	23.964.563	3.030	83.144	2.059.531
RP_3_700_00_0_1	31.504.025	7.689.919	23.814.106	3.006	82.951	1.886.451
RP_3_700_00_1_0	30.626.020	6.683.359	23.942.660	2.955	80.976	1.016.134
RP_3_700_00_1_1	30.454.629	6.662.826	23.791.802	2.933	80.783	842.752
RP_3_700_03_0_0	10.659.917	4.711.837	5.948.080	1.251	34.564	1.312.812
RP_3_700_03_0_1	10.444.808	4.690.529	5.754.278	1.251	34.349	1.097.909
RP_3_700_03_1_0	10.071.839	3.998.509	6.073.329	1.224	31.514	571.451
RP_3_700_03_1_1	9.748.425	3.980.590	5.767.835	1.224	31.416	357.263
RP_3_900_00_0_0	7.320.080	2.601.346	4.718.734	1.313	18.554	1.972.769
RP_3_900_00_0_1	7.143.820	2.583.666	4.560.153	1.313	18.298	1.797.010
RP_3_900_00_1_0	6.234.626	1.527.770	4.706.855	1.266	16.751	888.635
RP_3_900_00_1_1	6.058.244	1.510.145	4.548.099	1.266	16.524	712.683
RP_3_900_03_0_0	2.240.397	1.531.851	708.546	1.264	14.243	1.404.714
RP_3_900_03_0_1	1.978.672	1.473.874	504.798	1.264	14.243	1.213.261
RP_3_900_03_1_0	1.418.129	753.497	664.631	1.241	11.872	645.736
RP_3_900_03_1_1	1.267.773	722.319	545.453	1.241	11.872	453.663
RP_5_700_00_0_0	42.554.820	11.146.606	31.408.214	4.102	112.971	2.238.125
RP_5_700_00_0_1	42.399.641	11.142.496	31.257.144	4.085	112.754	2.085.842
RP_5_700_00_1_0	41.355.335	9.976.096	31.379.238	3.999	109.840	1.036.931
RP_5_700_00_1_1	41.199.971	9.972.027	31.227.944	3.990	109.600	884.410
RP_5_700_03_0_0	28.826.687	7.091.997	21.734.690	2.162	66.461	1.375.006
RP_5_700_03_0_1	28.618.172	7.076.819	21.541.352	2.153	66.288	1.164.771
RP_5_700_03_1_0	28.097.014	6.379.857	21.717.156	2.079	64.167	653.799
RP_5_700_03_1_1	27.888.495	6.364.724	21.523.770	2.065	63.851	443.597
RP_5_900_00_0_0	10.138.128	3.453.806	6.684.322	1.294	26.169	2.089.245
RP_5_900_00_0_1	9.986.415	3.447.115	6.539.299	1.294	25.992	1.924.018
RP_5_900_00_1_0	8.994.604	2.348.635	6.645.969	1.244	23.392	946.016
RP_5_900_00_1_1	8.842.411	2.341.956	6.500.455	1.244	23.321	780.245
RP_5_900_03_0_0	2.620.045	1.839.098	780.946	1.255	15.013	1.468.382
RP_5_900_03_0_1	2.421.899	1.820.752	601.147	1.255	15.013	1.282.485
RP_5_900_03_1_0	1.926.412	1.157.902	768.510	1.228	13.955	742.798
RP_5_900_03_1_1	1.753.074	1.159.026	594.047	1.228	13.955	557.799

Tabla 110. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - americano. Cantidad de lixiviados.

Modelo	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes	CODFinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	166.902.256	38.843.495	128.058.760	534.874	8.231	10.445.942
RP_3_700_00_0_1	162.428.913	38.832.088	123.596.824	535.292	8.284	8.898.393
RP_3_700_00_1_0	191.829.354	33.544.173	158.285.181	542.405	8.400	7.132.249
RP_3_700_00_1_1	182.417.993	33.584.848	148.833.144	544.386	8.472	5.172.817
RP_3_700_03_0_0	139.761.812	50.883.765	88.878.047	431.092	16.034	19.570.101
RP_3_700_03_0_1	133.483.295	50.376.185	83.107.110	423.298	15.854	15.607.880
RP_3_700_03_1_0	197.869.120	52.474.114	145.395.005	566.128	24.697	14.058.279
RP_3_700_03_1_1	184.506.206	51.641.327	132.864.878	555.326	23.369	8.336.027
RP_3_900_00_0_0	66.623.838	23.228.183	43.395.655	212.218	14.120	18.261.926
RP_3_900_00_0_1	60.473.653	23.000.517	37.473.136	208.280	14.067	14.320.373
RP_3_900_00_1_0	73.657.184	12.917.166	60.740.017	211.727	16.457	12.853.230
RP_3_900_00_1_1	59.735.054	12.591.548	47.143.506	204.723	16.027	7.204.519
RP_3_900_03_0_0	37.050.297	22.667.854	14.382.443	170.087	22.638	24.603.569
RP_3_900_03_0_1	30.776.617	21.699.005	9.077.612	162.590	22.541	19.693.658
RP_3_900_03_1_0	33.439.295	11.746.340	21.692.955	130.989	36.551	18.406.715
RP_3_900_03_1_1	24.569.786	10.916.828	13.652.957	118.084	34.533	10.126.218
RP_5_700_00_0_0	176.776.797	44.900.937	131.875.859	578.429	5.652	8.455.639
RP_5_700_00_0_1	172.710.758	44.868.414	127.842.343	577.207	5.645	7.517.374
RP_5_700_00_1_0	162.579.744	36.460.216	126.119.528	477.129	4.672	4.162.241
RP_5_700_00_1_1	151.693.914	36.415.517	115.278.396	475.345	4.650	3.057.407
RP_5_700_03_0_0	318.615.245	58.390.740	260.224.504	768.287	14.108	17.337.455
RP_5_700_03_0_1	304.056.611	58.113.029	245.943.582	725.295	13.879	13.519.498
RP_5_700_03_1_0	433.504.350	55.128.866	378.375.484	1.168.401	19.318	12.579.754
RP_5_700_03_1_1	400.552.930	54.815.271	345.737.659	1.005.687	16.769	7.433.801
RP_5_900_00_0_0	80.814.220	27.033.139	53.781.080	246.496	10.208	16.753.660
RP_5_900_00_0_1	75.040.485	26.945.688	48.094.797	244.723	10.173	13.460.432
RP_5_900_00_1_0	72.421.598	13.911.449	58.510.148	199.713	11.074	9.826.269
RP_5_900_00_1_1	56.301.149	13.783.165	42.517.984	180.133	8.544	4.881.214
RP_5_900_03_0_0	35.139.073	20.885.014	14.254.059	163.910	20.787	22.433.943
RP_5_900_03_0_1	29.023.654	20.510.025	8.513.628	158.437	20.694	17.000.621
RP_5_900_03_1_0	28.340.560	9.782.803	18.557.756	127.252	28.149	15.519.282
RP_5_900_03_1_1	18.637.334	9.707.237	8.930.096	124.412	21.656	7.581.059

Tabla 111. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - americano. (COD).

Modelo	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes	NH4FinalBalsa
RP_3_700_00_0_0	17.687.196	2.873.378	14.813.818	50.414	817	1.349.725
RP_3_700_00_0_1	17.105.371	2.869.410	14.235.960	50.349	821	1.150.421
RP_3_700_00_1_0	21.839.500	2.311.724	19.527.775	61.118	936	944.104
RP_3_700_00_1_1	20.629.900	2.312.952	18.316.948	52.785	840	686.045
RP_3_700_03_0_0	17.493.556	5.737.782	11.755.774	53.117	2.032	2.627.551
RP_3_700_03_0_1	16.656.191	5.672.837	10.983.353	52.186	1.996	2.096.335
RP_3_700_03_1_0	25.396.383	6.099.575	19.296.807	71.918	3.335	1.896.197
RP_3_700_03_1_1	23.634.049	5.991.816	17.642.232	70.498	3.161	1.126.583
RP_3_900_00_0_0	7.245.726	1.997.947	5.247.779	22.712	1.575	2.227.940
RP_3_900_00_0_1	6.441.737	1.972.106	4.469.630	22.301	1.566	1.723.109
RP_3_900_00_1_0	8.690.757	1.038.363	7.652.394	26.414	2.048	1.686.287
RP_3_900_00_1_1	6.881.309	1.002.146	5.879.163	21.465	1.743	946.127
RP_3_900_03_0_0	4.301.319	2.412.475	1.888.843	19.096	2.910	2.938.792
RP_3_900_03_0_1	3.488.115	2.302.352	1.185.763	18.271	2.776	2.289.458
RP_3_900_03_1_0	4.076.073	1.252.258	2.823.815	14.968	4.480	2.333.447
RP_3_900_03_1_1	2.928.571	1.157.939	1.770.631	13.519	4.202	1.270.675
RP_5_700_00_0_0	17.596.806	3.077.174	14.519.632	49.676	496	1.069.462
RP_5_700_00_0_1	17.068.275	3.073.393	13.994.882	49.539	495	950.303
RP_5_700_00_1_0	16.809.156	1.969.032	14.840.124	45.068	530	548.390
RP_5_700_00_1_1	15.409.763	1.963.748	13.446.014	38.633	457	403.781
RP_5_700_03_0_0	40.246.156	5.966.495	34.279.660	103.224	1.705	2.327.983
RP_5_700_03_0_1	38.304.318	5.931.315	32.373.003	93.783	1.669	1.814.921
RP_5_700_03_1_0	55.841.059	5.658.009	50.183.049	157.312	2.601	1.693.601
RP_5_700_03_1_1	51.482.547	5.618.480	45.864.066	135.604	2.263	1.003.103
RP_5_900_00_0_0	8.535.456	2.252.560	6.282.895	24.344	1.038	2.034.004
RP_5_900_00_0_1	7.782.565	2.242.834	5.539.730	24.089	1.033	1.614.694
RP_5_900_00_1_0	7.987.012	888.666	7.098.346	26.219	1.453	1.280.384
RP_5_900_00_1_1	5.903.784	875.083	5.028.700	15.761	822	635.559
RP_5_900_03_0_0	3.936.537	2.088.287	1.848.250	18.577	2.569	2.631.088
RP_5_900_03_0_1	3.144.542	2.045.139	1.099.402	18.030	2.471	1.929.943
RP_5_900_03_1_0	3.243.258	855.086	2.388.171	13.418	3.732	1.923.431
RP_5_900_03_1_1	1.982.214	842.288	1.139.925	12.946	2.509	902.886

Tabla 112. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - americano. (NH4).

Modelo	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
RP_3_700_00_0_0	9.569.005	217	9.278.748	520.815	445.444
RP_3_700_00_0_1	8.347.402	210	8.051.645	505.400	381.553
RP_3_700_00_1_0	7.554.798	31	7.315.152	505.843	447.982
RP_3_700_00_1_1	5.766.046	30	5.517.051	490.341	384.395
RP_3_700_03_0_0	42.437.000	111.967	16.613.422	1.016.813	1.007.065
RP_3_700_03_0_1	42.227.749	111.606	16.481.949	1.002.619	993.619
RP_3_700_03_1_0	44.129.926	117.174	17.110.961	1.017.648	1.007.655
RP_3_700_03_1_1	43.761.363	116.585	16.871.474	1.003.083	993.441
RP_3_900_00_0_0	18.510.723	16.522	14.576.846	434.121	386.207
RP_3_900_00_0_1	13.185.886	13.891	9.833.405	421.422	330.196
RP_3_900_00_1_0	16.357.293	4.208	15.263.825	426.345	388.516
RP_3_900_00_1_1	9.455.530	2.325	8.766.303	413.889	332.697
RP_3_900_03_0_0	41.341.930	104.924	17.160.553	719.306	707.900
RP_3_900_03_0_1	40.580.976	103.682	16.657.069	706.229	674.930
RP_3_900_03_1_0	43.049.253	110.157	17.667.365	713.302	708.873
RP_3_900_03_1_1	41.779.982	107.988	16.865.181	696.073	676.507
RP_5_700_00_0_0	8.141.435	379	7.773.505	565.657	486.934
RP_5_700_00_0_1	7.882.984	365	7.525.285	554.697	423.000
RP_5_700_00_1_0	4.935.010	14	4.654.600	539.551	490.419
RP_5_700_00_1_1	4.358.652	14	4.084.357	528.348	426.722
RP_5_700_03_0_0	40.147.552	103.909	16.132.211	949.528	943.496
RP_5_700_03_0_1	39.853.390	103.458	15.939.417	940.105	926.781
RP_5_700_03_1_0	40.495.062	104.873	16.261.017	950.324	944.279
RP_5_700_03_1_1	39.961.600	103.993	15.926.100	940.371	927.531
RP_5_900_00_0_0	18.350.890	20.661	13.452.442	488.061	423.371
RP_5_900_00_0_1	14.308.295	19.534	9.651.507	477.090	370.026
RP_5_900_00_1_0	15.375.043	1.156	14.974.070	453.362	425.974
RP_5_900_00_1_1	9.214.267	214	9.005.717	442.638	373.174
RP_5_900_03_0_0	40.185.925	97.507	17.692.220	682.602	670.766
RP_5_900_03_0_1	38.880.866	95.559	16.802.213	670.188	635.213
RP_5_900_03_1_0	40.338.014	98.191	17.692.550	677.020	672.562
RP_5_900_03_1_1	38.131.109	95.128	16.152.944	661.726	636.115

Tabla 113. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - americano. Biogás y cantidad de agua.

Modelo	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
RP_3_700_00_0_0	29,25	32,54	29,54	29,20	2,99
RP_3_700_00_0_1	29,11	32,54	29,41	29,21	3,12
RP_3_700_00_1_0	28,90	32,54	29,22	28,78	3,32
RP_3_700_00_1_1	28,67	32,53	29,03	28,79	3,50
RP_3_700_03_0_0	24,52	29,80	27,87	26,84	1,93
RP_3_700_03_0_1	24,50	29,95	27,87	26,85	2,08
RP_3_700_03_1_0	24,39	29,77	27,86	26,78	1,91
RP_3_700_03_1_1	24,51	29,76	27,86	26,78	1,90
RP_3_900_00_0_0	23,66	25,08	23,81	23,13	1,27
RP_3_900_00_0_1	23,18	25,08	23,35	23,14	1,72
RP_3_900_00_1_0	23,48	25,06	23,59	22,66	1,47
RP_3_900_00_1_1	22,82	25,06	22,98	22,66	2,08
RP_3_900_03_0_0	17,10	22,85	21,56	20,78	1,28
RP_3_900_03_0_1	17,94	22,87	21,53	20,79	1,35
RP_3_900_03_1_0	17,72	22,81	21,50	20,61	1,32
RP_3_900_03_1_1	16,55	22,79	21,43	20,62	1,37
RP_5_700_00_0_0	21,46	25,68	21,81	21,61	3,87
RP_5_700_00_0_1	21,43	25,68	21,78	21,61	3,90
RP_5_700_00_1_0	20,85	25,67	21,24	21,00	4,43
RP_5_700_00_1_1	20,78	25,67	21,16	21,00	4,51
RP_5_700_03_0_0	22,96	24,38	23,36	22,23	1,03
RP_5_700_03_0_1	22,91	24,39	23,34	22,23	1,04
RP_5_700_03_1_0	22,88	24,39	23,33	22,16	1,06
RP_5_700_03_1_1	22,80	24,39	23,31	22,16	1,09
RP_5_900_00_0_0	17,43	19,48	17,58	17,02	1,90
RP_5_900_00_0_1	17,05	19,45	17,22	17,02	2,24
RP_5_900_00_1_0	17,00	19,48	17,20	16,36	2,28
RP_5_900_00_1_1	16,31	19,45	16,57	16,34	2,88
RP_5_900_03_0_0	17,96	19,13	18,12	17,25	1,00
RP_5_900_03_0_1	17,87	19,12	18,05	17,24	1,08
RP_5_900_03_1_0	17,84	19,15	18,03	17,03	1,12
RP_5_900_03_1_1	17,65	19,16	17,90	17,03	1,26

Tabla 114. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - americano. Asentamientos.

Modelo	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
RP_3_700_00_0_0	95.976.644	96.244.206	86.594.743	86.609.029	209.533
RP_3_700_00_0_1	96.086.607	96.354.963	91.236.064	91.244.844	230.513
RP_3_700_00_1_0	108.131.997	108.384.291	95.268.056	95.285.845	282.495
RP_3_700_00_1_1	108.293.999	108.546.423	102.257.613	102.264.189	272.548
RP_3_700_03_0_0	40.216.466	40.728.785	10.919.069	10.929.109	1.924.688
RP_3_700_03_0_1	40.375.793	40.888.379	11.901.676	11.911.493	2.416.410
RP_3_700_03_1_0	43.554.317	44.084.125	12.137.723	12.149.839	2.608.246
RP_3_700_03_1_1	43.771.356	44.300.223	13.812.514	13.822.997	3.311.792
RP_3_900_00_0_0	76.695.583	77.004.796	49.497.717	49.542.380	757.743
RP_3_900_00_0_1	77.889.098	78.185.577	71.372.118	71.387.177	420.260
RP_3_900_00_1_0	95.875.241	96.278.392	56.530.114	56.586.195	1.027.165
RP_3_900_00_1_1	97.514.329	97.899.714	86.845.405	86.859.361	602.929
RP_3_900_03_0_0	37.672.607	38.202.330	8.649.016	8.665.690	1.689.665
RP_3_900_03_0_1	38.386.205	38.910.873	11.802.825	11.823.710	2.209.836
RP_3_900_03_1_0	44.653.473	45.264.423	10.204.550	10.230.055	2.231.883
RP_3_900_03_1_1	45.626.794	46.229.764	16.183.578	16.213.961	3.057.623
RP_5_700_00_0_0	100.470.082	100.724.636	96.435.456	96.444.466	111.258
RP_5_700_00_0_1	100.545.146	100.798.085	97.438.748	97.452.964	191.931
RP_5_700_00_1_0	114.883.997	115.072.734	109.569.285	109.577.219	129.429
RP_5_700_00_1_1	114.984.438	115.170.793	111.818.081	111.828.862	187.935
RP_5_700_03_0_0	48.311.918	48.844.988	17.700.413	17.710.286	1.948.610
RP_5_700_03_0_1	48.464.810	48.997.144	18.982.355	18.991.596	2.411.505
RP_5_700_03_1_0	52.738.927	53.282.967	20.234.762	20.246.698	2.485.404
RP_5_700_03_1_1	52.940.703	53.482.680	22.517.452	22.526.944	3.087.479
RP_5_900_00_0_0	79.554.256	79.928.897	58.505.770	58.550.839	603.419
RP_5_900_00_0_1	80.091.787	80.458.202	74.541.572	74.567.876	405.672
RP_5_900_00_1_0	104.181.838	104.541.641	70.489.141	70.550.428	895.372
RP_5_900_00_1_1	104.966.387	105.313.325	97.274.871	97.302.816	512.785
RP_5_900_03_0_0	45.046.286	45.636.245	12.852.205	12.881.081	1.819.011
RP_5_900_03_0_1	45.816.038	46.397.617	18.264.915	18.302.155	2.305.519
RP_5_900_03_1_0	56.036.764	56.719.272	16.462.339	16.508.603	2.385.605
RP_5_900_03_1_1	56.984.628	57.653.805	26.682.623	26.735.656	3.007.819

Tabla 115. Resultados recirculación RP. Escenario mediterráneo - americano. Contaminación remanente.

Anexo II. Modelos de regresión lineal.

	VTotal	VTotalExp	VTotalPos	VMaxDia	VMaxMes
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,14	0,18	0,00	0,33	0,22
Capa	-0,05	-0,06	0,01	-0,18	-0,16
Densidad	-0,05	-0,06	-0,01	-0,25	-0,13
Cobertura	0,17	0,18	0,09	0,11	0,07
Aislamiento	0,57	0,69	0,09	0,43	0,56
Sellado	0,18	0,02	0,81	0,00	0,00
r ²	0,98	0,97	0,99	0,92	0,89
s	0,05	0,07	0,04	0,09	0,12
alfa	4,4E-20	3,4E-19	3,4E-26	1,1E-13	1,2E-11
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,13	0,16	0,00	0,25	0,18
Capa	-0,05	-0,06	0,01	-0,15	-0,14
Densidad	0,01	0,00	0,02	-0,19	-0,05
Cobertura	0,16	0,19	0,06	0,09	0,09
Aislamiento	0,56	0,69	0,04	0,49	0,57
Sellado	0,18	0,02	0,88	0,00	0,00
r ²	0,98	0,98	1,00	0,91	0,88
s	0,05	0,06	0,02	0,10	0,12
alfa	1,5E-20	2,3E-20	5,3E-33	1,4E-12	3,4E-11
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,18	0,22	0,04	0,67	0,42
Capa	-0,05	-0,06	0,02	0,05	-0,25
Densidad	-0,09	-0,10	-0,04	-0,60	-0,24
Cobertura	0,28	0,27	0,29	0,12	0,12
Aislamiento	0,52	0,59	0,18	0,21	0,43
Sellado	0,09	0,01	0,49	0,00	0,00
r ²	0,96	0,95	0,90	0,99	0,92
s	0,07	0,08	0,11	0,04	0,09
alfa	6,7E-17	4,9E-16	4,0E-12	3,2E-25	2,2E-13
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,14	0,17	-0,01	0,20	0,24
Capa	-0,05	-0,06	0,03	0,19	-0,29
Densidad	0,03	0,02	0,06	-0,19	-0,05
Cobertura	0,27	0,28	0,21	0,29	0,14
Aislamiento	0,52	0,59	0,07	0,26	0,57
Sellado	0,10	0,01	0,66	0,00	0,00
r ²	0,96	0,96	0,98	0,93	0,90
s	0,07	0,07	0,05	0,07	0,12
alfa	1,2E-17	8,8E-18	2,3E-22	2,3E-14	3,5E-12

Tabla 116. Modelos de regresión sin recirculación. Cantidad de lixiviados.

	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,21	0,30	0,56	0,39	0,21
Capa	0,06	0,06	0,03	0,05	0,06
Densidad	-0,19	-0,19	-0,08	-0,20	-0,19
Cobertura	-0,05	0,00	-0,07	-0,12	-0,05
Aislamiento	0,35	0,70	-0,16	0,50	0,35
Sellado	0,40	0,02	0,52	0,12	0,40
r ²	0,92	0,97	0,85	0,90	0,59
s	0,10	0,08	0,13	0,11	0,18
alfa	3,8E-13	2,7E-18	5,7E-10	5,0E-12	1,8E-04
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,27	0,32	0,61	0,42	0,97
Capa	0,07	0,09	0,02	0,06	0,08
Densidad	-0,17	-0,16	-0,08	-0,14	-0,20
Cobertura	-0,14	-0,10	-0,11	-0,26	-0,26
Aislamiento	0,32	0,65	-0,17	0,53	-0,39
Sellado	0,40	0,03	0,53	0,07	0,09
r ²	0,90	0,96	0,86	0,93	0,86
s	0,10	0,08	0,13	0,09	0,12
alfa	2,4E-12	3,5E-17	3,3E-10	5,4E-14	3,2E-10
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,32	0,36	0,56	0,36	0,68
Capa	0,11	0,10	0,09	0,09	0,11
Densidad	-0,28	-0,27	-0,18	-0,26	-0,27
Cobertura	0,06	0,06	0,03	-0,02	-0,08
Aislamiento	0,43	0,61	0,00	0,54	-0,09
Sellado	0,19	0,01	0,34	0,04	0,11
r ²	0,93	0,93	0,66	0,96	0,56
s	0,08	0,10	0,16	0,07	0,16
alfa	1,5E-14	2,1E-14	1,7E-05	3,6E-17	4,9E-04
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,38	0,39	0,63	0,38	0,95
Capa	0,14	0,14	0,08	0,13	0,08
Densidad	-0,21	-0,20	-0,14	-0,15	-0,28
Cobertura	-0,14	-0,11	-0,11	-0,26	-0,31
Aislamiento	0,36	0,56	-0,11	0,44	-0,25
Sellado	0,22	0,01	0,44	0,03	0,09
r ²	0,92	0,94	0,81	0,92	0,87
s	0,08	0,09	0,13	0,09	0,11
alfa	1,6E-13	3,3E-15	1,7E-08	1,3E-13	1,6E-10

Tabla 117. Modelos de regresión sin recirculación. Calidad del lixiviado (COD).

	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,26	0,36	0,58	0,37	0,71
Capa	0,07	0,07	0,04	0,04	0,10
Densidad	-0,16	-0,16	-0,08	-0,17	-0,18
Cobertura	-0,12	-0,08	-0,08	-0,18	-0,10
Aislamiento	0,25	0,65	-0,15	0,45	-0,27
Sellado	0,46	0,03	0,51	0,17	0,16
r ²	0,89	0,95	0,85	0,86	0,59
s	0,11	0,08	0,13	0,12	0,18
alfa	1,3E-11	2,4E-16	4,7E-10	3,5E-10	1,7E-04
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,32	0,40	0,61	0,44	0,93
Capa	0,08	0,11	0,02	0,04	0,09
Densidad	-0,14	-0,12	-0,09	-0,10	-0,20
Cobertura	-0,23	-0,21	-0,12	-0,34	-0,26
Aislamiento	0,21	0,57	-0,16	0,45	-0,38
Sellado	0,47	0,04	0,54	0,10	0,11
r ²	0,89	0,94	0,86	0,90	0,85
s	0,12	0,08	0,13	0,11	0,12
alfa	1,8E-11	1,7E-15	3,5E-10	5,8E-12	4,5E-10
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,37	0,42	0,58	0,39	0,67
Capa	0,12	0,10	0,09	0,10	0,12
Densidad	-0,26	-0,23	-0,18	-0,25	-0,26
Cobertura	0,01	-0,01	0,02	-0,05	-0,08
Aislamiento	0,38	0,57	0,00	0,50	-0,08
Sellado	0,21	0,01	0,34	0,05	0,13
r ²	0,90	0,92	0,66	0,95	0,58
s	0,10	0,10	0,15	0,08	0,16
alfa	3,9E-12	9,3E-14	1,6E-05	8,2E-16	2,6E-04
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,43	0,46	0,64	0,42	0,91
Capa	0,15	0,15	0,08	0,16	0,09
Densidad	-0,17	-0,15	-0,13	-0,13	-0,27
Cobertura	-0,22	-0,22	-0,13	-0,33	-0,30
Aislamiento	0,30	0,50	-0,11	0,40	-0,23
Sellado	0,24	0,01	0,44	0,04	0,12
r ²	0,91	0,93	0,81	0,92	0,86
s	0,09	0,09	0,14	0,09	0,11
alfa	1,2E-12	5,5E-14	1,8E-08	1,8E-13	2,2E-10

Tabla 118. Modelos de regresión sin recirculación. Calidad del lixiviado (NH4).

	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,36	0,02	0,36	0,64	0,65
Capa	-0,05	-0,07	0,03	0,01	0,00
Densidad	0,18	0,23	-0,10	0,24	0,21
Cobertura	0,52	0,67	-0,27	-0,48	-0,53
Aislamiento	-0,08	-0,13	0,01	0,09	0,01
Sellado	-0,16	-0,05	0,26	0,09	0,16
r ²	0,96	0,86	0,60	0,91	0,94
s	0,06	0,16	0,18	0,10	0,08
alfa	7,0E-18	3,0E-10	1,5E-04	7,4E-13	3,2E-15
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,28	0,08	0,42	0,68	0,69
Capa	-0,02	-0,03	0,02	0,01	0,00
Densidad	0,06	0,02	-0,11	0,25	0,21
Cobertura	0,67	0,82	-0,33	-0,57	-0,61
Aislamiento	-0,01	-0,01	0,01	0,04	-0,01
Sellado	-0,12	-0,02	0,27	0,05	0,12
r ²	0,95	0,97	0,72	0,94	0,94
s	0,09	0,07	0,15	0,09	0,09
alfa	3,4E-16	1,1E-19	1,8E-06	5,6E-15	1,6E-15
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,22	-0,05	0,56	0,66	0,70
Capa	-0,07	-0,07	0,05	0,00	0,00
Densidad	0,24	0,30	-0,13	0,26	0,22
Cobertura	0,58	0,63	-0,40	-0,53	-0,58
Aislamiento	-0,07	-0,11	0,02	0,08	0,01
Sellado	-0,08	-0,01	0,14	0,06	0,12
r ²	0,99	0,81	0,69	0,93	0,94
s	0,04	0,19	0,16	0,09	0,09
alfa	1,2E-23	1,4E-08	5,2E-06	8,2E-14	3,4E-15
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,18	0,07	0,62	0,72	0,73
Capa	-0,04	-0,04	0,04	0,01	0,00
Densidad	0,08	0,01	-0,21	0,27	0,22
Cobertura	0,77	0,87	-0,56	-0,60	-0,64
Aislamiento	-0,03	-0,02	0,04	0,03	0,00
Sellado	-0,06	-0,01	0,14	0,02	0,08
r ²	0,97	0,99	0,86	0,94	0,95
s	0,07	0,06	0,14	0,09	0,09
alfa	2,5E-19	3,5E-23	2,8E-10	3,3E-15	1,0E-15

Tabla 119. Modelos de regresión sin recirculación. Biogás y cantidad de agua.

	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,92	0,91	0,91	0,91	0,34
Capa	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,06
Densidad	-0,43	-0,43	-0,43	-0,42	0,00
Cobertura	-0,14	-0,14	-0,14	-0,16	0,18
Aislamiento	-0,02	-0,02	-0,02	-0,04	0,34
Sellado	-0,03	-0,03	-0,03	0,00	-0,10
r ²	0,97	0,97	0,97	0,97	0,58
s	0,06	0,06	0,06	0,06	0,19
alfa	1,8E-18	1,9E-18	1,7E-18	1,4E-18	2,2E-04
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,92	0,92	0,92	0,92	0,15
Capa	-0,40	-0,40	-0,40	-0,42	0,02
Densidad	-0,39	-0,39	-0,39	-0,41	0,22
Cobertura	-0,04	-0,04	-0,04	-0,07	0,17
Aislamiento	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	0,26
Sellado	-0,04	-0,04	-0,04	0,00	0,02
r ²	0,95	0,95	0,95	0,96	0,56
s	0,07	0,07	0,07	0,07	0,18
alfa	1,7E-16	2,0E-16	1,6E-16	1,3E-17	4,0E-04
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,91	0,91	0,91	0,91	0,54
Capa	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	0,04
Densidad	-0,43	-0,43	-0,43	-0,42	0,06
Cobertura	-0,13	-0,13	-0,13	-0,15	0,25
Aislamiento	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	-0,10
Sellado	-0,02	-0,01	-0,02	0,00	-0,08
r ²	0,97	0,96	0,97	0,97	0,34
s	0,06	0,06	0,06	0,06	0,22
alfa	3,2E-18	4,7E-18	3,6E-18	2,8E-18	4,7E-02
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,92	0,92	0,92	0,92	0,36
Capa	-0,43	-0,43	-0,43	-0,43	0,13
Densidad	-0,41	-0,41	-0,41	-0,41	0,29
Cobertura	-0,01	-0,02	-0,02	-0,06	0,17
Aislamiento	-0,02	-0,02	-0,02	-0,03	-0,01
Sellado	-0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,02
r ²	0,95	0,95	0,95	0,96	0,50
s	0,07	0,07	0,07	0,07	0,20
alfa	1,6E-16	2,4E-16	1,7E-16	1,8E-17	2,2E-03

Tabla 120. Modelos de regresión sin recirculación. Asentamientos.

	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,46	0,46	0,60	0,60	1,12
Capa	-0,11	-0,11	-0,08	-0,08	0,01
Densidad	0,21	0,20	0,15	0,15	0,02
Cobertura	0,43	0,43	0,44	0,44	-0,41
Aislamiento	-0,32	-0,32	-0,11	-0,11	-0,15
Sellado	-0,03	-0,03	-0,24	-0,24	-0,26
r ²	0,98	0,98	0,91	0,91	0,73
s	0,05	0,05	0,09	0,09	0,17
alfa	2,9E-20	2,7E-20	9,8E-13	9,6E-13	1,3E-06
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,39	0,39	0,52	0,52	1,16
Capa	-0,09	-0,09	-0,07	-0,07	-0,01
Densidad	0,11	0,11	0,14	0,14	0,01
Cobertura	0,58	0,58	0,53	0,53	-0,41
Aislamiento	-0,23	-0,23	-0,10	-0,10	-0,13
Sellado	-0,02	-0,02	-0,21	-0,21	-0,31
r ²	0,95	0,95	0,90	0,90	0,67
s	0,08	0,08	0,11	0,11	0,20
alfa	1,6E-16	1,6E-16	6,5E-12	6,3E-12	1,1E-05
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Sin recirculación				
Constante	0,37	0,37	0,41	0,41	0,96
Capa	-0,12	-0,12	-0,10	-0,10	0,03
Densidad	0,23	0,23	0,19	0,19	-0,03
Cobertura	0,47	0,47	0,54	0,54	-0,64
Aislamiento	-0,26	-0,26	-0,11	-0,11	-0,14
Sellado	-0,01	-0,01	-0,12	-0,12	-0,01
r ²	0,98	0,98	0,96	0,96	0,92
s	0,04	0,04	0,07	0,07	0,11
alfa	9,2E-22	9,4E-22	4,7E-17	4,6E-17	2,4E-13
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Sin recirculación				
Constante	0,31	0,31	0,31	0,31	1,02
Capa	-0,10	-0,10	-0,08	-0,08	-0,01
Densidad	0,11	0,11	0,15	0,15	-0,05
Cobertura	0,64	0,64	0,66	0,65	-0,65
Aislamiento	-0,16	-0,16	-0,08	-0,08	-0,13
Sellado	-0,01	-0,01	-0,09	-0,09	-0,08
r ²	0,97	0,97	0,95	0,95	0,92
s	0,07	0,07	0,09	0,09	0,11
alfa	2,5E-18	2,7E-18	4,7E-16	4,6E-16	2,5E-13

Tabla 121. Modelos de regresión sin recirculación. Contaminación remanente.

	VTot	VTotExp	VTotPos	VMaxDia	VMaxMes	VFinalBalsa
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,77	0,66	0,83	0,49	0,68	0,80
Riego	-0,06	-0,17	0,00	0,00	-0,24	-0,33
Pozos	-0,29	-0,24	-0,32	-0,05	-0,15	-0,46
Capa	-0,06	-0,07	-0,05	-0,15	-0,07	-0,03
Densidad	0,16	0,12	0,18	-0,13	0,09	-0,05
Cobertura	0,13	0,13	0,13	0,12	0,14	0,12
Aislamiento	0,08	0,22	0,01	0,30	0,15	0,27
Sellado	0,03	0,01	0,03	0,00	0,00	0,10
r ²	0,61	0,73	0,61	0,78	0,58	0,78
s	0,15	0,12	0,16	0,10	0,15	0,15
alfa	1,3E-12	4,3E-18	1,7E-12	4,2E-21	2,4E-11	1,4E-21
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,80	0,69	0,85	0,73	0,76	0,80
Riego	-0,04	-0,13	0,00	0,00	-0,15	-0,39
Pozos	-0,35	-0,28	-0,37	-0,16	-0,24	-0,51
Capa	-0,08	-0,07	-0,08	-0,07	-0,06	-0,03
Densidad	0,21	0,17	0,22	0,09	0,19	-0,01
Cobertura	0,12	0,11	0,12	0,14	0,12	0,10
Aislamiento	0,05	0,17	0,00	0,10	0,08	0,24
Sellado	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,09
r ²	0,62	0,69	0,62	0,39	0,51	0,83
s	0,17	0,13	0,19	0,16	0,17	0,13
alfa	6,6E-13	3,3E-16	9,4E-13	5,0E-06	3,8E-09	2,8E-25
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,82	0,77	0,85	0,88	0,82	0,82
Riego	-0,02	-0,09	0,01	0,00	-0,23	0,02
Pozos	-0,31	-0,29	-0,31	-0,15	-0,24	-0,44
Capa	-0,07	-0,09	-0,06	-0,06	-0,08	-0,02
Densidad	0,16	0,14	0,17	0,05	0,17	-0,06
Cobertura	0,15	0,14	0,15	0,13	0,13	0,13
Aislamiento	0,05	0,11	0,02	0,03	0,04	0,24
Sellado	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,05
r ²	0,60	0,63	0,59	0,27	0,51	0,74
s	0,16	0,14	0,17	0,18	0,17	0,15
alfa	4,5E-12	1,7E-13	1,1E-11	1,3E-03	4,7E-09	1,5E-18
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,84	0,77	0,86	0,84	0,83	0,83
Riego	-0,02	-0,10	0,00	0,00	-0,15	0,00
Pozos	-0,36	-0,32	-0,37	-0,23	-0,31	-0,53
Capa	-0,08	-0,07	-0,08	-0,06	-0,07	-0,02
Densidad	0,22	0,20	0,22	0,18	0,22	0,00
Cobertura	0,12	0,12	0,12	0,14	0,12	0,11
Aislamiento	0,02	0,08	0,00	0,02	0,02	0,21
Sellado	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,05
r ²	0,62	0,66	0,61	0,44	0,55	0,85
s	0,18	0,15	0,19	0,19	0,18	0,12
alfa	4,8E-13	2,0E-14	1,0E-12	2,5E-07	2,2E-10	8,2E-27

Tabla 122. Modelos de regresión con recirculación. Cantidad de lixiviados.

	CODTotal	CODTotalExp	CODTotalPos	CODMaxMes	CODMaxConMes	CODFinalBalsa
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,77	0,65	0,86	0,68	0,73	0,90
Riego	-0,15	-0,34	-0,05	-0,41	0,01	-0,55
Pozos	-0,36	-0,22	-0,33	-0,29	0,14	-0,48
Capa	-0,01	0,02	-0,02	0,00	0,08	0,02
Densidad	0,15	0,01	0,18	0,03	-0,11	-0,12
Cobertura	0,00	-0,02	0,01	-0,05	-0,14	-0,04
Aislamiento	0,00	0,30	-0,12	0,15	-0,23	0,15
Sellado	0,11	0,03	0,11	0,08	0,09	0,20
r ²	0,60	0,82	0,67	0,57	0,62	0,84
s	0,16	0,11	0,15	0,19	0,14	0,14
alfa	2,6E-12	1,4E-24	6,6E-15	3,7E-11	9,4E-13	1,1E-25
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,90	0,65	0,94	0,84	0,81	0,94
Riego	-0,07	-0,34	-0,03	-0,20	0,05	-0,60
Pozos	-0,25	-0,35	-0,23	-0,23	0,22	-0,51
Capa	-0,03	0,02	-0,04	-0,02	0,07	0,02
Densidad	0,13	0,09	0,13	0,09	-0,14	-0,11
Cobertura	-0,02	-0,09	-0,01	-0,06	-0,21	-0,09
Aislamiento	-0,02	0,27	-0,06	0,06	-0,26	0,12
Sellado	0,05	0,03	0,05	0,03	0,06	0,19
r ²	0,55	0,71	0,57	0,51	0,82	0,86
s	0,13	0,16	0,13	0,13	0,10	0,13
alfa	1,7E-10	3,0E-17	4,0E-11	3,7E-09	5,0E-24	1,2E-28
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,82	0,72	0,87	0,82	0,70	0,88
Riego	-0,10	-0,36	-0,02	-0,39	-0,21	-0,22
Pozos	-0,38	-0,34	-0,36	-0,33	0,14	-0,43
Capa	-0,03	-0,01	-0,03	-0,02	0,10	0,04
Densidad	0,15	0,00	0,18	0,05	-0,18	-0,14
Cobertura	0,04	0,07	0,03	0,03	-0,14	0,02
Aislamiento	0,05	0,23	-0,01	0,08	-0,09	0,19
Sellado	0,04	0,01	0,05	0,03	0,07	0,12
r ²	0,60	0,63	0,65	0,51	0,68	0,76
s	0,16	0,18	0,16	0,19	0,13	0,14
alfa	2,5E-12	1,6E-13	4,6E-14	3,3E-09	1,3E-15	1,1E-19
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,94	0,76	0,96	0,90	0,79	0,95
Riego	-0,08	-0,43	-0,03	-0,29	-0,32	-0,27
Pozos	-0,28	-0,41	-0,26	-0,28	0,23	-0,50
Capa	-0,04	0,02	-0,05	-0,03	0,10	0,04
Densidad	0,14	0,12	0,15	0,11	-0,21	-0,10
Cobertura	-0,03	-0,05	-0,02	-0,02	-0,25	-0,07
Aislamiento	-0,01	0,15	-0,04	0,01	-0,15	0,13
Sellado	0,02	0,01	0,02	0,02	0,04	0,12
r ²	0,54	0,63	0,55	0,53	0,89	0,81
s	0,15	0,19	0,14	0,15	0,09	0,13
alfa	4,7E-10	2,1E-13	2,5E-10	7,6E-10	7,1E-32	1,1E-23

Tabla 123. Modelos de regresión con recirculación. Calidad del lixiviado (COD).

	NH4Total	NH4TotalExp	NH4TotalPos	NH4MaxMes	NH4MaxConMes	NH4FinalBalsa
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,81	0,71	0,87	0,76	0,72	0,88
Riego	-0,13	-0,32	-0,05	-0,33	0,00	-0,55
Pozos	-0,33	-0,18	-0,32	-0,28	0,15	-0,51
Capa	0,00	0,04	-0,01	0,00	0,09	0,03
Densidad	0,16	0,01	0,17	0,09	-0,10	-0,10
Cobertura	-0,03	-0,09	-0,01	-0,07	-0,15	-0,07
Aislamiento	-0,04	0,27	-0,12	0,03	-0,23	0,14
Sellado	0,11	0,03	0,11	0,09	0,11	0,23
r ²	0,60	0,82	0,66	0,50	0,63	0,82
s	0,15	0,10	0,15	0,17	0,14	0,15
alfa	3,0E-12	1,2E-24	2,1E-14	6,6E-09	1,8E-13	9,9E-25
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,93	0,71	0,96	0,89	0,78	0,93
Riego	-0,06	-0,32	-0,03	-0,15	0,04	-0,58
Pozos	-0,23	-0,29	-0,21	-0,20	0,22	-0,54
Capa	-0,03	0,05	-0,04	-0,02	0,08	0,03
Densidad	0,12	0,09	0,12	0,10	-0,14	-0,08
Cobertura	-0,04	-0,20	-0,02	-0,08	-0,22	-0,13
Aislamiento	-0,04	0,22	-0,07	0,00	-0,25	0,09
Sellado	0,05	0,04	0,05	0,04	0,08	0,22
r ²	0,53	0,70	0,54	0,47	0,83	0,85
s	0,13	0,16	0,13	0,12	0,10	0,14
alfa	1,0E-09	1,1E-16	3,2E-10	4,3E-08	1,8E-25	1,2E-27
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,84	0,75	0,88	0,86	0,69	0,87
Riego	-0,09	-0,36	-0,02	-0,30	-0,22	-0,24
Pozos	-0,36	-0,28	-0,35	-0,30	0,13	-0,46
Capa	-0,02	0,02	-0,02	-0,02	0,10	0,04
Densidad	0,15	-0,01	0,18	0,06	-0,17	-0,13
Cobertura	0,02	0,01	0,02	0,01	-0,15	0,02
Aislamiento	0,03	0,23	-0,01	0,05	-0,09	0,19
Sellado	0,04	0,01	0,04	0,03	0,08	0,13
r ²	0,59	0,63	0,64	0,45	0,68	0,76
s	0,16	0,17	0,15	0,18	0,13	0,15
alfa	8,4E-12	2,8E-13	1,5E-13	1,7E-07	1,7E-15	5,6E-20
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,95	0,79	0,97	0,93	0,78	0,94
Riego	-0,07	-0,45	-0,03	-0,25	-0,32	-0,29
Pozos	-0,26	-0,34	-0,24	-0,23	0,22	-0,53
Capa	-0,03	0,05	-0,04	-0,03	0,10	0,04
Densidad	0,14	0,10	0,14	0,10	-0,20	-0,09
Cobertura	-0,05	-0,13	-0,03	-0,04	-0,24	-0,08
Aislamiento	-0,02	0,14	-0,04	0,00	-0,14	0,12
Sellado	0,02	0,01	0,02	0,02	0,06	0,13
r ²	0,51	0,61	0,52	0,47	0,89	0,82
s	0,14	0,20	0,14	0,15	0,09	0,13
alfa	4,1E-09	1,4E-12	1,3E-09	4,5E-08	3,1E-32	3,1E-24

Tabla 124. Modelos de regresión con recirculación. Calidad del lixiviado (NH4).

	CH4Generado	EnergiaTotal	CH4Residual	HumedadMax	HumedadFinal
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Con recirculación				
Constante	0,36	0,01	0,34	0,73	0,74
Riego	0,03	0,06	0,01	-0,06	0,00
Pozos	0,03	0,05	-0,02	-0,07	-0,08
Capa	-0,05	-0,06	0,02	0,01	0,00
Densidad	0,15	0,17	-0,10	0,24	0,21
Cobertura	0,52	0,72	-0,22	-0,41	-0,44
Aislamiento	-0,08	-0,11	0,03	0,06	0,01
Sellado	-0,15	-0,05	0,23	0,06	0,12
r ²	0,96	0,91	0,57	0,87	0,89
s	0,06	0,12	0,15	0,10	0,09
alfa	6,4E-48	1,6E-35	3,7E-11	4,9E-29	1,1E-31
Escenario	Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Con recirculación				
Constante	0,29	0,09	0,41	0,72	0,73
Riego	-0,01	0,02	0,04	-0,05	0,00
Pozos	0,01	0,01	-0,02	-0,04	-0,05
Capa	-0,02	-0,02	0,01	0,01	0,00
Densidad	0,06	0,03	-0,10	0,25	0,21
Cobertura	0,63	0,77	-0,31	-0,53	-0,54
Aislamiento	-0,01	-0,01	0,01	0,03	0,00
Sellado	-0,11	-0,02	0,25	0,04	0,10
r ²	0,94	0,96	0,72	0,93	0,93
s	0,08	0,08	0,14	0,09	0,08
alfa	1,8E-42	3,1E-48	1,7E-17	4,9E-38	3,7E-39
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Con recirculación				
Constante	0,22	-0,06	0,54	0,76	0,78
Riego	0,03	0,05	-0,01	-0,01	0,00
Pozos	0,03	0,05	-0,01	-0,07	-0,07
Capa	-0,06	-0,07	0,04	0,00	0,00
Densidad	0,21	0,23	-0,14	0,23	0,21
Cobertura	0,58	0,70	-0,34	-0,41	-0,46
Aislamiento	-0,07	-0,09	0,03	0,06	0,02
Sellado	-0,08	-0,01	0,13	0,04	0,08
r ²	0,99	0,87	0,67	0,87	0,89
s	0,04	0,15	0,15	0,10	0,09
alfa	8,3E-64	1,9E-29	3,8E-15	9,8E-30	2,7E-32
Escenario	Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Con recirculación				
Constante	0,19	0,07	0,60	0,75	0,77
Riego	0,02	0,03	0,01	-0,03	0,00
Pozos	0,01	0,01	-0,02	-0,05	-0,06
Capa	-0,04	-0,03	0,04	0,00	0,00
Densidad	0,08	0,02	-0,18	0,26	0,21
Cobertura	0,73	0,82	-0,53	-0,54	-0,57
Aislamiento	-0,03	-0,02	0,04	0,02	0,00
Sellado	-0,05	-0,01	0,12	0,02	0,06
r ²	0,97	0,97	0,86	0,93	0,93
s	0,07	0,07	0,12	0,09	0,09
alfa	2,8E-51	6,2E-55	2,8E-28	3,2E-38	1,3E-39

Tabla 125. Modelos de regresión con recirculación. Biogás y cantidad de agua.

Escenario	MinSett	MaxSett	AvgSett	AvgSettExp	DiffSett
Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,92	0,81	0,89	0,88	0,93
Riego	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,01
Pozos	-0,09	0,10	0,00	-0,01	-0,50
Capa	-0,24	-0,34	-0,37	-0,36	0,02
Densidad	-0,35	-0,40	-0,43	-0,40	0,09
Cobertura	-0,18	-0,13	-0,14	-0,17	0,02
Aislamiento	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	0,00
Sellado	-0,01	-0,01	-0,02	0,00	-0,04
r ²	0,83	0,97	0,95	0,95	0,81
s	0,11	0,05	0,07	0,07	0,13
alfa	1,5E-25	3,2E-50	1,1E-45	2,6E-43	3,5E-23
Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,90	0,80	0,90	0,89	0,91
Riego	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,01
Pozos	-0,07	0,12	0,01	0,01	-0,40
Capa	-0,33	-0,34	-0,39	-0,41	0,00
Densidad	-0,39	-0,36	-0,39	-0,40	0,09
Cobertura	-0,10	-0,07	-0,04	-0,07	0,10
Aislamiento	-0,02	-0,01	-0,02	-0,04	-0,02
Sellado	-0,04	-0,02	-0,03	0,00	-0,04
r ²	0,86	0,96	0,95	0,96	0,77
s	0,11	0,06	0,06	0,06	0,12
alfa	2,2E-28	9,7E-48	8,5E-46	1,6E-48	2,5E-20
Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,93	0,79	0,89	0,89	0,94
Riego	0,01	0,02	0,01	0,01	-0,04
Pozos	-0,07	0,12	0,01	0,00	-0,52
Capa	-0,26	-0,34	-0,38	-0,38	0,00
Densidad	-0,37	-0,40	-0,44	-0,42	0,07
Cobertura	-0,17	-0,13	-0,13	-0,16	0,06
Aislamiento	0,00	0,00	-0,01	-0,02	-0,03
Sellado	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,01
r ²	0,84	0,96	0,96	0,96	0,86
s	0,11	0,06	0,07	0,07	0,11
alfa	2,4E-26	1,1E-49	3,0E-47	1,9E-46	8,6E-28
Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,91	0,77	0,90	0,89	0,89
Riego	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,02
Pozos	-0,07	0,14	0,02	0,01	-0,45
Capa	-0,37	-0,34	-0,42	-0,41	-0,01
Densidad	-0,41	-0,36	-0,40	-0,40	0,10
Cobertura	-0,07	-0,06	-0,02	-0,07	0,13
Aislamiento	-0,02	-0,01	-0,02	-0,03	-0,03
Sellado	-0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,01
r ²	0,87	0,96	0,95	0,96	0,78
s	0,11	0,06	0,07	0,06	0,13
alfa	8,0E-30	4,4E-47	1,3E-45	4,9E-48	1,7E-21

Tabla 126. Modelos de regresión con recirculación. Asentamientos.

Escenario	SolidCarExp	TotalCarExp	SolidCarPos	TotalCarPos	FinalCellNH4
Clima CANTABRICO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,45	0,45	0,59	0,59	1,08
Riego	0,07	0,07	0,03	0,03	-0,03
Pozos	0,03	0,03	0,02	0,02	-0,01
Capa	-0,10	-0,10	-0,07	-0,07	0,02
Densidad	0,17	0,17	0,13	0,13	0,04
Cobertura	0,41	0,41	0,43	0,43	-0,37
Aislamiento	-0,29	-0,29	-0,10	-0,10	-0,16
Sellado	-0,03	-0,03	-0,21	-0,21	-0,21
r ²	0,97	0,97	0,90	0,90	0,73
s	0,05	0,05	0,09	0,09	0,15
alfa	4,0E-51	3,2E-51	9,3E-33	8,7E-33	4,7E-18
Clima CANTABRICO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,38	0,38	0,52	0,52	1,11
Riego	0,06	0,06	0,03	0,03	-0,01
Pozos	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Capa	-0,08	-0,08	-0,06	-0,06	-0,01
Densidad	0,11	0,11	0,13	0,13	0,02
Cobertura	0,53	0,53	0,51	0,51	-0,38
Aislamiento	-0,21	-0,21	-0,10	-0,10	-0,13
Sellado	-0,02	-0,02	-0,19	-0,19	-0,27
r ²	0,95	0,95	0,89	0,89	0,69
s	0,07	0,07	0,11	0,11	0,17
alfa	4,0E-43	4,3E-43	6,1E-32	5,8E-32	5,5E-16
Clima MEDITERRANEO - Residuo EUROPEO - Con recirculación					
Constante	0,36	0,36	0,41	0,41	0,96
Riego	0,05	0,05	0,03	0,03	-0,19
Pozos	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00
Capa	-0,10	-0,10	-0,09	-0,09	0,03
Densidad	0,20	0,20	0,17	0,17	-0,01
Cobertura	0,46	0,46	0,54	0,54	-0,58
Aislamiento	-0,24	-0,24	-0,10	-0,10	-0,14
Sellado	-0,01	-0,01	-0,11	-0,11	-0,03
r ²	0,97	0,97	0,95	0,95	0,91
s	0,05	0,05	0,07	0,07	0,10
alfa	2,9E-54	3,1E-54	7,7E-43	7,3E-43	1,6E-35
Clima MEDITERRANEO - Residuo AMERICANO - Con recirculación					
Constante	0,30	0,31	0,31	0,31	1,01
Riego	0,07	0,07	0,04	0,04	-0,21
Pozos	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04
Capa	-0,08	-0,08	-0,07	-0,07	0,01
Densidad	0,11	0,11	0,15	0,15	-0,04
Cobertura	0,60	0,60	0,63	0,63	-0,55
Aislamiento	-0,15	-0,16	-0,08	-0,08	-0,10
Sellado	-0,01	-0,01	-0,08	-0,08	-0,08
r ²	0,96	0,96	0,94	0,95	0,92
s	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09
alfa	3,5E-46	4,1E-46	1,1E-42	1,0E-42	1,3E-37

Tabla 127. Modelos de regresión con recirculación. Contaminación remanente.

Anexo III. Árboles de decisión.

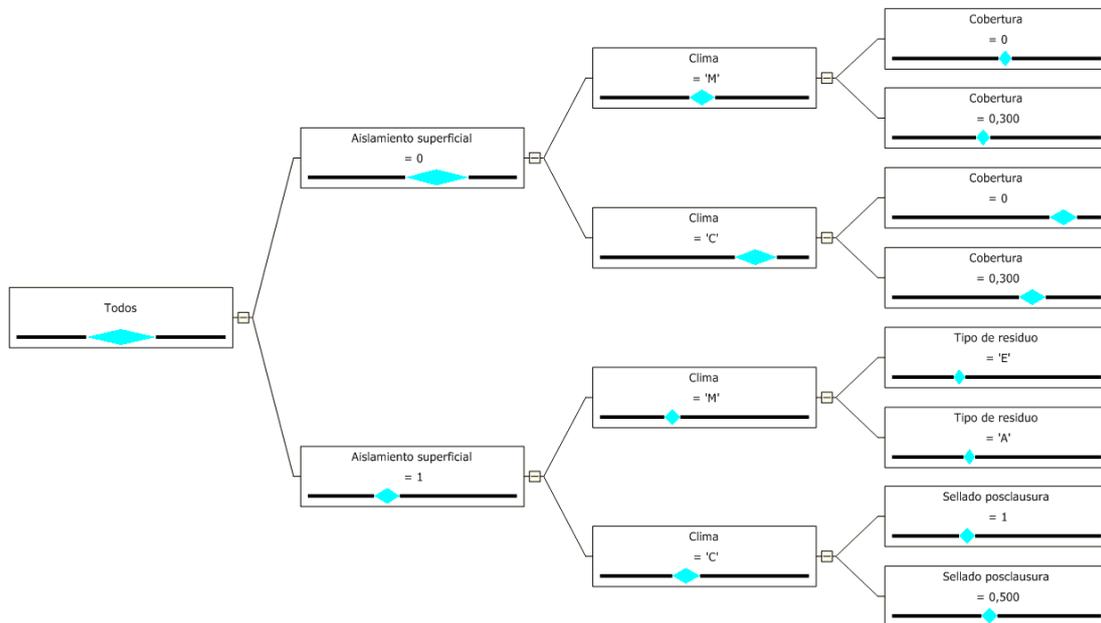


Ilustración 82. Árbol de decisión VTotal.

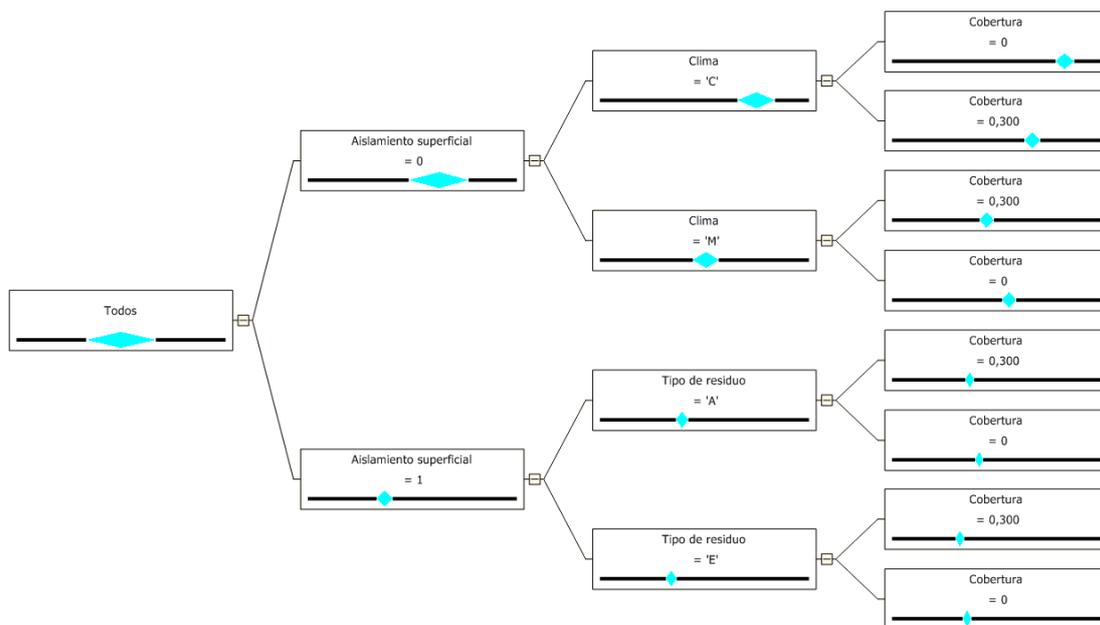


Ilustración 83. Árbol de decisión VTotalExp.

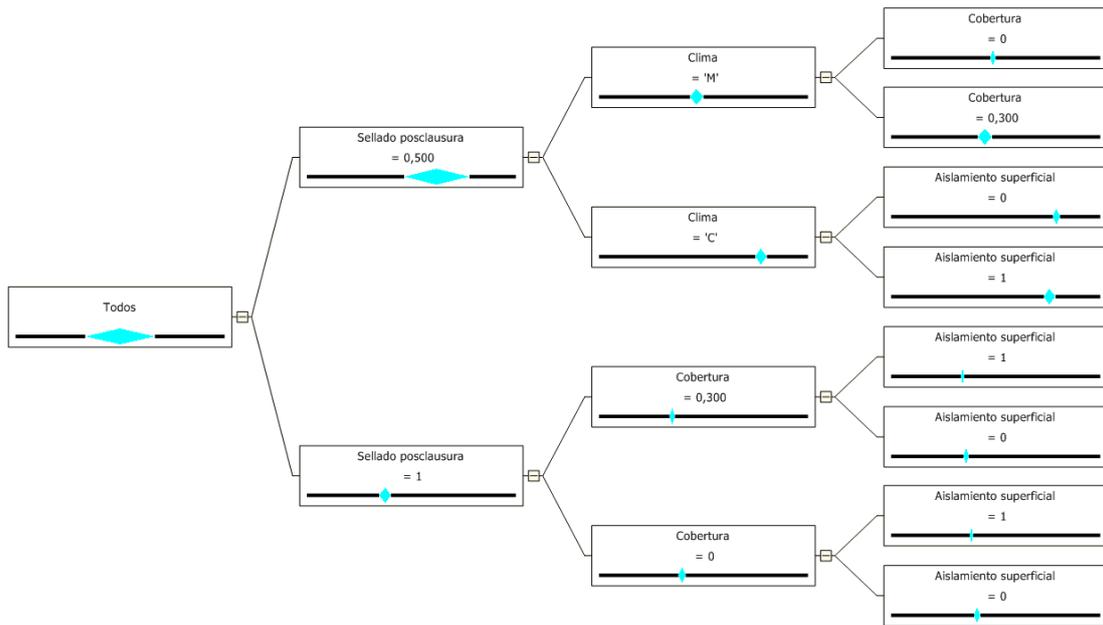


Ilustración 84. Árbol de decisión VTotalPos.

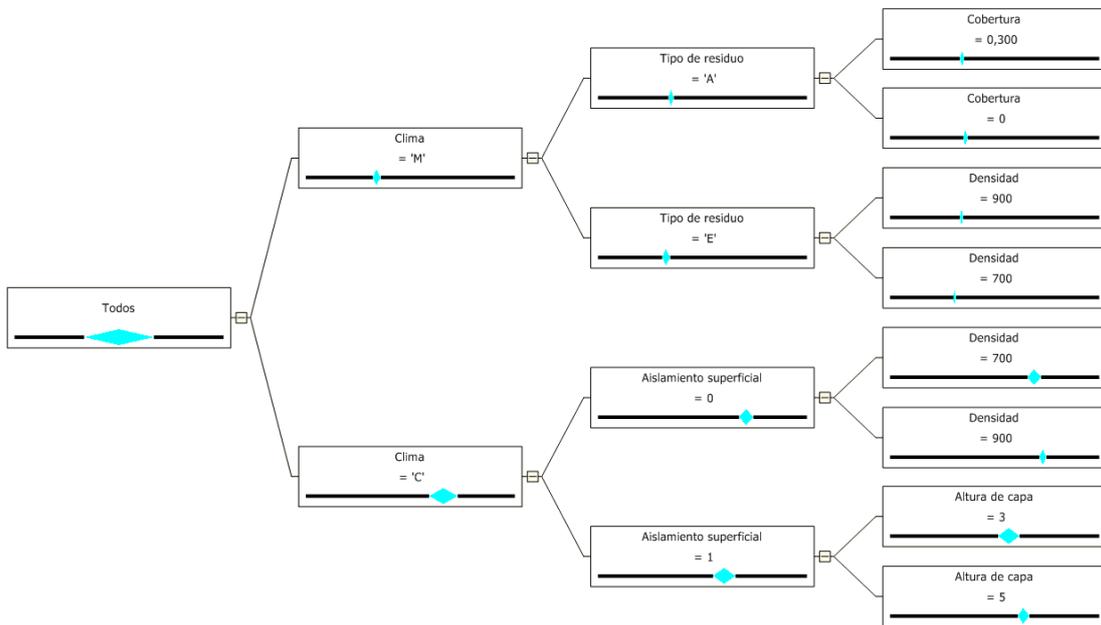


Ilustración 85. Árbol de decisión VMaxDia.

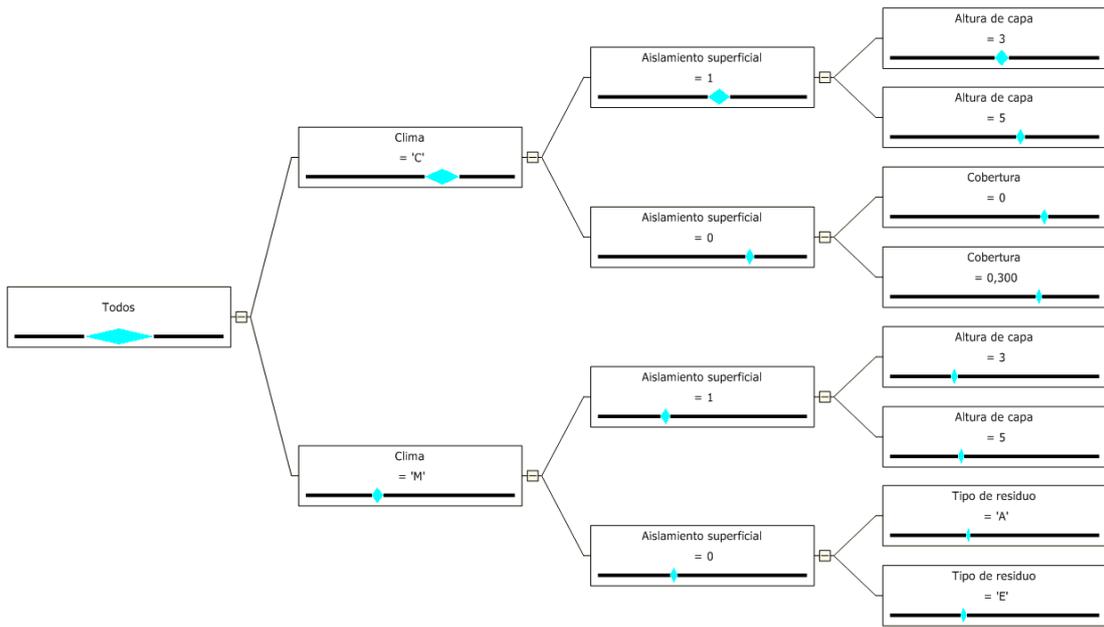


Ilustración 86. Árbol de decisión VMaxMes.

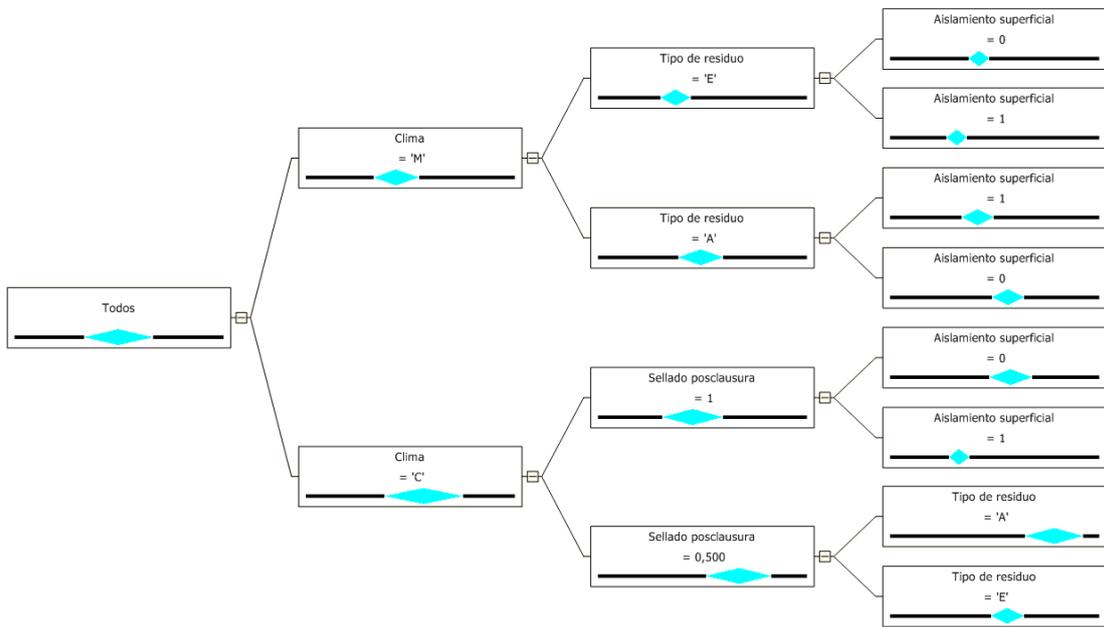


Ilustración 87. Árbol de decisión CODTotal.

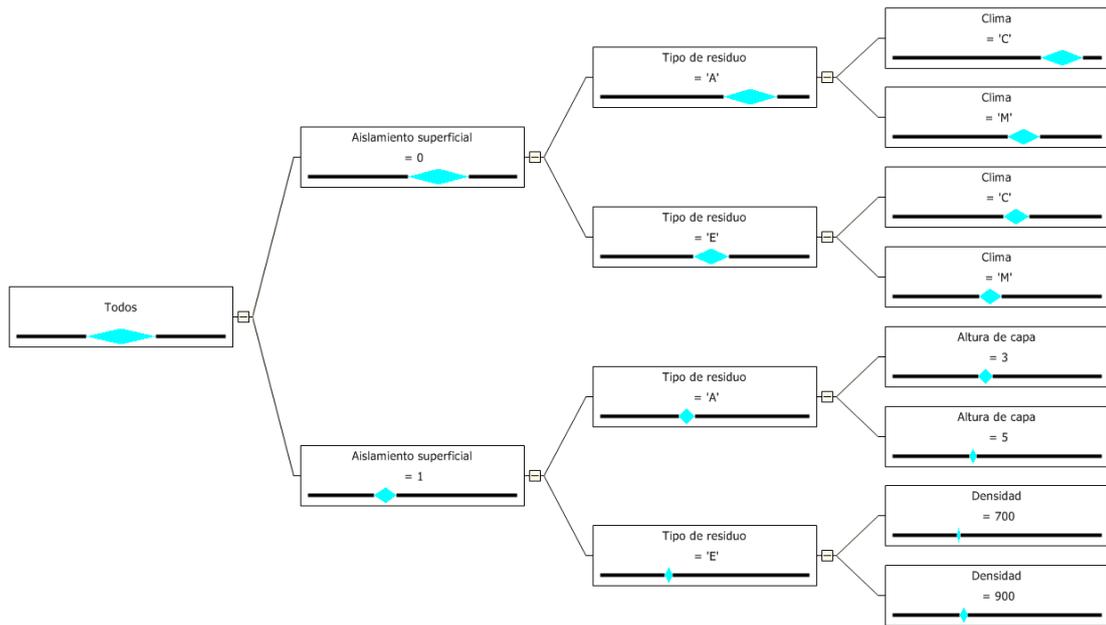


Ilustración 88. Árbol de decisión CODTotalExp.

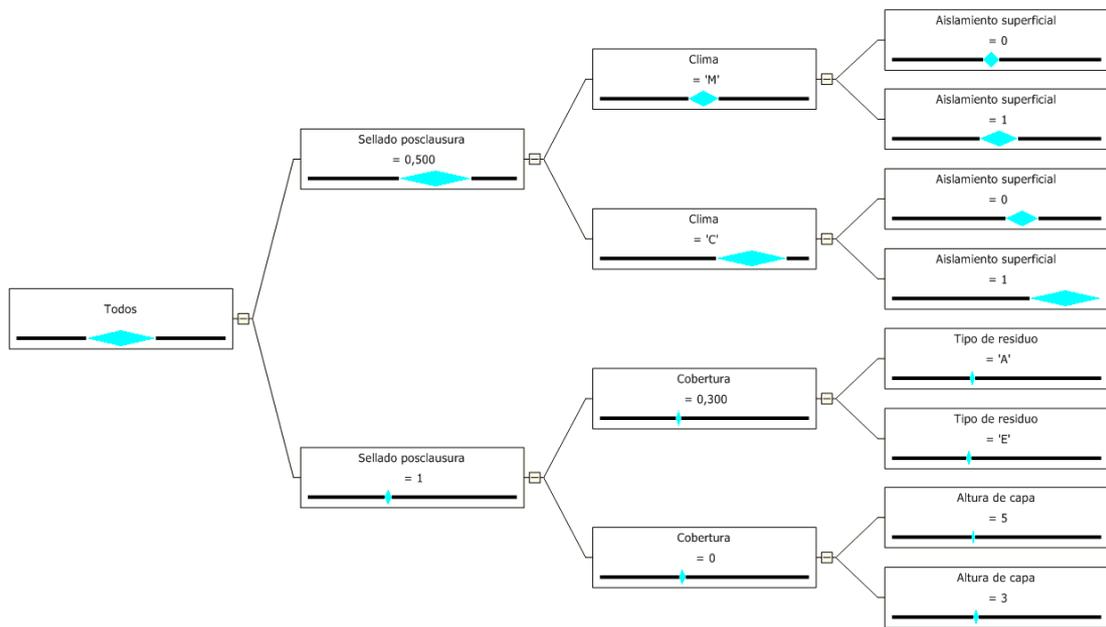


Ilustración 89. Árbol de decisión CODTotalPos.

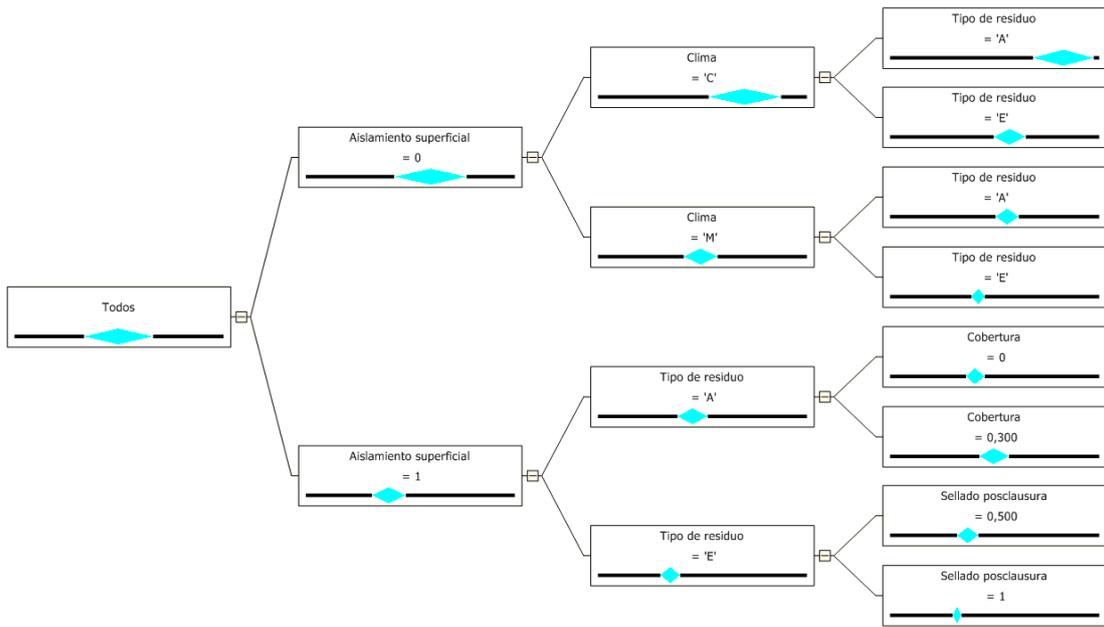


Ilustración 90. Árbol de decisión CODMaxMes.

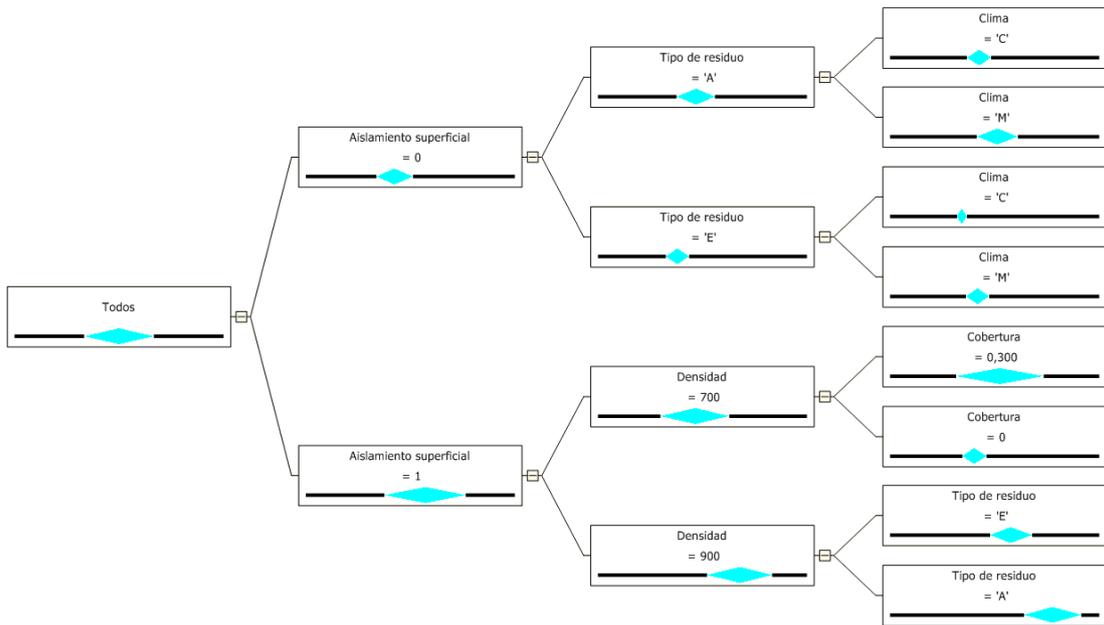


Ilustración 91. Árbol de decisión CODMaxConMes.

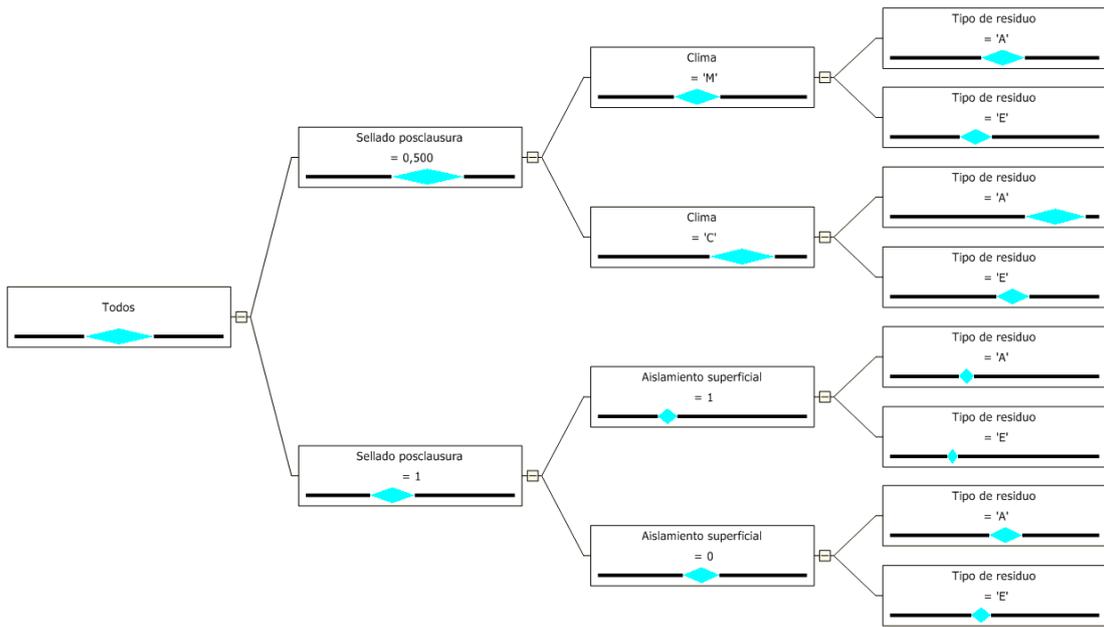


Ilustración 92. Árbol de decisión NH4Total.

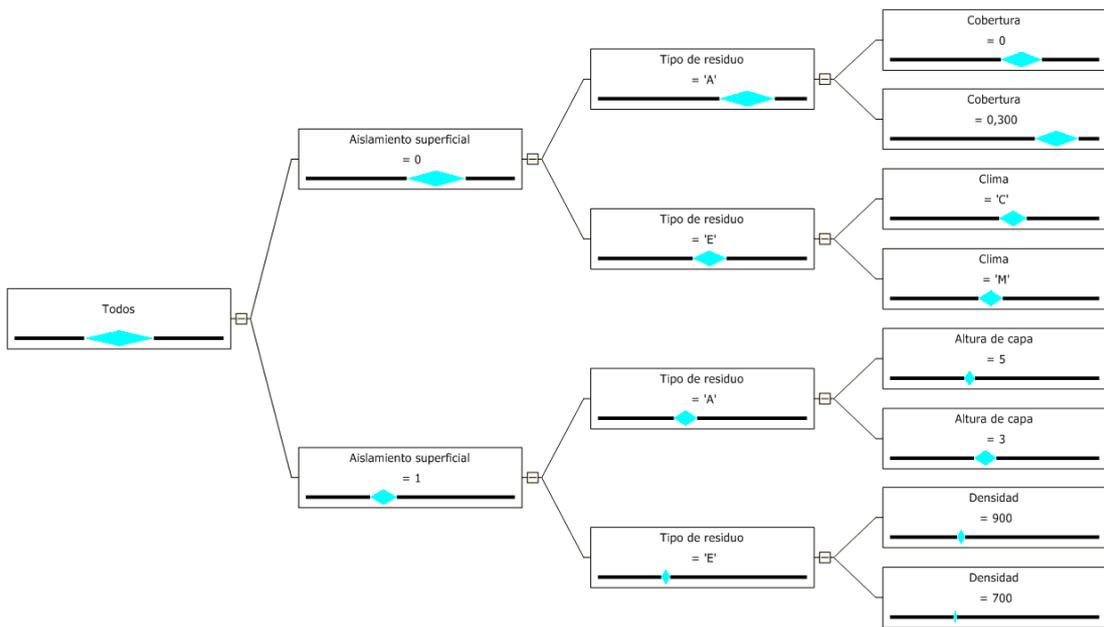


Ilustración 93. Árbol de decisión NH4TotalExp.

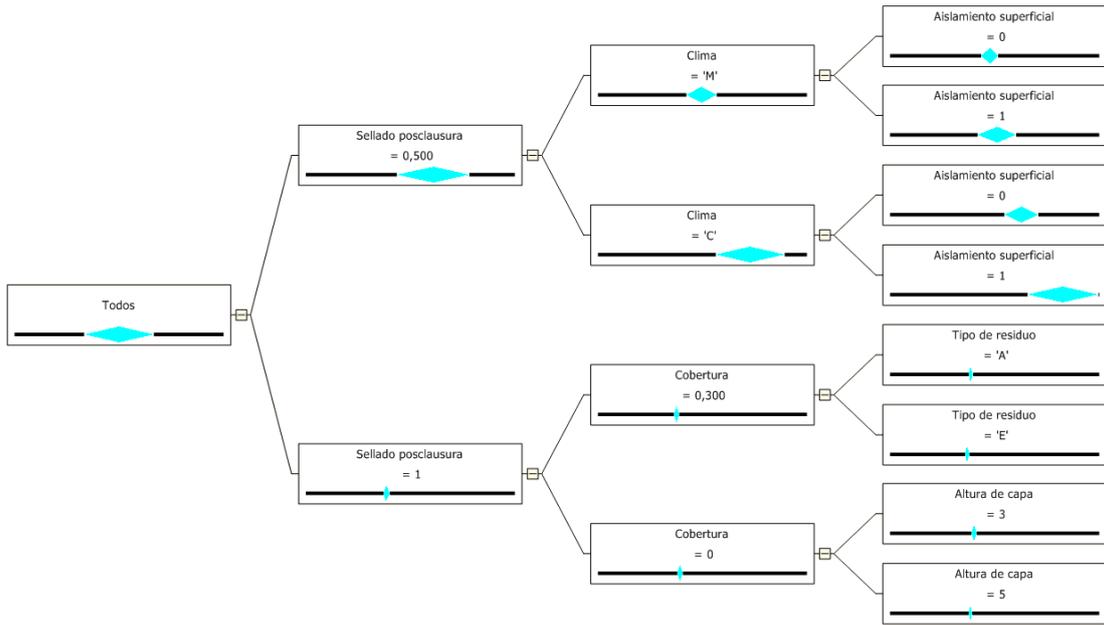


Ilustración 94. Árbol de decisión NH4TotalPos.

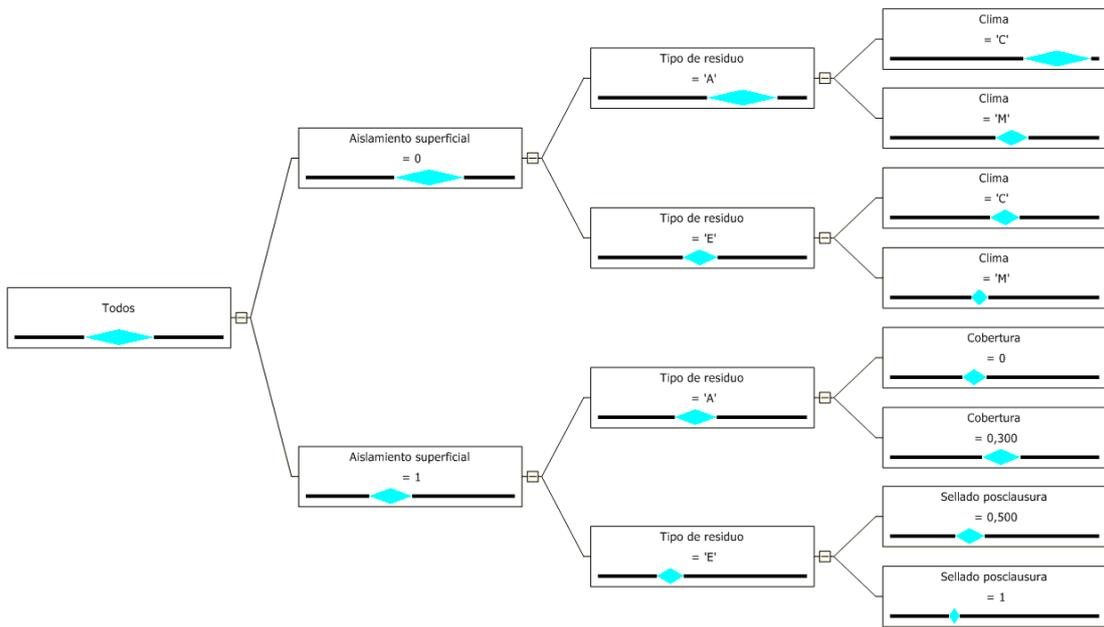


Ilustración 95. Árbol de decisión NH4MaxMes.

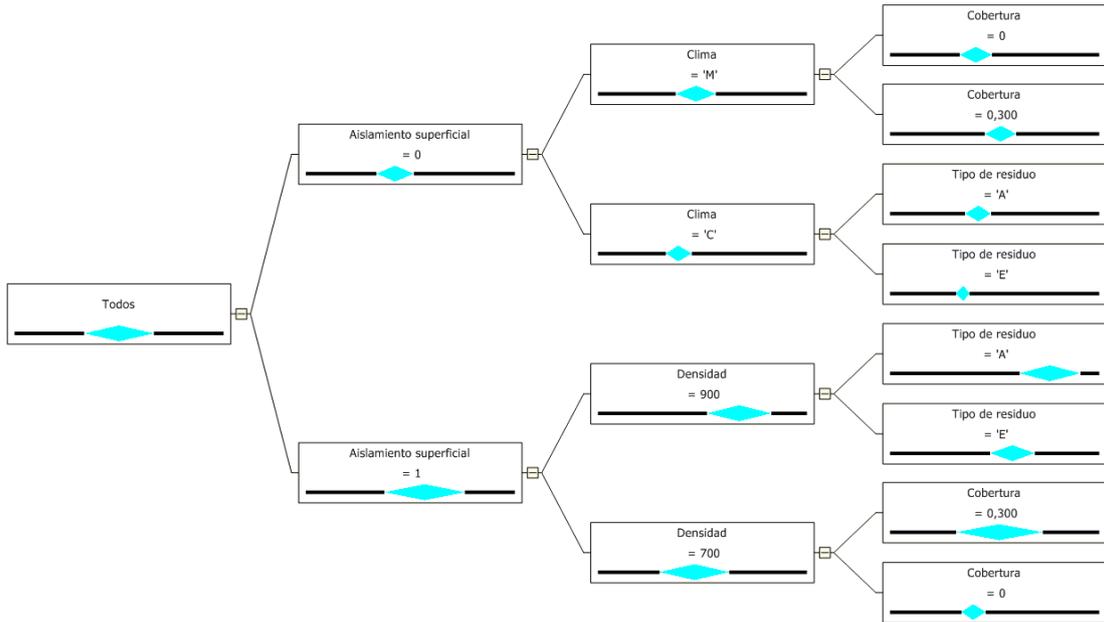


Ilustración 96. Árbol de decisión NH4MaxConMes.

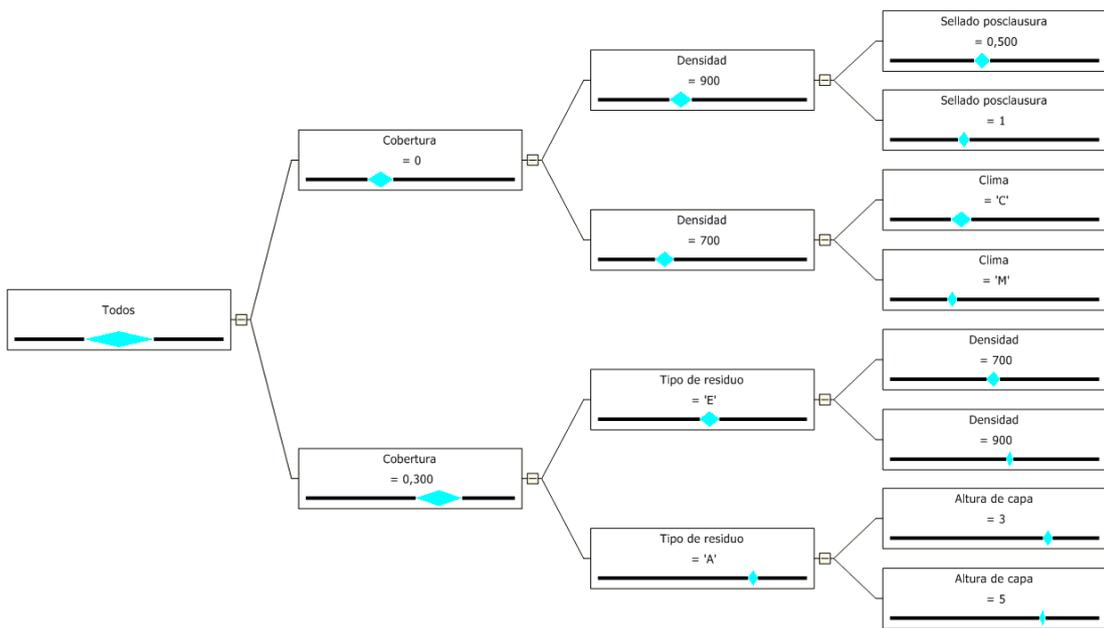


Ilustración 97. Árbol de decisión CH4Generated.

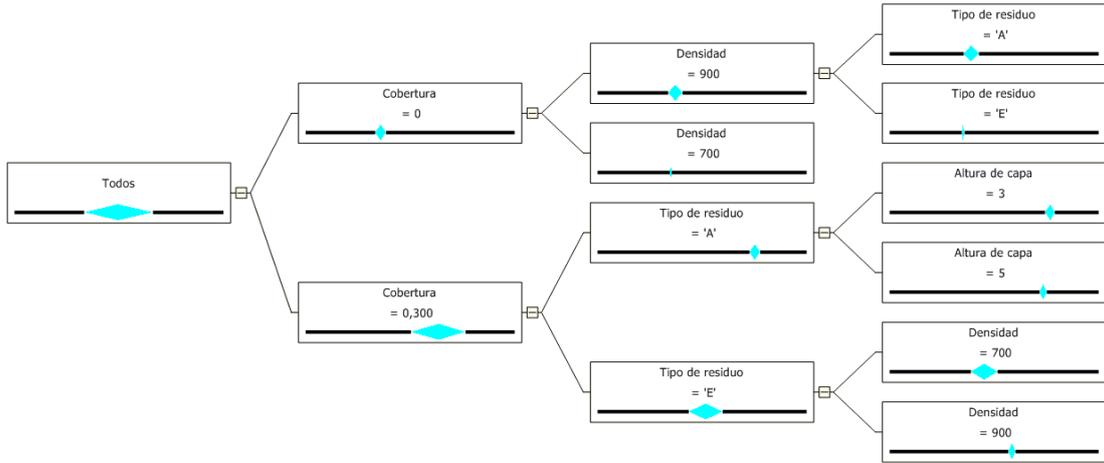


Ilustración 98. Árbol de decisión EnergiaTotal.

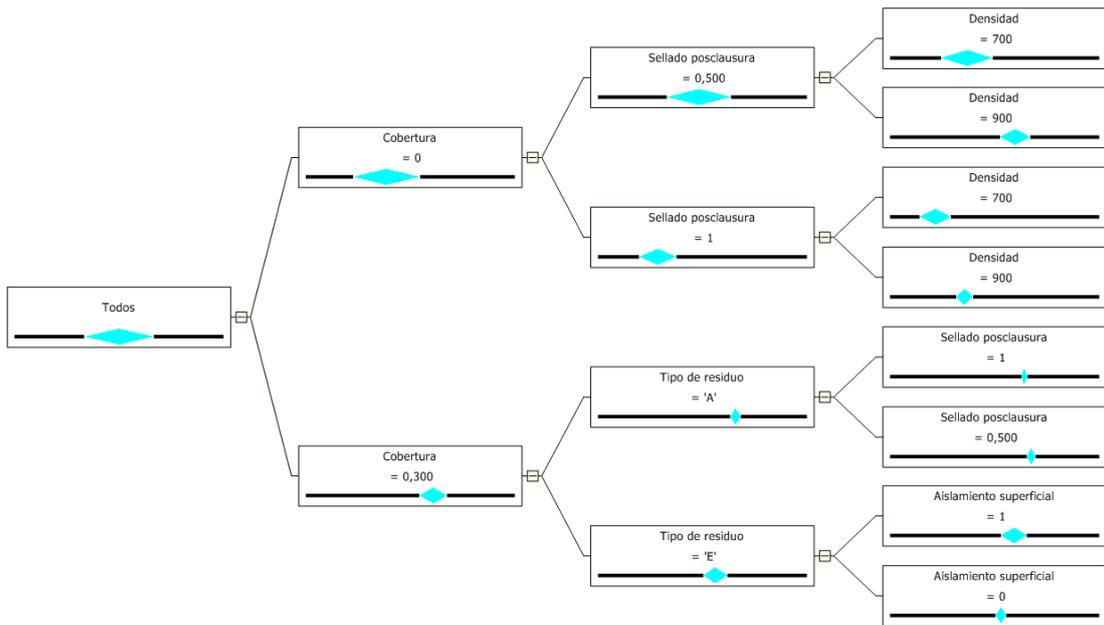


Ilustración 99. Árbol de decisión CH4Residual.

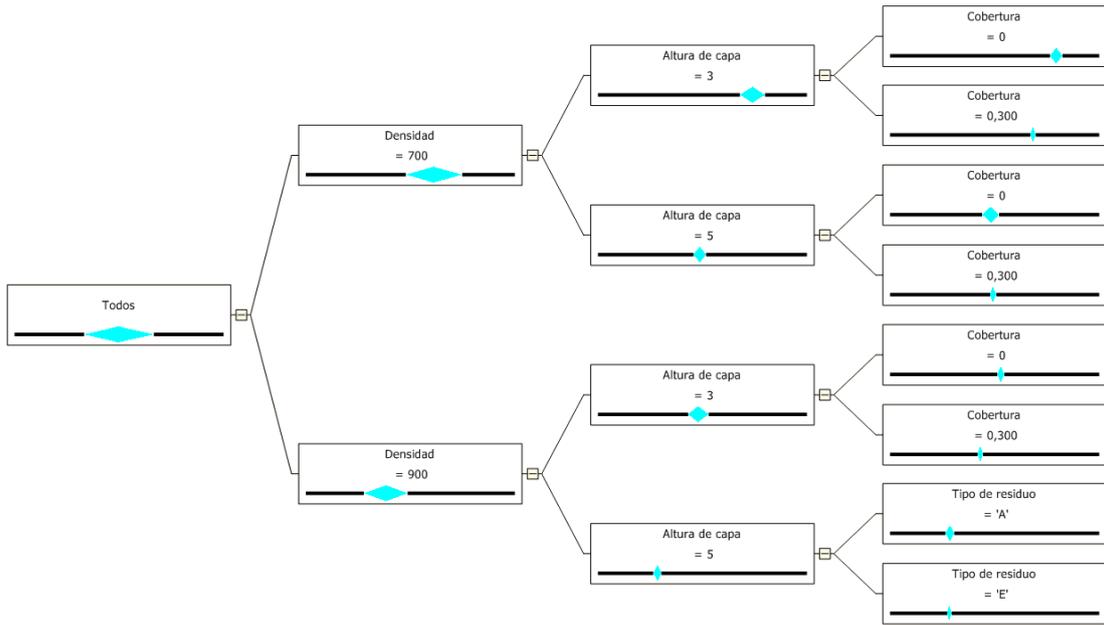


Ilustración 100. Árbol de decisión MaxSett.

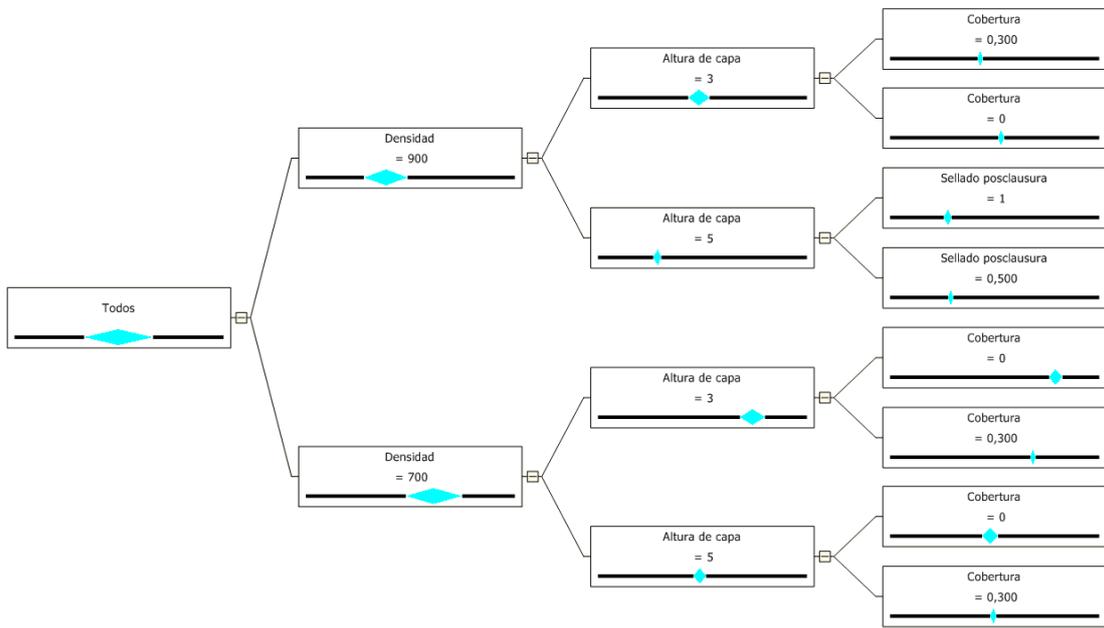


Ilustración 101. Árbol de decisión AvgSett.

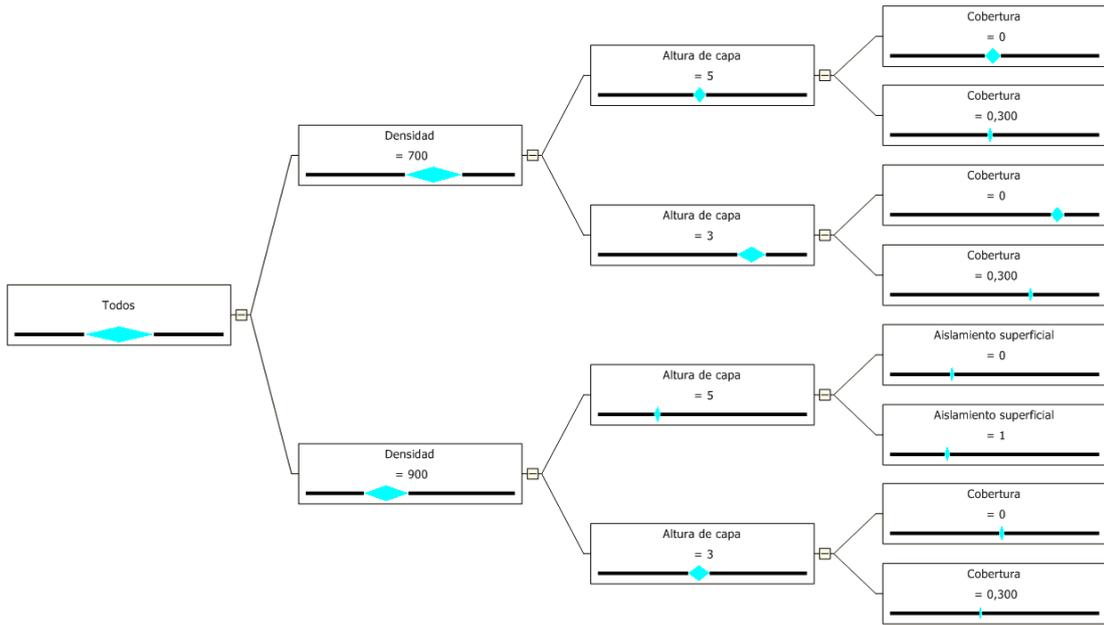


Ilustración 102. Árbol de decisión AvgSettExp.

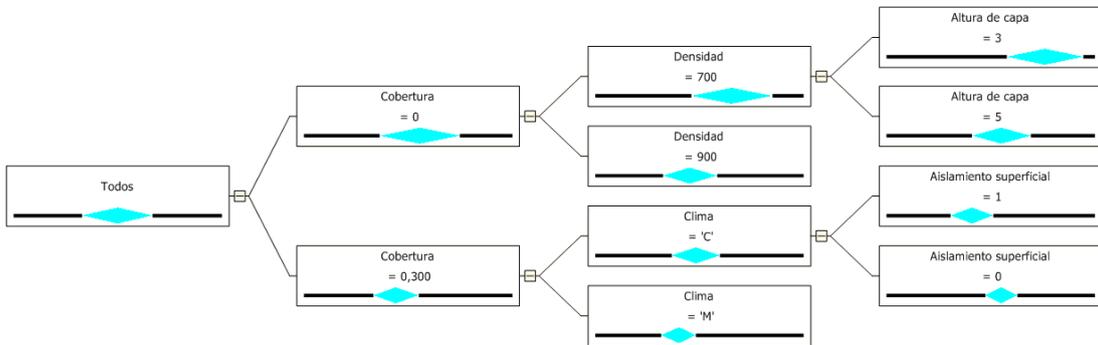


Ilustración 103. Árbol de decisión DiffSett.

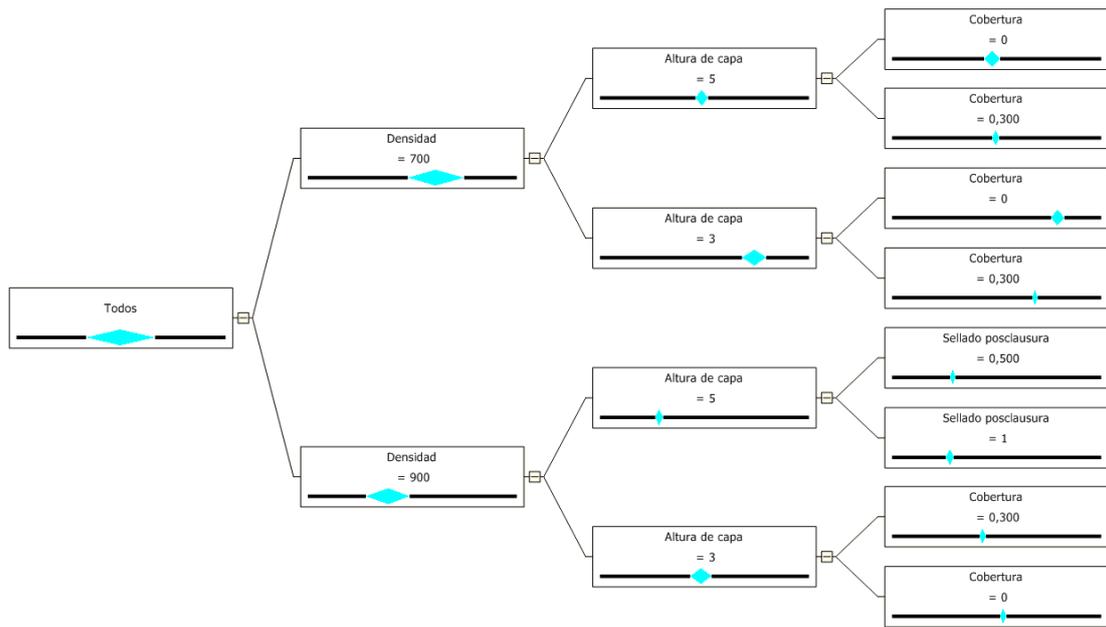


Ilustración 104. Árbol de decisión MinSet.

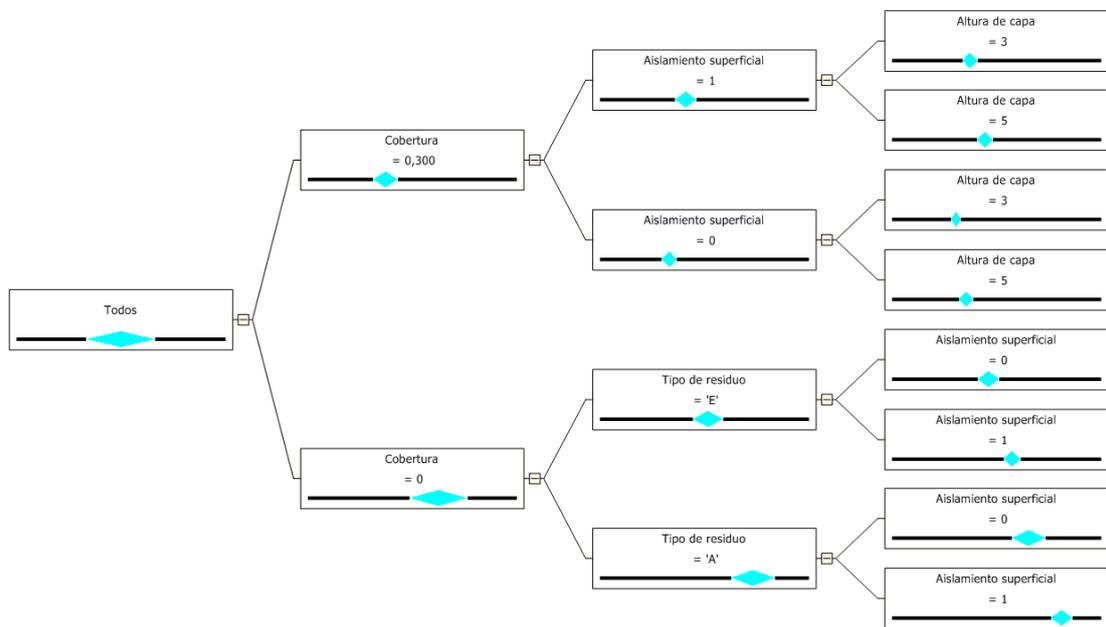


Ilustración 105. Árbol de decisión SolidCarbonExp.

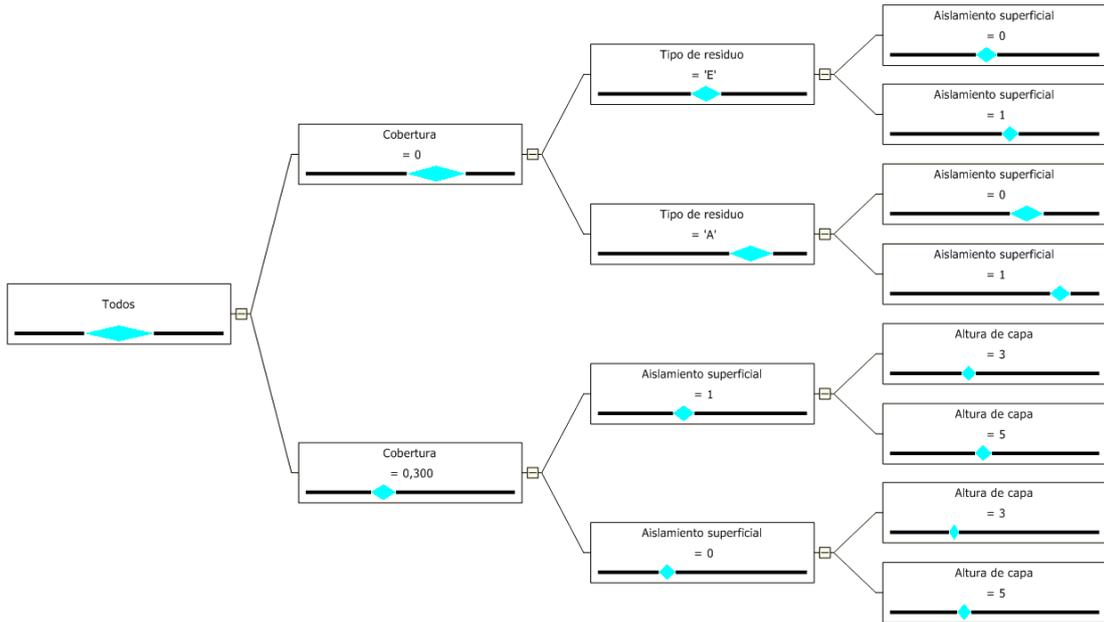


Ilustración 106. Árbol de decisión TotalCarbonExp.

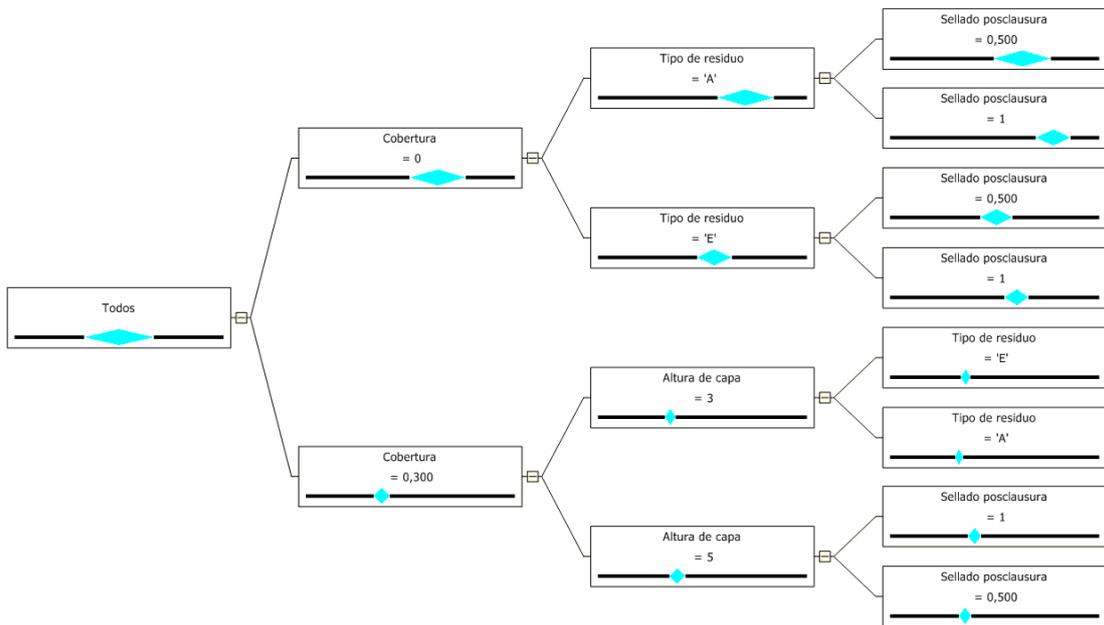


Ilustración 107. Árbol de decisión SolidCarbonPos.

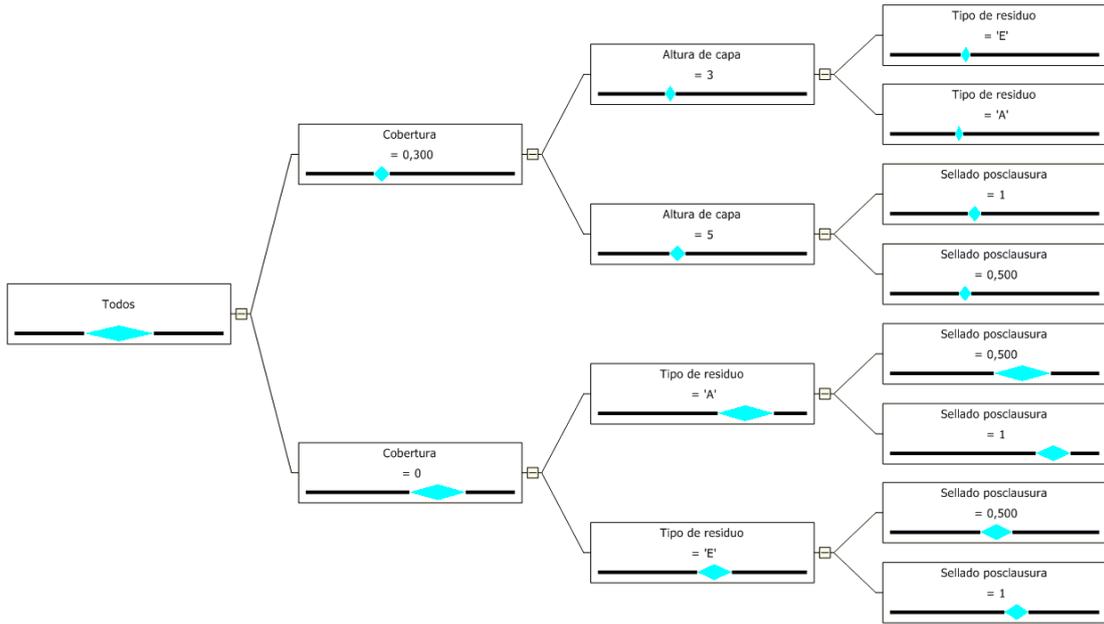


Ilustración 108. Árbol de decisión TotalCarbonPos.

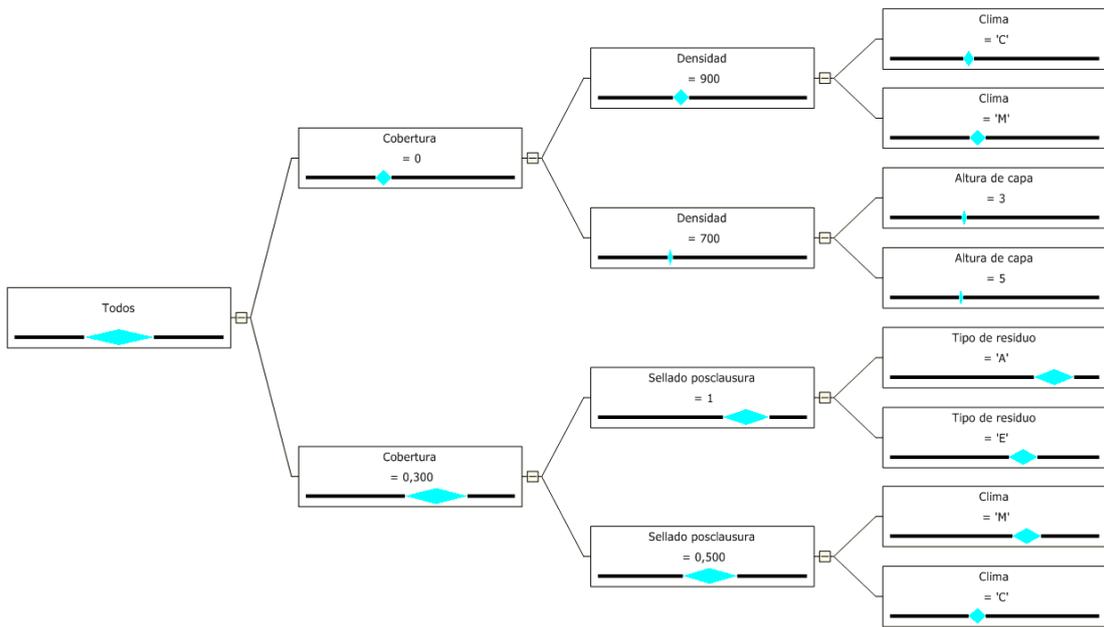


Ilustración 109. Árbol de decisión FinalCellNH4.

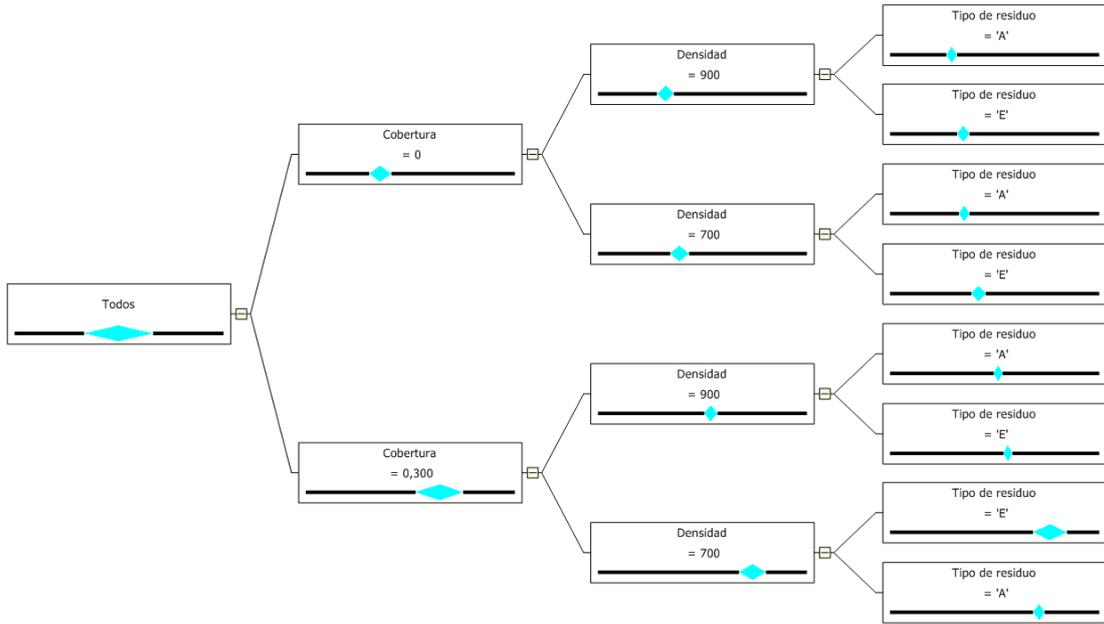


Ilustración 110. Árbol de decisión HumedadMax.

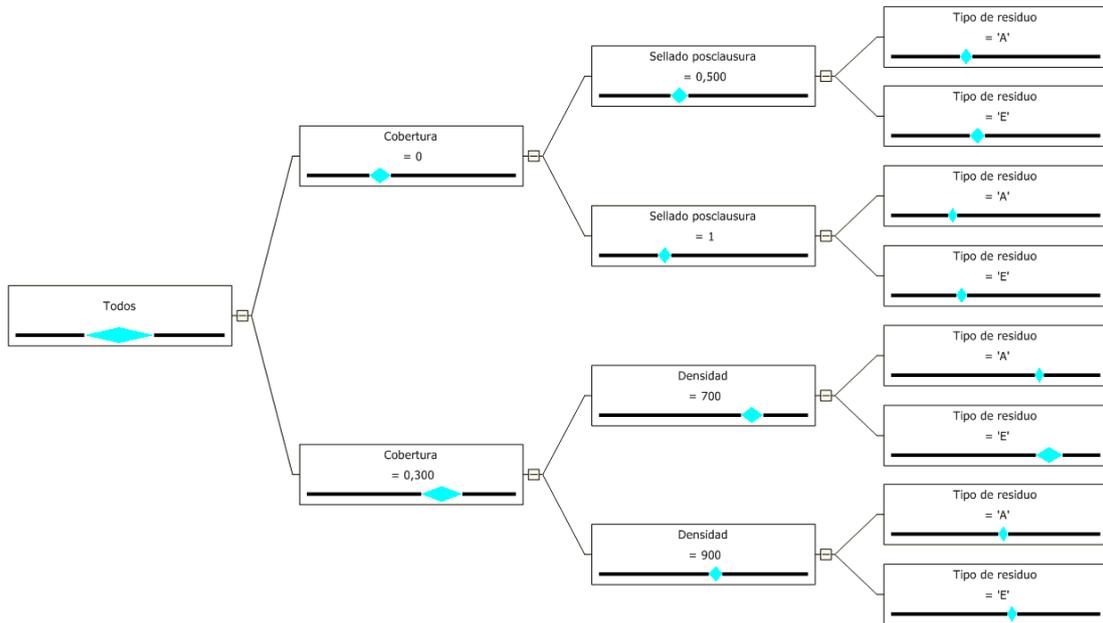


Ilustración 111. Árbol de decisión HumedadFinal.

