



Facultad de Ciencias

Aplicación de la computación de altas prestaciones a la modelización de un embalse

(Application of high-performance computing to the modeling of a water reservoir)

**Trabajo de Fin de Máster
para acceder al**

**MÁSTER EN FÍSICA, INSTRUMENTACIÓN Y MEDIO
AMBIENTE**

Autor: Daniel García Díaz

Director: Jesús Marco de Lucas

Co-Director: Fernando Aguilar Gómez

Octubre 2017

En primer lugar, gracias a Jesús Marco de Lucas, por su atención y esfuerzo durante la elaboración del TFM, pero también por enseñarme día a día a ser mejor profesional. También a Fernando Aguilar, por toda su atención, pero sobre todo, por aguantar siempre con buen carácter todas mis dudas e interrupciones. También he de agradecer a la empresa Ecohydros la oportunidad de colaborar en este proyecto.

A mis padres y a mis hermanos una vez más, por mi educación personal y sobre todo, por ser siempre el modelo en el que fijarme. A mis abuelos, por marcarme sin quererlo el camino a seguir. A Roció, por su cariño y su apoyo incondicional, pues ella es quien más me sufre. A Antonio, porque sin él este camino no habrían sido el mismo.

Finalmente agradecer la oportunidad proporcionada por el contrato del programa de Garantía Juvenil del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, Secretaria de Estado de Investigación, Desarrollo e Innovación, a través de la Universidad de Cantabria, con el apoyo del Fondo Social Europeo.

Contenido

Resumen	4
Abstract	5
1- Introducción	6
1.1 – Embalse de la Cuerda del Pozo	6
1.2 – Sistemas de Monitorización	8
1.2.1 - Instrumentación	8
• <i>Sensores en la plataforma</i>	8
• <i>Jaula con sensores submarinos</i>	9
1.2.2 – Software y Base de Datos	9
• <i>Base de Datos</i>	9
• <i>Software; Labview</i>	10
1.3 - Modelado hidrodinámico y termodinámico. Delft Hydraulics	12
1.3.1 – Malla de simulación, GRID	13
• <i>Grid Horizontal</i>	14
• <i>Grid Vertical</i>	14
1.3.2 - Ecuaciones hidrodinámicas; Delft3D-Flow	15
• <i>Ecuaciones de Navier-Stokes</i>	16
• <i>Ecuación de Continuidad</i>	17
• <i>Ecuaciones de Transporte</i>	17
1.3.3 - Inputs	18
• <i>Periodo de la simulación</i>	18
• <i>Condiciones iniciales</i>	19
• <i>Afluentes y Descargas</i>	19
• <i>Viento</i>	20
• <i>Radiación</i>	20
• <i>Parámetros físicos</i>	21
1.3.4 – Resultados del modelo	21
1.4 – Sistemas de Computación empleados	22
1.4.1 – Supercomputador Altamira	22
1.4.2 – Cloud	23
2 – Configuración y Validación del Modelo	24
2.1 – Nivel o Cota del embalse	25
2.2 – Simulación térmica	27
2.2.1 – Temperatura por capas	27
2.2.2 – Estratificación Térmica	35
2.3 – Computación	44
3 - Conclusiones	45
4- Bibliografía	46

Resumen

En esta tesis de Master se presenta el trabajo realizado para la monitorización en remoto del embalse de Cuerda del Pozo, Soria, y su posterior modelización hidrodinámica y termodinámica para los años 2014 y 2015, mediante un software 3D especializado, *Delft3D*. Para ello se ha contado con diferentes recursos tanto de instrumentación de medida como de computación, los cuales se explican en los diferentes apartados del trabajo.

Los principales objetivos propuestos son, la configuración del modelo hidrodinámico *Delft3D-Flow* para las características particulares del embalse de Cuerda del Pozo, para realizar después la modelización de las condiciones hidrotérmicas del mismo, y la computación del modelo en diferentes sistemas de computación de alto rendimiento como el supercomputador Altamira y el entorno de computación Cloud del proyecto INDIGO-DataCloud, ejecutando en ambos casos un barrido paramétrico: ejecutando en paralelo diferentes configuraciones del modelo, con el fin de determinar además si ambos sistemas satisfacen los requerimientos necesarios en términos de eficiencia y facilidad de uso.

El planteamiento de estos objetivos principales obliga a la realización de un tercero sin el cual no serían viables los dos anteriores, y es que la diversidad de datos necesarios para la configuración del modelo y para la posterior validación de los resultados, fuerzan al diseño y al mantenimiento de una infraestructura de adquisición y almacenamiento de datos para la monitorización en remoto del embalse y de las condiciones climatológicas ambientales.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo es capaz de estimar el balance entre las aportaciones hídricas al embalse, las descargas diarias de agua por la presa y la evapotranspiración producida en el periodo simulado y, por lo tanto, de reproducir el nivel de agua embalsado. En las simulaciones realizadas para 2015 se ha obtenido una diferencia entre la cota medida y la cota estimada inferior a 1 metro. Se ha comprobado, además, que el modelo reproduce correctamente la temperatura en las diferentes capas de la columna vertical de agua a lo largo del periodo de simulación, y también el proceso estacional de estratificación térmica: representa correctamente la curva reflejada por los perfiles térmicos y la profundidad a la que se sitúa la termoclina o metalimnion.

En cuanto a la experiencia con los dos sistemas de computación utilizados, aunque el supercomputador permite completar una simulación en casi la mitad de tiempo, la flexibilidad y coste de la solución Cloud, así como la incorporación de un interfaz más amigable, hacen que sea una opción muy interesante.

Keywords: modelización, monitorización, Delft-3D, hidrodinámica, embalse, supercomputador, Cloud

Abstract

This Master's thesis presents the work carried out for the remote monitoring of the Cuerda del Pozo reservoir, Soria, and its subsequent hydrodynamic and thermodynamic modeling for the years 2014 and 2015, using a specialized 3D software, *Delft3D*. Many different resources have been used in both instrumentation and computation, which are explained in the different sections of the paper.

The main objectives proposed are the calibration of the hydrodynamic model, *Delft3D-Flow*, to the particular characteristics of the Cuerda del Pozo reservoir, and the computation of the model in different high-performance computing systems such as the Altamira supercomputer and a Cloud computing platform (corresponding to the INDIGO DataCloud project). The modeling of the hydrothermal conditions of the years 2014 and 2015 has been carried out by executing a script that performs a parametric sweep and launches different simulations that are computed in parallel.

These main objectives require the realization of a third one without which the two previous ones would not be possible. The great demand of data necessary for the configuration of the model and for the later validation of the results, force to the design and maintenance of an infrastructure for data acquisition and storage for the remote monitoring of the reservoir and environmental conditions.

The results obtained show that the model is able to model the balance between the water contributions to the reservoir, the daily discharges of water by the dam and the evaporation produced in the simulated period and, therefore, to reproduce the level of water. In the simulations carried out for 2015, a difference between the measured dimension and the estimated quota of less than 1 meter was obtained. It has also been verified that the model correctly reproduces the temperature in the different layers of the vertical column of water throughout the period of simulation, and the seasonal process of thermal stratification; in which the model correctly represents the shape drawn by the thermal profiles and the depth to which the thermocline or metalimnion is located.

As for the computer systems used, given the complexity of data management to the model, its calibration and its validation, several simulations have been performed in HPC (High Performance Computing) and Cloud computing environments to determine if they are user friendly and intuitive, as well as to determine their performance.

Keywords: Modeling, Monitoring, Delft-3D, Hydrodynamic, Water Reservoir, Supercomputer, Cloud

1- Introducción

La eutrofización, proceso mediante el cual el agua de los embalses sufre un incremento de su biomasa debido a un exceso de nutrientes, provocando así la alteración severa del ecosistema, que puede llegar a episodios como la proliferación masiva de cianobacterias potencialmente tóxicas, es un problema ambiental vigente y con una tendencia negativa por su empeoramiento y propagación debido al cambio climático. En España, más del 50% de los embalses (alrededor de 1200) se encuentran en estado de eutrofización, estando además cerca del 25% de estos, dominados por la presencia de cianobacterias [1].

Dos de los factores clave que rigen la calidad de estas grandes masas de agua son la hidrodinámica y la termodinámica. En este trabajo, se resume la infraestructura desplegada y el trabajo realizado para la monitorización y modelización de estos dos factores claves en el embalse de Cuerda del Pozo, Vinuesa, Soria.

La relevancia de los problemas desarrollados hace que, este trabajo en sus diferentes etapas, se haya apoyado en diferentes proyectos de investigación en los que se encuentra involucrado el grupo de computación avanzada y e-Ciencia del IFCA (Instituto de Física de Cantabria) tales como las iniciativas de la ESFRI LifeWatch (e-Infraestructura para la Investigación y la Gestión de la Biodiversidad - <http://www.lifewatch.eu>), una infraestructura de e-ciencia y tecnología de investigación para datos y observatorios relacionados con la biodiversidad, o el proyecto DORII (Deployment of Remote Instrumentation Infrastructure), dentro del cual se desarrolló la infraestructura diseñada para la adquisición y almacenamiento de los datos. Además, gran parte del trabajo se enmarca dentro del proyecto ROEM+, el cual estudia la eutrofización en los embalses españoles. Además, la parte computacional se enmarca en los ejemplos de uso de las soluciones de servicios Cloud para comunidades de investigación del proyecto H2020 INDIGO DataCloud.

Durante el proyecto, además de trabajar con diferentes sistemas de computación de alto rendimiento como son el supercomputador Altamira y el entorno de computación en Cloud, la infraestructura desplegada para la adquisición de datos ha supuesto un complejo reto debido al manejo de muy diversa instrumentación de medida y por el diseño de los módulos de Labview para la toma de datos en remoto. También se han empleado diferentes test estadísticos para la validación de los resultados, y se han utilizado diferentes lenguajes de programación como pueden ser, Python y Fortran.

1.1 – Embalse de la Cuerda del Pozo

El embalse de La Cuerda del Pozo, construido en el curso del río Duero, se encuentra situado en el término municipal de Vinuesa, en la provincia de Soria, Comunidad Autónoma de Castilla y León y es, junto al de Los Rábanos, uno de los dos que regulan el Duero en su cabecera.

La construcción del embalse fue aprobada en 1923, terminándose su construcción en 1941 y fue inaugurado el 9 de septiembre de ese mismo año. Con una capacidad de 230 millones de metros cúbicos, se sitúa entre los seis más grandes de esta cuenca hidrográfica. Tiene una extensión de 2176 Ha en su nivel máximo y una profundidad media de 10 m y máxima de 36 m cuando esta al máximo de su capacidad. Cuenta con 5 afluentes, Duero, Remonico, Revinuesa, Dehesa y Bajero, siendo el Duero el principal y más importante de ellos con un aporte promedio en torno a los 5 m³/s [2].

A continuación, se muestra una imagen del embalse de Cuerda del Pozo obtenida con el satélite Sentinel-2.

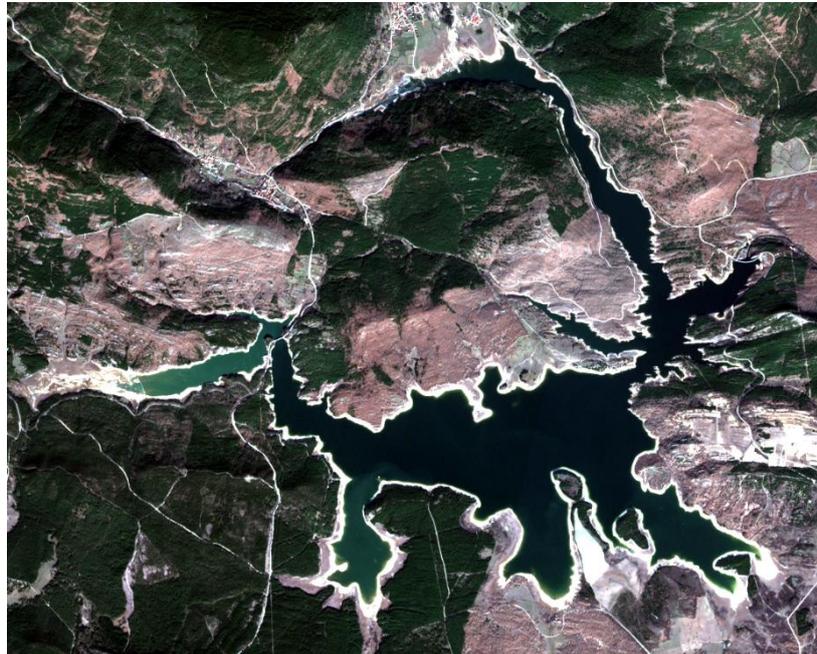


Figura 1: Imagen del embalse de Cuerda del Pozo obtenida con el satélite Sentinel-2, satélite de la ESA (European Space Agency), el 19/01/2017.

Por otro lado, la presa de Cuerda del Pozo tiene una altura de 36 m. y una longitud de 425 m. Cuenta con dos desagües situados aproximadamente en el centro de la presa, uno intermedio, situado aproximadamente a unos 19 metros de la parte alta de la presa y con una capacidad máxima de 13,7 m³/s, y otro de fondo, con una capacidad máxima de 15,2 m³/s. Además, cuenta con un aliviadero en la parte izquierda. En la siguiente imagen se puede ver un esquema de la planta y del perfil de la presa.



Figura 2: Esquema de la presa vista de perfil y de planta. [3]

1.2 – Sistemas de Monitorización

Con el fin de recopilar todos los datos necesarios para alimentar el modelo, y para realizar después la validación de los resultados obtenidos en las simulaciones, se han utilizado los datos de una plataforma situada en el embalse equipada con una infraestructura que puede obtener y almacenar datos relacionados con la calidad del agua y el medio ambiente a lo largo del día, con la frecuencia de muestreo deseada. Esta plataforma se instaló inicialmente en el proyecto europeo FP7 DORII, en colaboración directa con la PYME Ecohydros SL, consultora ambiental, y ha permanecido en operación desde entonces, gracias a las sucesivas mejoras incluidas, algunas de las cuales se describen en este trabajo.

Además de los diferentes sensores de medición, la plataforma cuenta con un ordenador, y se diseñaron, gracias al lenguaje de programación gráfica de Labview, diferentes programas capaces de recoger los datos tomados por los sensores y enviarlos mediante conexión remota a una base de datos situada en un servidor de IFCA.

1.2.1 - Instrumentación

El sistema consiste en una plataforma situada en el embalse que tiene una “jaula” con diferentes sensores ópticos, dos espectrómetros, una sonda CTD y tres fluorímetros para el análisis de sustancias químicas, colgando dentro del agua y sujeto por un motor que permite subirlo y bajarlo en profundidad, con el objetivo de realizar perfiles en la columna de agua. Así mismo, en el exterior existe otro espectrómetro que va conectado al mismo datalogger que todos los sensores bajo el agua, TriBox. Para completar el sistema, existe un radiómetro neto CNR2 (calcula la diferencia energética entre la radiación incidente y la reflejada por la superficie), que dispone de su propio datalogger, LogBox, una estación meteorológica y un GPS, ambos con salida directa USB.

Todos los dataloggers/sensores están conectados a un PC embebido que, a través de una aplicación de Labview lee los datos y los guarda en una base de datos de forma remota. Al mismo tiempo los programas Labview de adquisición de datos crean un archivo XML por sensor, creando así una copia de seguridad de los datos, por si la conexión remota de la plataforma fallase.

Los sensores se describen a continuación:

- *Sensores en la plataforma*

- Estación Meteorológica: VAISALA WXT-520, mide la presión barométrica, la humedad, la precipitación, la temperatura y la velocidad y dirección del viento. Para medir la velocidad y la dirección del viento, el WXT520 utiliza ultrasonidos para determinar la velocidad y la dirección del viento horizontal. La medición de la precipitación se basa en un sensor que detecta el impacto de las gotas de lluvia individuales. La estación meteorológica es leída por el sistema DAQ a través de la interfaz serie USB.

- Radiómetro: CNR2, mide la radiación neta en vatios por metro cuadrado. Mide el balance de energía entre la radiación infrarroja entrante de onda corta y onda larga frente a la radiación infrarroja saliente de onda corta y de onda larga reflejada en la superficie. El radiómetro de red CNR2 consiste en un par de piranómetros y pirgeómetros que miran hacia arriba y un par complementario que mira hacia abajo.

- Ecosonda: diseñado para medir con precisión la intensidad de las señales devueltas en la columna de agua, puede trabajar en modo de Ecosonda o en modo de Altímetro.

- *Jaula con sensores submarinos*

- CTD60M-Sonda: sonda de precisión para mediciones oceanográficas y limnológicas de parámetros físicos, químicos y ópticos hasta una profundidad de 2000 m. Permite medir simultáneamente los siguientes parámetros: Presión (profundidad), temperatura, conductividad, O₂ bruto, REDOX, oxígeno disuelto, pH, saturación de oxígeno, salinidad. Los datos están disponibles como señal RS 232.

- TriOS, sensores ópticos: La familia microFlu consiste en fluorímetros sumergibles miniaturizados para medidas de alta precisión y fluorescencia selectiva, por ejemplo, ficocianina en ciano-bacterias, CDOM y clorofila.

- Radiómetros hiperespectrales: RAMSES-ACC es un radiómetro hiperespectral altamente integrado para el espectro UV y / o VIS.

1.2.2 – Software y Base de Datos

- *Base de Datos*

Para poder almacenar todos los valores medidos con un mínimo de garantía de calidad, y para poder realizar consultas de los datos de forma ágil y sencilla, se ha desarrollado un sistema de dos bases de datos relacionales alojadas en un servidor MySQL: una base de datos para datos sin procesar y otra para datos curados.

La base de datos “Raw” o en crudo, almacena todos los datos tomados por los sensores, aunque estos sean datos incorrectos, mientras que la base de datos procesada sólo almacena los datos que han sido filtrados y curados por algunos scripts de calidad.

Las bases de datos relacionales tienen un esquema basado en tablas, como se ve en la figura 3, y en este caso la mejor solución para crear dichas tablas fue relacionar los parámetros a almacenar en términos de sensores de los cuales provienen.

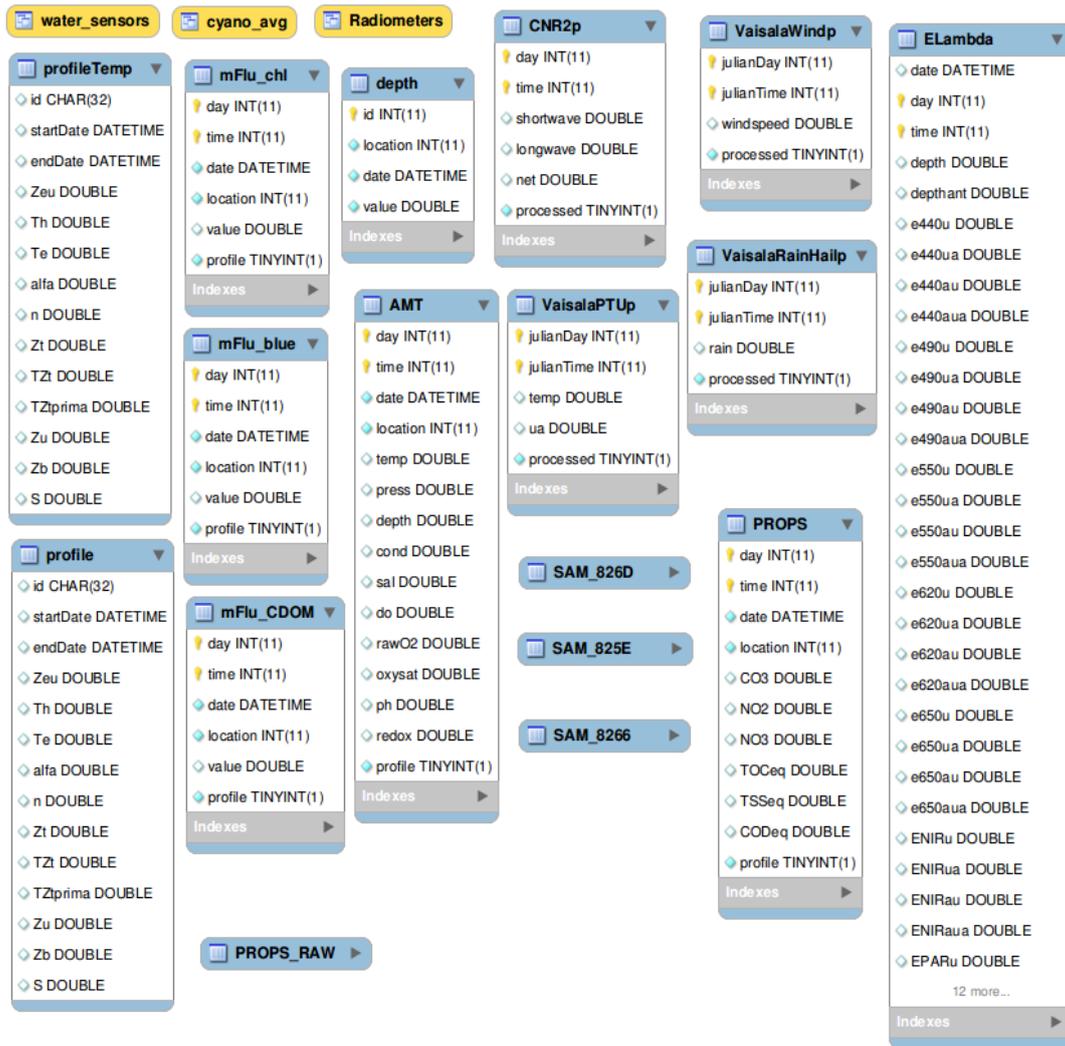


Figura 3: Esquema de las tablas que componen una de las dos bases de datos utilizadas.

- *Software; Labview*

Destinado a la adquisición de los datos de los sensores, se diseñó el proyecto “Estación_presa” con el lenguaje de programación gráfica de Labview. El proyecto se organiza a razón de una carpeta, y por tanto un programa (VIs o Virtual Instruments, como se denomina a los archivos de Labview) de adquisición de datos, para cada sensor.

Todos los VI de adquisición de datos están pensados como máquinas de estado, lo cual quiere decir que existen variables de control compartidas, las cuales pueden tomar los valores 0, estado “Run”, 1, estado “Standby” y 2, estado “Stop”. Los Vis “WS_Run.vi”, “WS_Standby.vi” y “WS_Stop.vi” son los que se encargan de cambiar los estados.

A continuación se describen todos los VIs que componen el proyecto de Labview y su funcionalidad.

- DB: Invocado al comienzo de cada VI de adquisición de datos, la función del SubVI “DB_Initialize Variables.vi” es la de inicializar las variables de acceso a la base de datos con los valores preasignados. Todos los VI de adquisición de datos también invocan otro SubVI “DataIntoDB.vi” que proceden a la escritura de los datos en la base de datos.

- XML: Paralelamente a la escritura en la base de datos, todos los VI de adquisición de datos recogen en arrays los datos tomados e invocan el SubVI “XMLTriosFile.vi” que gestiona el array y escribe un archivo .xml de acuerdo con la estructura de la base de datos, a modo de backup.

- GPS: El VI “Read_GPS” que realiza la lectura de las sentencias NMEA del GPS, establece conexión con el puerto indicado en el control “Puerto VISA” y va leyendo las sentencias NMEA del GPS hasta que recibe una del tipo GGA, de la que extrae los datos de latitud, longitud, fecha, hora, número de satélites que se están utilizando y HDOP.

La siguiente figura muestra la interfaz de usuario del módulo de adquisición de datos diseñado para el GPS.

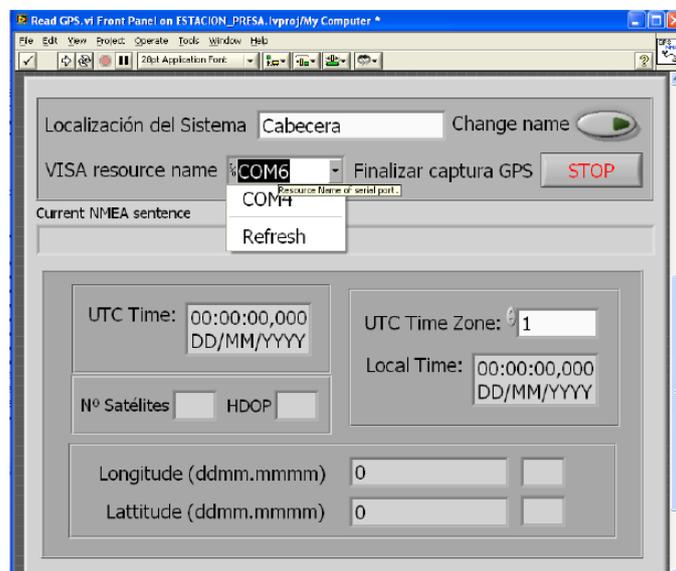


Figura 4: Interfaz de usuario de la aplicación de adquisición de datos diseñada para el GPS.

- KIPP&ZONEN: Contiene dos VI principales: “LogBox_DAQ”, el programa de adquisición de datos de los radiómetros de onda larga y corta a través del datalogger Logbox, y “LogBox_Settings”, fija la frecuencia de muestreo con la que se desea medir.

El programa de adquisición de datos establece conexión con el puerto y envía una orden al datalogger a la cual responde con el estado del dispositivo. Esto sirve para crear la variable “Data_LogBoxStatus” y después comienza a leer las sentencias de datos de acuerdo con la frecuencia de muestreo fijada.

- TRIOS: Al igual que en el caso del radiómetro neto de Kipp&Zonen, para los sensores gestionados desde la TriBox (datalogger de TriOs) disponemos de dos VI, uno para adquisición de datos propiamente dicho y otro para regulación de los parámetros internos de los sensores, como las frecuencias de muestreos, “TriOS.vi” y “TriOS_Settings.vi” respectivamente.

Todos los sensores ópticos de TriOs, así como la sonda CTD están conectados a la TriBox, que a su vez se conecta al ordenador portátil directamente con un cable crossover ethernet. El protocolo de comunicaciones utilizado es Modbus Ethernet, cuyos estándares están disponibles de forma abierta.

Así pues, la VI “TriOS.vi” se encarga de abrir la conexión TCP de acuerdo con la IP de la TriBox y hacer una lectura de los registros correspondientes a cada sensor. Existe un subVI para la lectura de cada sensor, “TriBox_Read_mFlu.vi”, “TriBox_Read_SAM.vi”, “TriBox_Read_ProPS.vi”, “TriBox_Read_LSA.vi”, “TriBox_Read_AMT.vi”, y se muestran en pantalla los valores de los diferentes sensores.

- VAISALA: La estación meteorológica utilizada tiene una interfaz “USB ASCII automatic”, es decir, los sensores envían mensajes de datos de forma automática con la frecuencia definida por el usuario, con un protocolo de comunicaciones y mensajes de datos propios. Así pues, de acuerdo con este lenguaje propio de comunicación, el VI “Vaisala_DAQ.vi” establece la comunicación con el puerto USB indicado y lo primero pregunta la configuración del instrumento, datos que almacena en una variable, y después se dedica a leer el puerto e ir interpretando los mensajes de los datos, extrayendo los valores de cada parámetro y sus unidades, mostrándolos en pantalla. Al igual que ocurría con el resto de los instrumentos, el VI “Vaisala_Settings.vi” cambia la configuración del sensor.

- Wincher: El VI “wincher.vi” se encarga de establecer la conexión con el puerto USB y realiza una primera lectura del estado del motor y de la profundidad a la que se encuentra la jaula con los sensores. Después se queda esperando que se le mande una acción.

La pestaña “Profile” ejecuta un perfil de forma automática, indicando solo la profundidad a la que se quiere iniciar, la profundidad a la que se quiere terminar, el paso en profundidad y el tiempo que se quiere estar midiendo a cada profundidad.

- SubVIs: Los últimos Vis que quedan por describir son los SubVIs, y su función es precisamente esa, subfunciones que, no siendo específicas de ningún instrumento, son llamadas desde distintos Vis principales. Estos SubVis se encargan de funciones del tipo, cerrar los puertos de comunicación, limpiar los string recibidos por los sensores, establecer y sincronizar fecha y hora, etc.

- Librerías: Se han mencionado varias veces diversas variables o variables compartidas. Estas variables son usadas por Labview para compartir valores entre los diferentes Vis. Así pues, en el proyecto existen distintas librerías donde se almacenan distintas variables utilizadas.

El sistema completo ha sido mantenido y actualizado en los últimos años a través de diferentes contratos, incluyendo el que ha posibilitado este trabajo de fin de master (ver agradecimientos).

1.3 - Modelado hidrodinámico y termodinámico. Delft Hydraulics

Si bien existen muchos modelos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales que pueden simular de forma más o menos precisa las condiciones hidrodinámicas y termodinámicas de un embalse, el especial interés del proyecto en la estratificación térmica vertical de la masa de agua, hace que la familia de modelos *Delft Hydraulics* y en concreto *Delft3D-FLOW* sean los más indicados. El sistema de modelado denominado como Z, diseñado especialmente para tener en cuenta los procesos de difusión vertical, permite generar una rejilla paralela a las capas isopícnas (de igual densidad) y obtener así una mayor precisión vertical en las simulaciones.

Además, las formulaciones matemáticas incluidas en el modelo también permiten tener en cuenta fenómenos físicos necesarios para una correcta modelización tales como: [4]

- Agua con densidad variable.
- Gradientes horizontales de densidad en la presión.
- El efecto de la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis).
- Transporte de sal, calor y otros componentes conservadores.
- Espacio y tiempo que varían la presión atmosférica sobre la superficie del agua.
- Etc.

A continuación, se muestra una tabla de símbolos utilizados a lo largo de este apartado, con el fin de mostrar todos los términos que se van a utilizar:

Símbolo	Unidades	Descripción
D	m	Profundidad del agua por debajo del plano horizontal de referencia.
Q		pérdidas de agua en el embalse por unidad de área
ρ	Kg/m ³	densidad
E	m/s	Evaporación
G	m/s ²	Gravedad
P	Kg/ms ²	Presión hidrostática
u, v	m/s	Velocidades horizontales
ω	m/s	Velocidad vertical
ξ	m	Nivel del agua sobre el plano de referencia horizontal
$H=d+\xi$	m	Profundidad total
t	s	Tiempo
F		Fuerza de Coriolis
V_v		Coefficiente de viscosidad vertical
q_{in}, q_{out}	l/s	Afluentes y sumideros de agua del embalse
P		Precipitación
F_u, F_v		Términos de viscosidad horizontales
P_u, P_v	Kg/m ² s ²	Términos de presión horizontales
$\Delta x, \Delta y$		Espacio de las cuadrículas de GRID

Tabla 1: Lista de símbolos que aparecen en las ecuaciones del modelo Delft3D.

Ref: [4]

1.3.1 – Malla de simulación

El primer paso para modelar la hidrodinámica y la termodinámica de la masa de agua es definir una malla o “grid” que se ajuste a las características geográficas de esta. Para ello la familia de modelos de *Delft Hydraulics* dispone de la herramienta, RGFGRID, cuyo propósito es el de crear, modificar y visualizar las cuadrículas ortogonales y curvilíneas que luego se van a utilizar en el módulo *Delft3D-FLOW*.

- *Grid Horizontal*

Para el modelado, el dominio físico horizontal está cubierto por una cuadrícula ortogonal, diseñada para la optimización del coste computacional. Las rejillas se aplican en modelos de diferencias finitas para proporcionar una alta resolución de cuadrícula en áreas de mayor interés, y una baja resolución en otras partes, permitiendo ahorrar así en el coste de computación a la hora de las simulaciones. Por último, las cuadrículas tienen que ser ortogonales, ya que ahorra muchos términos de transformación a la hora de introducir la rejilla en el módulo *Delft3D-FLOW* computacionalmente costosos.

Atendiendo al caso de estudio del proyecto, se ejecutaron diferentes pruebas con resoluciones de celda que iban desde los 5x5m hasta los 200x200m, para finalmente escoger una rejilla adecuada tanto para tener una buena resolución numérica como para que el coste computacional no sea extremadamente elevado. Se han aplicado finalmente celdas de 40x40m en planta, resultando así una malla de 122x95 celdas, como se puede ver en la siguiente imagen.

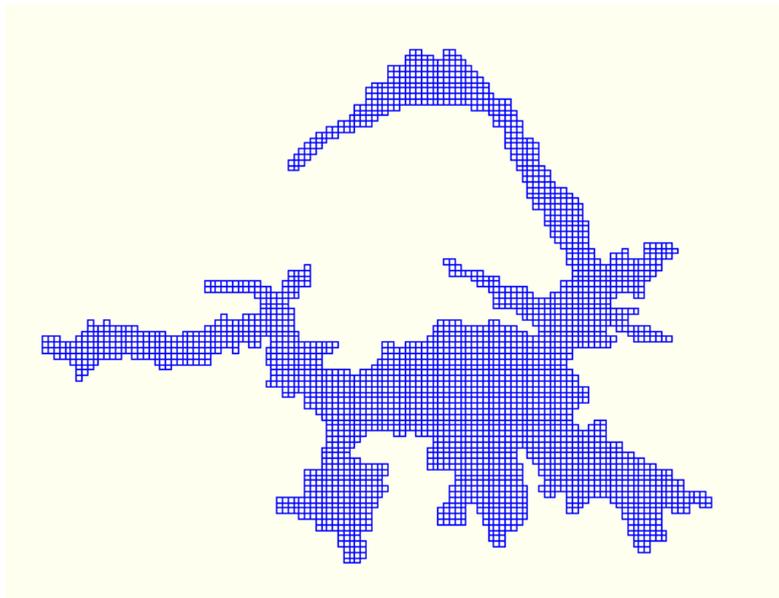


Figura 5: Imagen en planta de la malla generada con el módulo Delft3D-RGFGRID para el embalse de Cuerda del Pozo.

- *Grid Vertical*

En cuanto a las capas verticales, debido a la importancia de la estratificación térmica de la masa de agua, el modelado numérico de la hidrodinámica requiere un tratamiento preciso de los procesos de intercambio vertical ya que la existencia de este fenómeno, influye en el intercambio turbulento del momento, calor, salinidad, etc.

Los métodos disponibles en el módulo *Delft* para generar la rejilla vertical son el sistema de mallado Z, y el denominado sistema de mallado σ . Se representa un esquema de ambos en la figura 6.

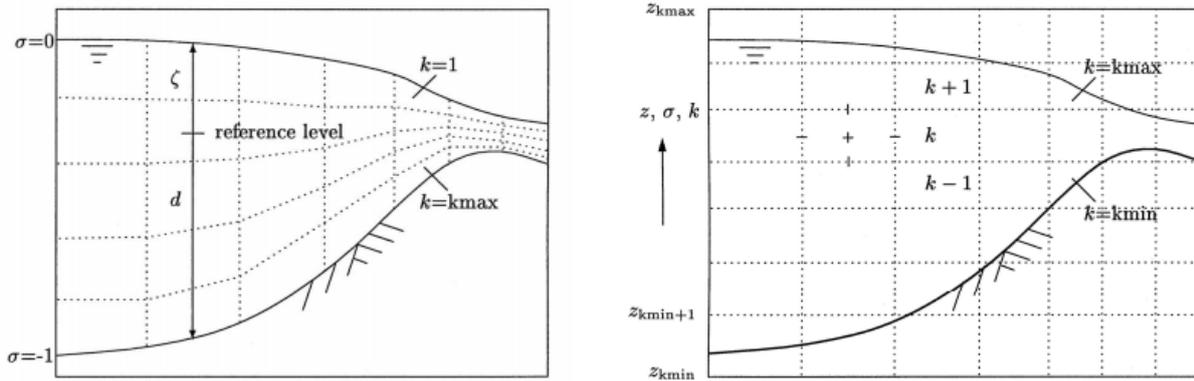


Figura 6: Esquema del modelo de mallado σ a la izq. Esquema del modelo de mallado vertical Z a la derecha. [5]

Aunque ambos métodos tienen algunas limitaciones, ya que el sistema de mallado Z se representa en el fondo como un sistema de escaleras que conduce a inexactitudes en la modelización del lecho y en el sistema de mallado σ , las líneas de las rejillas no son paralelas a las capas isopícnas, en el caso de abordar problemas de flujo estratificado en estuarios, lagos, embalse, etc., donde una topografía escarpada es una característica dominante del terreno, el modelo más apropiado es el de mallado Z, ya que el proceso de intercambio vertical no debe estar dominado por errores de truncamiento.

Para el caso de Cuerda del Pozo, se escogió, por tanto, el sistema de mallado vertical Z con una resolución de 1m, para una profundidad máxima en el embalse de 35m. El mallado vertical del embalse se generó a partir de un mapa de elevaciones del terreno.

1.3.2 - Ecuaciones hidrodinámicas

El propósito principal del modelo computacional *Delft3D-FLOW* es resolver varias ecuaciones diferenciales no lineales, dependientes del tiempo y de las tres dimensiones, relacionadas con problemas de flujo superficial libre hidrostático y no hidrostático sobre una rejilla ortogonal.

La mayoría de los modelos hidrodinámicos se basan en ecuaciones para aguas superficiales, las cuales se derivan de las ecuaciones de Navier-Stokes bajo condiciones de agua poco profunda, para un fluido incompresible. Sin embargo, para poder aplicar estas condiciones, hay que realizar la aproximación de que la profundidad vertical de la masa de agua es mucho menor que la escala de longitud horizontal, en cuyo caso, la ecuación de momento vertical se reduce a la relación de presión hidrostática, lo que supone que las aceleraciones verticales son pequeñas en comparación con la aceleración gravitatoria y por lo tanto despreciables.

En los mares costeros, lagos o embalses, donde el flujo estratificado se produce en combinación con la topografía escarpada del terreno, la aceleración vertical no puede ser despreciada, y la componente de presión no hidrostática pasa a ser importante. *Delft3D-FLOW* se puede utilizar tanto en modo hidrostático como en modo no hidrostático, añadiendo en este último los términos no hidrostáticos a las ecuaciones de aguas poco profundas.

Las ecuaciones principales resueltas en el modelo son descripciones matemáticas de las leyes de conservación de la física, como son [6]:

Ecuación de continuidad para el volumen del agua.

Ecuación de Navier-Stokes promediada por Reynolds para los momentos lineales

Ecuación de transporte para los flujos de sustancias disueltas, salinidad, temperatura, etc.

A continuación, se detallan cada una de estas ecuaciones:

- *Ecuaciones de Navier-Stokes*

Las ecuaciones que describen los flujos de agua en una superficie libre pueden derivarse de las ecuaciones de Navier-Stokes después de calcular el promedio sobre las escalas temporales de turbulencia (promedio de Reynolds). Tales ecuaciones expresan matemáticamente, el principio físico de la conservación del volumen, la masa y el momento.

En su forma no hidrostática estas ecuaciones pueden representarse como (por conveniencia, las ecuaciones se expresan en coordenadas cartesianas):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = \frac{-1}{\rho} P_u + F_u - \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{1}{(d+\xi)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(V_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = \frac{-1}{\rho} P_v + F_v - \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{1}{(d+\xi)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(V_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{-1}{\rho} P_w + F_w - \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{1}{(d+\xi)^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(V_V \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Donde $F_u = \nu_H \left| \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right|$; $F_v = \nu_H \left| \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right|$; $F_w = \nu_H \left| \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right|$

Como se puede ver en las ecuaciones, el término de la presión se divide en dos partes, por un lado, la parte hidrostática:

$$\frac{-1}{\rho} P_u$$

y por el otro el termino no hidrostático:

$$\frac{\partial q}{\partial x}$$

- *Ecuación de Continuidad*

Los términos de la velocidad vertical, w , se calculan a partir de la ecuación de continuidad, la cual para fluidos se deduce de la ecuación de conservación de masas (esta ecuación es válida para los dos sistemas de rejilla):

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial[(d+\xi)U]}{\partial x} + \frac{\partial[(d+\xi)V]}{\partial y} = Q \quad (4)$$

Y representada en coordenadas cartesianas se puede expresar en función de los términos de las velocidades horizontales, la profundidad, los niveles de agua y las velocidades verticales:

$$w = \omega + u \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial \xi}{\partial x} \right) + v \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial \xi}{\partial y} \right) + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \xi}{\partial t} \right)$$

Q representa las pérdidas de agua en el embalse por unidad de área, ya sea por contribuciones debido a la descarga, precipitación o evaporación:

$$Q = H \int (q_{in} - q_{out}) d\sigma + P - E$$

- *Ecuaciones de Transporte*

Los flujos en ríos y embalses aplican sustancias disueltas en el agua, y deben considerar la salinidad y la temperatura. En *Delft3D-FLOW* el transporte de materia y calor es modelado por una ecuación de difusión tridimensional que satisface las demandas de: conservación de masas por consistencia con la ecuación de continuidad discreta, monotonía (solución positiva) y exactitud.

Para asegurar que se conserva la masa total, la ecuación de transporte se discretiza con un enfoque de volumen finito de conservación de masa, y para garantizar la monotonía, se utiliza el llamado esquema Van Leer-2 (Van Leer, 1974) para la aproximación de los flujos horizontales [4].

La ecuación de transporte formulada en coordenadas cartesianas viene dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\Delta z_{m,n,k}c)}{\partial t} + \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left\{ \partial_x (uc \Delta y \Delta z_{m,n,k}) + \partial_y (vc \Delta x \Delta z_{m,n,k}) \right\} \\ + (wc)_{m,n,k} - (wc)_{m,n,k-1} = \\ \frac{1}{\Delta x \Delta y} \left\{ \partial_x \left[D_H \Delta y \Delta z_{m,n,k} \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \partial_y \left[D_H \Delta x \Delta z_{m,n,k} \frac{\partial c}{\partial y} \right] \right\} \\ + \left[D_V \frac{\partial c}{\partial z} \right]_{m,n,k} - \left[D_V \frac{\partial c}{\partial z} \right]_{m,n,k-1} - \lambda_d \Delta z_{m,n,k} c + S \end{aligned} \quad (5)$$

El índice de la capa computacional k aumenta en la dirección Z positiva. k_{min} y k_{max} son los índices de las celdas inferior y superior respectivamente.

Por lo tanto, para combinar el transporte horizontal y vertical, se introduce un enfoque basado en un método de pasos fraccionarios y el acoplamiento vertical de las ecuaciones de transporte discretizadas se elimina mediante un algoritmo de doble barrido.

1.3.3 – Datos de entrada

Para ejecutar las simulaciones es necesario alimentar el modelo con toda una serie de datos: condiciones iniciales del embalse, aporte de los afluentes, descargas de agua por la presa, radiación, viento, etc. necesarios para los cálculos que el modelo *Delft3D-Flow* realiza en los procesos antes mencionados.

A continuación, se facilitan los parámetros de configuración y datos de entrada más relevantes:

- *Periodo de la simulación*

En la simulación, el tiempo se determina por el número de pasos de tiempo que ha de realizar, desde la fecha de referencia inicial a la fecha de referencia final. Se define, por tanto, el intervalo temporal en el que se realiza la simulación por un lado, y por otro el paso temporal (en minutos).

Aunque generalmente el paso temporal se define en función de la precisión que se desea obtener, al igual que otros parámetros, este está limitado por varios factores de estabilidad como pueden ser:

Periodo de la simulación	$\Delta t \leq \frac{1}{40} T$
Precisión ADI para geometrías complejas	$C_t = 2\Delta t \sqrt{gH \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} \leq 4\sqrt{2}$
Estabilidad modo baroclinico	$2\Delta t \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gH \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right)} < 1$
Algoritmo de inundación	$\frac{u\Delta t}{\Delta x} < 2$
Estabilidad de viscosidad horizontal	$\Delta t v_H \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} \right) < 1$

Tabla 2: Limitaciones del paso temporal a la hora del cómputo. [5]

Además, el paso temporal también está limitado por la cuadrícula definida en el apartado de GRID mediante el número de Courant- (Friedrichs-Lewy):

$$CFL = \frac{\Delta t \cdot \sqrt{gH}}{\{\Delta x, \Delta y\}}$$

Y en este caso concreto, al utilizar el modelo Z para generar la rejilla en el apartado GRID, se añaden las limitaciones:

$$\Delta t \leq \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\max(|u|, |v|)} \quad \text{y} \quad \Delta t \leq \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho} g H}}$$

En este caso, el periodo de simulación se ha centrado en los meses en los que se produce la estratificación vertical de la masa de agua, de abril a octubre, y el paso temporal de evolución de la simulación se fijó, después de diversos ensayos, en 5 minutos.

- *Condiciones iniciales*

Valores con los que se va a inicializar el computo. Son los valores iniciales de temperatura, salinidad y nivel de agua en el embalse, a fecha del principio de la simulación. Los valores se proporcionan al modelo en un fichero en el que aparecen los valores de estos parámetros para todas las celdas en las que se ha dividido el dominio del embalse. Estos datos se recogieron de perfiles verticales realizados en el embalse para la fecha indicada.

- *Afluentes y Descargas*

Se requiere la localización geográfica de las descargas de los ríos tributarios en el embalse, el caudal (m³/s) que aporta cada uno y temperatura y salinidad del agua. También se necesita el punto (coordenadas geográficas y altura a la que se encuentra) de las compuertas de descarga de presa, así como las descargas diarias que se realizan (m³/s). En la siguiente imagen se puede ver la interfaz de usuario del modelo *Delft3D-Flow*, cuando se están configurando como inputs los afluentes y las descargas.

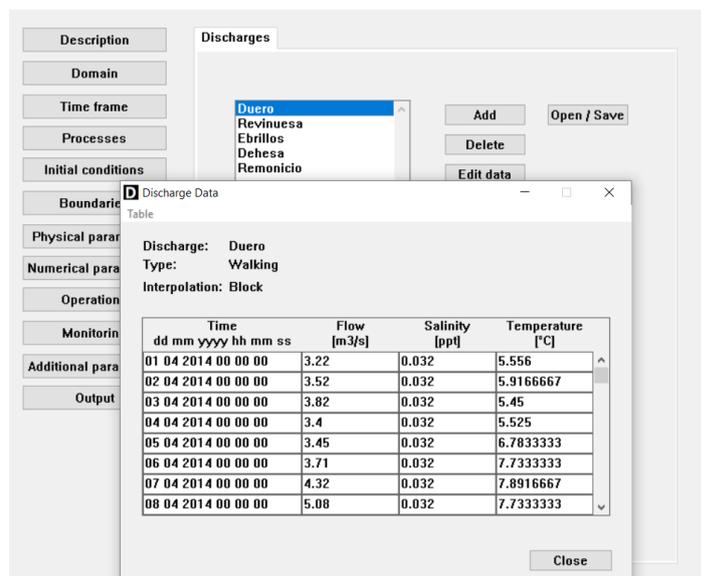


Figura 7: Esquema de los datos de los afluentes aportados al modelo para el caso de Cuerda del Pozo. Imagen obtenida en el proceso de configuración del modelo *Delft3D-Flow*.

Se definieron 5 afluentes situados en sus correspondientes coordenadas geográficas y dos puntos de descarga, situados en el mismo punto, pero a distinta altura. Los datos se aportaron al modelo como promedios diarios durante todo el periodo de simulación.

- *Viento*

Velocidad y dirección del viento en los puntos de dominio del embalse. Se puede generar un mapa completo para todos los puntos del dominio, o bien generar puntos discretos de medida en diferentes posiciones. En este caso, se optó por un modo uniforme generado a partir de las estaciones meteorológicas situadas en el embalse. Los datos se aportaron al modelo en intervalos de 10 min.

- *Radiación*

El proceso *Heat flux model* simula los flujos de intercambio de energía en el modelo *Delft3D-Flow*, los cuales se representan esquemáticamente en la figura 8.

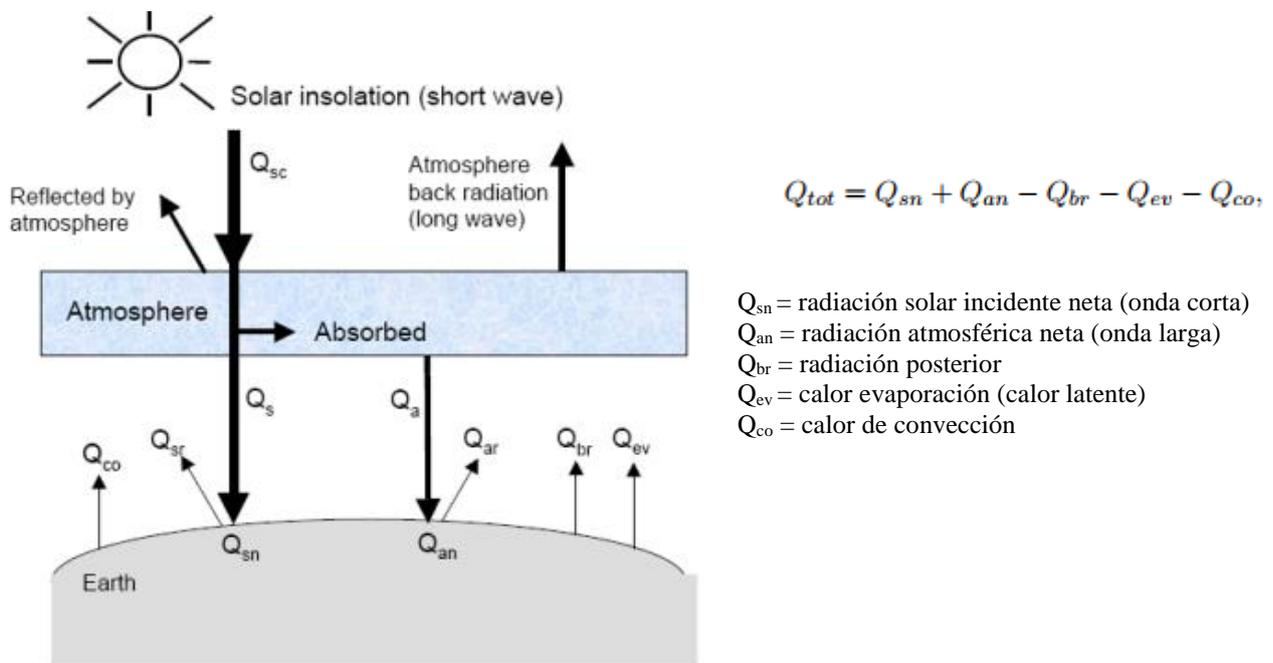


Figura 8: Esquema y ecuación del balance de intercambio de energía en la superficie del agua. [4]

A partir de la radiación incidente, diferenciando incluso entre radiación de onda corta y radiación de onda larga, el módulo Heat Flux model simula los procesos de captación y difusión de la energía y el intercambio de calor con la lámina superficial de agua. Controla también la pérdida de energía debida a la radiación emitida y la evaporación de agua del embalse.

Aunque *Delft3D-FLOW* dispone de varios modelos que pueden calcular estos flujos de calor a través de la superficie de agua, los modelos probados en este proyecto fueron los denominados *Murakami* y *Ocean*. Aunque en ambos casos la radiación y las pérdidas de energía debidas a la evaporación y la convección se calculan mediante el modelo, los parámetros de entrada para cada modo de computo son diferentes. El modelo *Murakami* requiere la radiación solar incidente neta de onda corta y el modelo *Ocean* la fracción del cielo cubierto por las nubes (en %)

Además, los datos que se aportan al modelo para este proceso son la humedad relativa (en %), la temperatura ambiente y la radiación solar. Estos datos se aportan en intervalos horarios durante todo el periodo de simulación.

A continuación, se muestra la interfaz de usuario del modelo, en la pestaña *Heat flux model*.

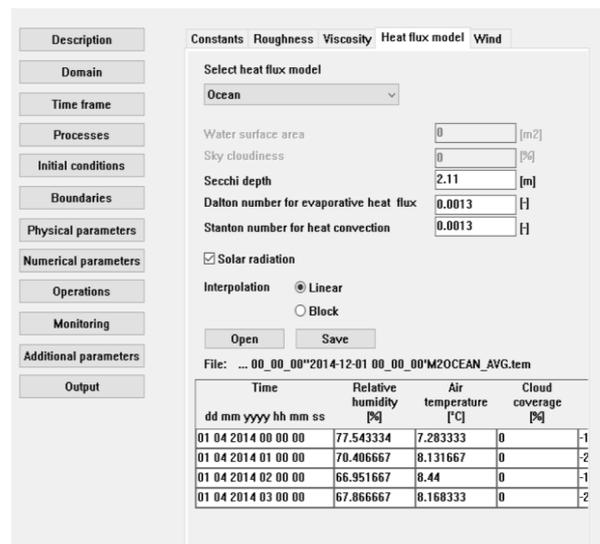


Figura 9: Esquema de los datos de radiación aportados al modelo para el caso de Cuerda del Pozo. Imagen obtenida en el proceso de configuración del modelo Delft3D-Flow.

- *Parámetros físicos*

El modelo también necesita valores de parámetros físicos que se consideran constantes a lo largo de las simulaciones:

- Aceleración de la gravedad
- Densidad del agua y del aire
- Viscosidad y difusividad horizontal y vertical del agua.
- Transparencia del agua (disco de Secchi).

- *Puntos de Monitorización*

También deben definirse los puntos de monitorización, es decir, los puntos de observación de las variables relevantes producidas por el modelo.

1.3.4 – Datos producidos por el modelo

La salida del modelo consta de dos tipos de archivos diferentes. El primero está compuesto de los resultados obtenidos para todas las capas a lo largo de la columna de agua para los puntos de monitorización establecidos en la configuración del modelo. El segundo es un mapa que se compone de todos los resultados de la modelización para todas las cuadrículas en las que se divide el embalse. La resolución temporal de las salidas también se fija inicialmente cuando se configura la simulación del modelo, pudiendo ser desde 1 minuto hasta 24 horas.

En este proyecto se fijaron 4 puntos diferentes de monitorización, 1 en la posición en la que se encuentra la plataforma de medición en el embalse, para poder contrastar los resultados obtenidos con los datos medidos, y 3 más distribuidos en puntos representativos del embalse. Se estableció una resolución temporal de 6 horas, por lo que se obtienen 4 conjuntos de datos al día para cada día de simulación, a las 00:00, 06:00, 12:00, 18:00 h.

1.4 – Sistemas de Computación empleados

Los modelos de alta resolución emplean una simulación compleja, y deben utilizar una infraestructura de computación lo suficientemente potente, normalmente sistemas denominados HPC (High Performance Computing). Además, el ajuste inicial de estos modelos a un determinado sistema requiere múltiples ejecuciones con diferentes configuraciones (diferentes valores de los parámetros). Por ello, y dada la complejidad de la gestión de los datos del modelo, sus requisitos de configuración y su validación, uno de los principales objetivos de este proyecto es determinar si los diferentes entornos HPC, como supercomputadores y sistemas Cloud son fácilmente flexibles, adaptables e intuitivos, además de satisfacer los requerimientos en cuanto a rendimiento esperado.

Con el fin de optimizar el uso de los recursos de computación, se ha utilizado un script que, basándose en un modelo predefinido, realiza un barrido paramétrico lanzando varias simulaciones de forma paralela. El barrido paramétrico implica que los valores de diferentes parámetros de entrada deben cambiarse manteniendo otros fijos, para contrastar configuraciones y la influencia de los mismos.

1.4.1 – Supercomputador Altamira

El supercomputador Altamira se compone de 158 nodos de computación, incluyendo cada uno dos procesadores Intel de 8 núcleos que operan a una velocidad de 2,6 GHz, con memoria cache de 20 MB, 64 GB de memoria RAM y un disco duro local de 500 GB cada uno. Cuenta, además, con conexión de red Infiniband, utilizada tanto para las comunicaciones entre los procesadores como para la transferencia de datos entre nodos.

SLURM, es el administrador de colas que utiliza Altamira para administrar el tráfico de trabajos (“Jobs”) enviados y el procesamiento de estos, por lo que todos los trabajos deben ejecutarse a través de él. Cada “job” se define mediante un archivo de texto que contiene un conjunto de instrucciones o directivas que describen al sistema el trabajo a realizar. Estas directivas aparecen como cabecera en la secuencia de comandos escrita en el archivo de texto y entre ellas se incluyen, por ejemplo, la configuración requerida para el computo del “job” o los comandos para que este se ejecute. Según las necesidades de computo, CPUS, RAM, tiempo de ejecución, etc. requeridas, *SLURM* decide en que nodo se ejecuta según la ocupación de los mismos.

Como se puede ver en la figura 10, algunas de las instrucciones que se puede poner en la secuencia de comandos controlan, por ejemplo, el nombre del archivo de salida en el que se recoge la información del trabajo, el número de procesadores a utilizar o el número de tareas asignadas a cada nodo. A continuación, se muestra un ejemplo de algunas de las directivas de trabajo escritas en el archivo de texto para un trabajo en paralelo:

```
[des]activar nros. de línea
1 #!/bin/bash
2 #@ job_name = test_parallel
3 #@ initialdir = .
4 #@ output = mpi_%j.out
5 #@ error = mpi_%j.err
6 #@ total_tasks = 32
7 #@ wall_clock_limit = 00:02:00
8
9 srun ./parallel_binary
```

Figura 10: Ejemplo de algunas de las directivas escritas en el archivo de texto (o script) que describe el “job”, para ejecutar un trabajo en paralelo. [7]

1.4.2 – Sistemas Cloud

En este punto, el trabajo se apoya en el proyecto INDIGO-DataCloud, (<https://www.indigo-datacloud.eu>) el cual tiene como objetivo desarrollar una plataforma de datos y computación dirigida a comunidades científicas, y en las soluciones que se proponen en él para modelar y monitorizar las simulaciones hidrotérmicas del embalse.

La solución suministrada por INDIGO está orientada a desplegar y calcular un gran número de simulaciones utilizando *Delft3D* sobre un entorno Cloud distribuido y un sistema de almacenamiento distribuido. Para esto se necesita que un conjunto de componentes tales como, instrumentación, gestión de datos, computación, etc. puedan interactuar entre sí.

La arquitectura utilizada por INDIGO, mostrada en forma de esquema en la figura 11, utiliza los siguientes componentes [8]:

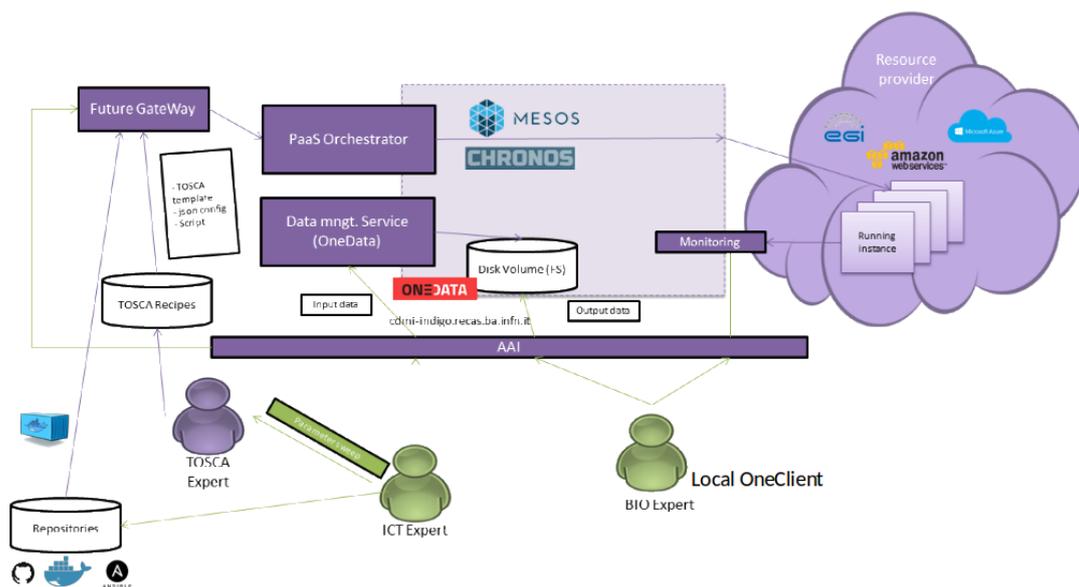


Figura 11: Esquema de la arquitectura utilizada por INDIGO. [8]

- Orchestrator: recibe una solicitud y coordina el despliegue de servicio sobre Mesos. Puede obtener un archivo “docker” de un repositorio para ser desplegado en la infraestructura.
- Mesos & Chronos: Administran el despliegue de las N instancias de ejecución del modelo.
- Supervisión: Estado de las instancias en ejecución.
- Onedata: Sistema de almacenamiento distribuido que permite que tanto el usuario como las instancias en ejecución tengan acceso a los trabajos de entrada y escritura de salida. El espacio de almacenamiento se puede compartir entre diferentes tipos de usuarios.
- AAI: Infraestructura de Autenticación y Autorización. Se utiliza para conceder a los usuarios acceso a los diferentes servicios.

En el entorno de computación Cloud y en las soluciones desarrolladas en el proyecto INDIGO-DataCloud para la computación del modelo *Delft3D* también se puede escoger las características con las que se quiere ejecutar el “job”. A continuación, se muestra uno de los menús desplegables para escoger la configuración de ejecución, basado en la herramienta “*Future Gateway*” como interfaz de usuario, desarrollado dentro del proyecto INDIGO.

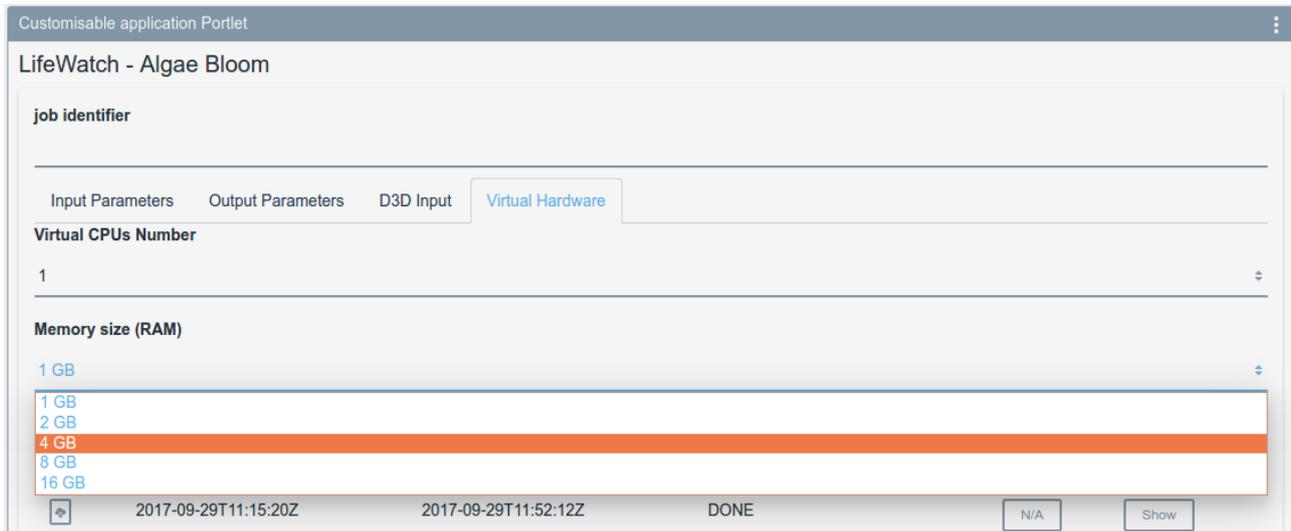


Figura 12: menús desplegables para escoger la configuración de computo, en la plataforma Cloud. [9]

2 – Configuración y Validación del Modelo

La bondad de los resultados obtenidos en las simulaciones está sujeta a diferentes factores que no se limitan sólo a la potencia y calidad del software utilizado en la modelización. La precisión limitada para algunos periodos de tiempo incluidos en las simulaciones de algunas de las medidas tomadas en el embalse y utilizadas en la configuración del modelo, como pueden ser los datos medioambientales o el volumen de las descargas de agua por la presa, también influyen en la calidad de los resultados. Por ello, es fundamental establecer un sistema de validación a través de las medidas in-situ, que pueda dar validez a los resultados obtenidos, además de servir de referencia para corregir en el futuro, errores provenientes de la configuración del modelo o de la incorrecta preparación de los datos utilizados.

La configuración y validación del proceso de simulación incluye dos puntos clave:

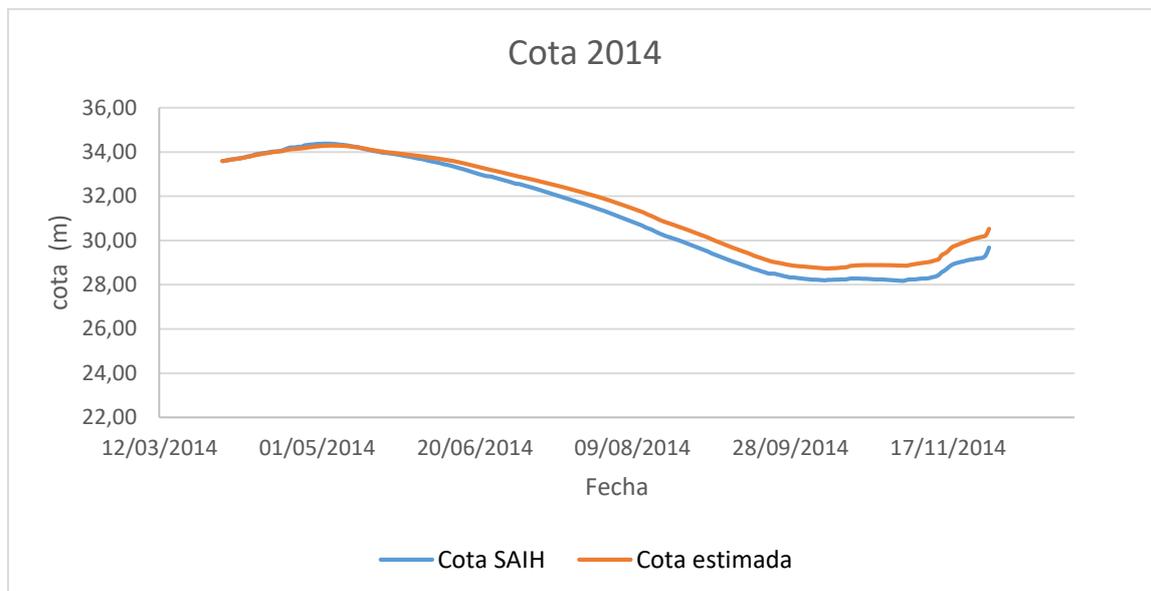
- Por un lado, en cuanto al control de los resultados de la modelización del embalse, se han tomado como datos relevantes a validar, el nivel de agua embalsado y la evolución temporal de la estratificación térmica de las capas de agua. La comparación de estos resultados puede darnos una idea de si funcionan correctamente los procesos de intercambio de energía y transporte incluidos en el modelo *Heat Flux Model*.
- Por otro lado, en cuanto a los requerimientos de computo del modelo, se han comparado variables que proporcionan una idea del coste computacional que supone la simulación, como puede ser la memoria principal utilizada (RAM) o el tiempo de computo requerido.

Estos puntos se detallan a continuación, en diferentes apartados.

2.1 – Nivel o Cota del embalse

El primer observable analizado en las simulaciones es el nivel de agua embalsado o “cota” que se ha calculado para todo el periodo de simulación. En esta cota influyen factores tales como la evapotranspiración, controlado por el módulo *Heat Flux Model*, los caudales de entrada y salida de los tributarios y de los desagües de la presa. También influyen factores como las precipitaciones en el embalse y en la cuenca y por tanto el modelado de las escorrentías, agua que circula por la superficie y que se filtra al embalse. Las medidas de la cota han sido facilitadas por la estación automática de la red SAIH, (Sistema Automático de Información Hidrológica).

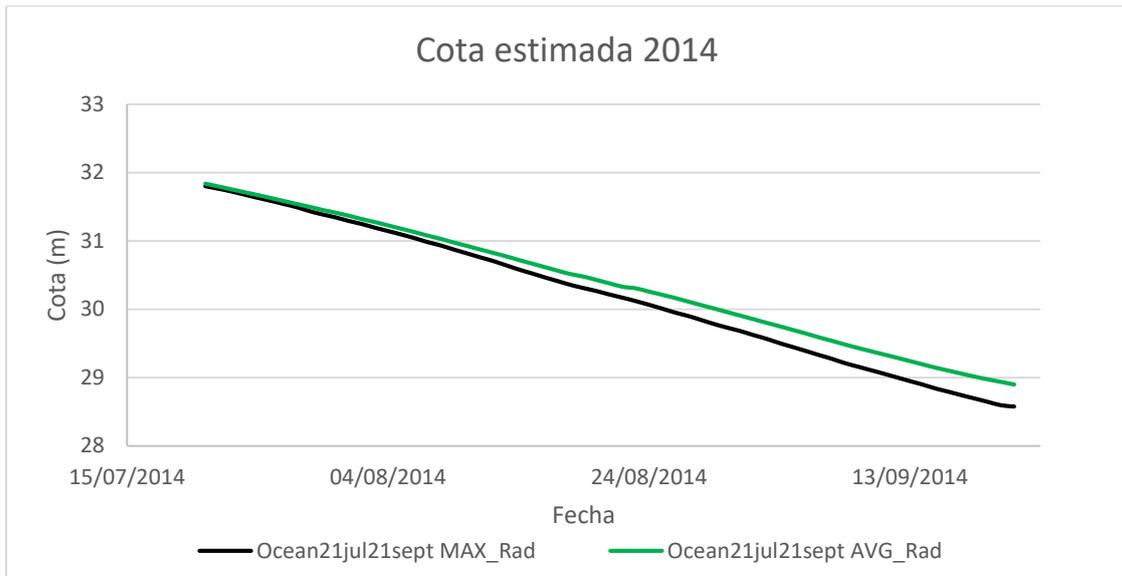
A continuación, se muestra el nivel de agua embalsado, tanto el medido como el estimado por la simulación, para el periodo completo de modelización escogido para 2014, de abril a noviembre.



Gráfica 1: En la gráfica se muestra el nivel de agua embalsado en el embalse de Cuerda del Pozo para el periodo de simulación, de abril a noviembre de 2014. En azul se muestra la cota medida y en naranja la cota estimada mediante la simulación.

En la gráfica podemos ver que, si bien el nivel de agua estimado por el modelo se desvía progresivamente de la cota medida, alcanzando una diferencia de ≈ 0.8 metros al final del periodo, ambas curvas siguen una evolución similar. El hecho de que la cota simulada por el modelo este siempre por encima de la cota medida, y que además esta diferencia se incrementa de modo progresivo, puede indicar que los datos de descarga de agua por la presa estén infra estimados. Además, la poca precisión de los datos medioambientales utilizados en la configuración del modelo para dos periodos de al menos 12 días, en los que no se pudieron tomar medidas en el embalse y se completó la serie mediante interpolaciones, es un factor destacable que puede inducir errores en la simulación.

Para reflejar la importancia de tener series temporales completas y precisas de los datos necesarios para la configuración del modelo, se han realizado dos simulaciones de dos meses de duración en las cuales se ha variado la radiación solar incidente, una usando la radiación promedio diaria en lugar de la medida cada hora y otra aplicando la radiación máxima diaria.

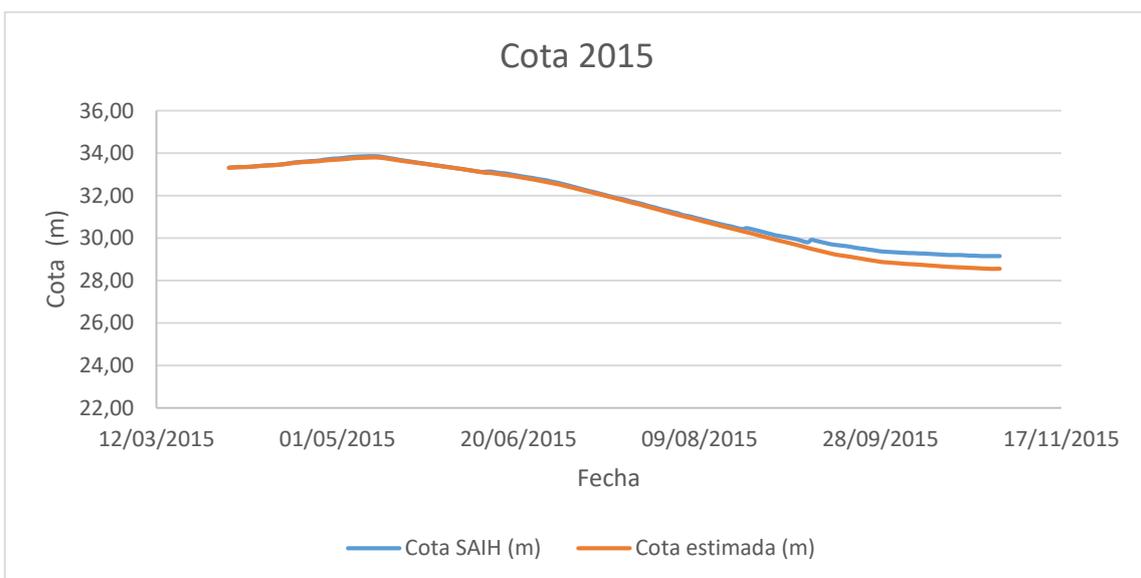


Gráfica 2: En la gráfica se muestra una estimación del nivel de agua embalsado en el embalse de Cuerda del Pozo para un periodo de simulación de dos meses, del 21 de julio al 21 de septiembre 2014. Se muestra la cota estimada a partir de los datos de radiación máxima, comparada con la obtenida a partir de la radiación promedio.

Como se puede ver en la gráfica, en dos meses de simulación la diferencia entre ambas cotas estimadas es de 0.5 metros, lo cual proporciona una muestra de la importancia de tener series temporales completas y precisas en la configuración del modelo.

Debe tenerse en cuenta que la curva anterior se obtuvo una vez realizadas varias pruebas de configuración, y en estas pruebas el valor de la cota era la primera variable de control. Por tanto, los resultados de simulación de 2014 deben tomarse como el resultado de la configuración. La validación del modelo, una vez fijados los parámetros de configuración, se debe realizar usando otro conjunto de datos independientes.

Si representamos ahora los datos del nivel de agua embalsado, medidos y simulados, para el año 2015, obtenemos la siguiente figura:



Gráfica 3: En la gráfica se muestra el nivel de agua embalsado en el embalse de Cuerda del Pozo para el periodo de simulación, de abril a octubre de 2015. En azul se muestra la cota medida y en naranja la cota estimada mediante la simulación.

Para el año 2015 podemos ver que, las cotas medida y simulada, siguen una evolución muy similar a lo largo de los 7 meses de simulación, si bien al final del periodo la cota medida tiene dos cambios pequeños pero bruscos que hacen que esta, acabe siendo apenas 0.6 m superior a la cota estimada: 29.1 m. de cota medida frente a 28.5 m. de cota simulada.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos concluir que el modelo es capaz de simular el balance hídrico en el embalse durante un largo periodo de simulación, proporcionando una estimación del nivel de agua embalsado con una precisión mejor de 1 m.

2.2 – Simulación térmica

La simulación térmica del embalse, puede proporcionarnos una idea del proceso de transporte horizontal, así como del intercambio vertical entre capas. Además, estos procesos de transporte son controlados por las ecuaciones presentadas en el apartado 1.3.2, por lo que, esta validación también puede aportar información de si el modelo funciona o no correctamente.

El estudio de la simulación térmica se ha separado en dos partes diferentes, por un lado, se compara la temperatura por capas en la columna vertical de la masa de agua, y por el otro, el proceso de estratificación térmica que se produce en los meses de verano y otoño en los embalses y en los lagos.

2.2.1 – Temperatura en la columna de agua

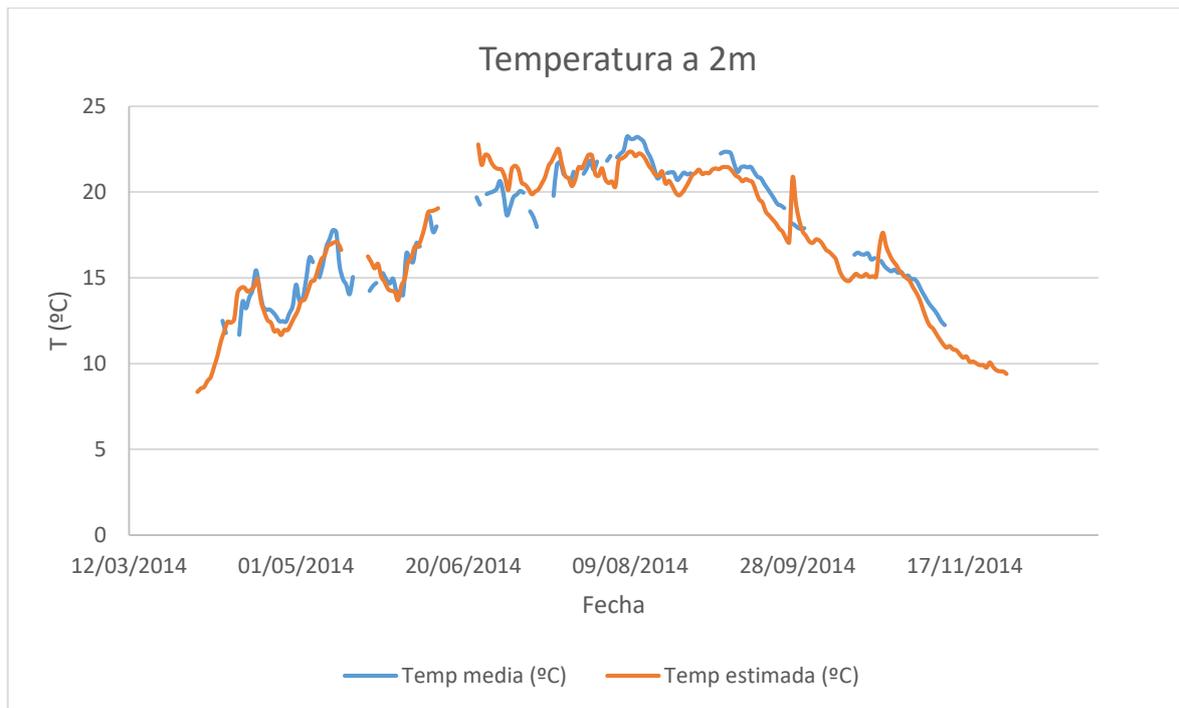
En este apartado se compara la temperatura estimada por la simulación para diferentes valores fijos de la profundidad en la columna de agua, frente a la temperatura medida a lo largo de todo el periodo simulado. Para realizar este estudio se han utilizado las medidas obtenidas de los perfiles, que se realizan diariamente desde la plataforma situada cerca de la presa, tomando medidas en toda la columna de agua. Esto nos permite saber a qué temperatura se encuentra cada capa del embalse. Por diferentes criterios establecidos, el perfil de muestreo se realiza siempre a la misma hora, las 12:00 UTC, lo cual recordemos que también era una de las referencias para los resultados del modelo.

Con respecto a los resultados del modelo, establecido uno de los puntos de monitorización en la misma posición en la que está colocada la plataforma en el embalse, como ya se ha comentado en el apartado 1.3.4, el modelo proporciona datos de todas las capas que componen la columna vertical de agua con una resolución temporal de 6 horas. Esto hace que tengamos resultados de todos los días de simulación a las: 00:00 h, 06:00 h, 12:00 h, 18:00 h.

Debe resaltarse que, puesto que trabajamos en el sistema de modelado Z, en el cual las capas verticales tienen límites fijos, y puesto que como se ve en las gráficas 1 y 2 el nivel de agua embalsado varía, las capas de la parte superior del embalse pueden vaciarse, lo que hace que tengamos que corregir en altura la capa de la que cogemos los resultados, si queremos medir siempre la temperatura a la misma profundidad. Para este estudio se han escogido 3 profundidades, 2, 6 y 10m como valores representativos de la columna de agua.

- Medidas y Resultados de la simulación para el año 2014:

Si representamos las medidas de temperatura y los resultados de la simulación a 2m de profundidad para todo el periodo de abril a noviembre de 2014, obtenemos la siguiente grafica:

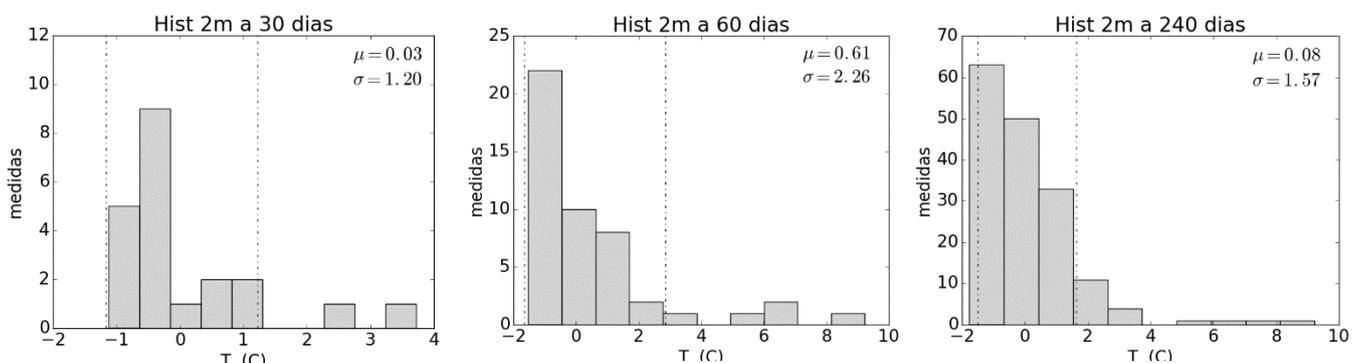


Grafica 4: Temperatura estimada, en naranja, y temperatura medida, en azul, a 2 metros de profundidad para el periodo completo de abril a noviembre de 2014.

Observando la variación de las medidas de temperatura durante la toma de datos a una determinada profundidad, se puede confirmar que la precisión es mejor de 0.01°C

Para estudiar la incertidumbre asociada a los resultados de las simulaciones, se ha representado la diferencia entre la medida y la estimación proporcionada por la simulación en forma de histograma y se ha calculado la media y la desviación estándar de dicha distribución. Evidentemente la diferencia entre los valores medidos y el resultado de las simulaciones crece con el tiempo transcurrido en el periodo, por lo que debe estudiarse la estimación para diferentes periodos. Los histogramas que se presentan, muestran esta estimación a 30, 60 y 240 días (todo el periodo de simulación completo), pero los valores de media y desviación estándar se han calculado también para los periodos de 90 y 120 días para seguir su evolución temporal.

A continuación, en la gráfica 5 se muestran las diferentes distribuciones para 30, 60 y 240 días, y en la tabla 3, la media y la desviación estándar.



Grafica 5: De izquierda a derecha se presentan las distribuciones de la incertidumbre obtenida para el valor estimado de la temperatura para el periodo de abril a noviembre de 2014 a una profundidad de 2m, para 30, 60 y 240 días respectivamente. La distribución se presenta en forma de histograma en el que se presentan, además, los límites marcados por la varianza.

Calculamos la media y la desviación estándar de las diferentes distribuciones:

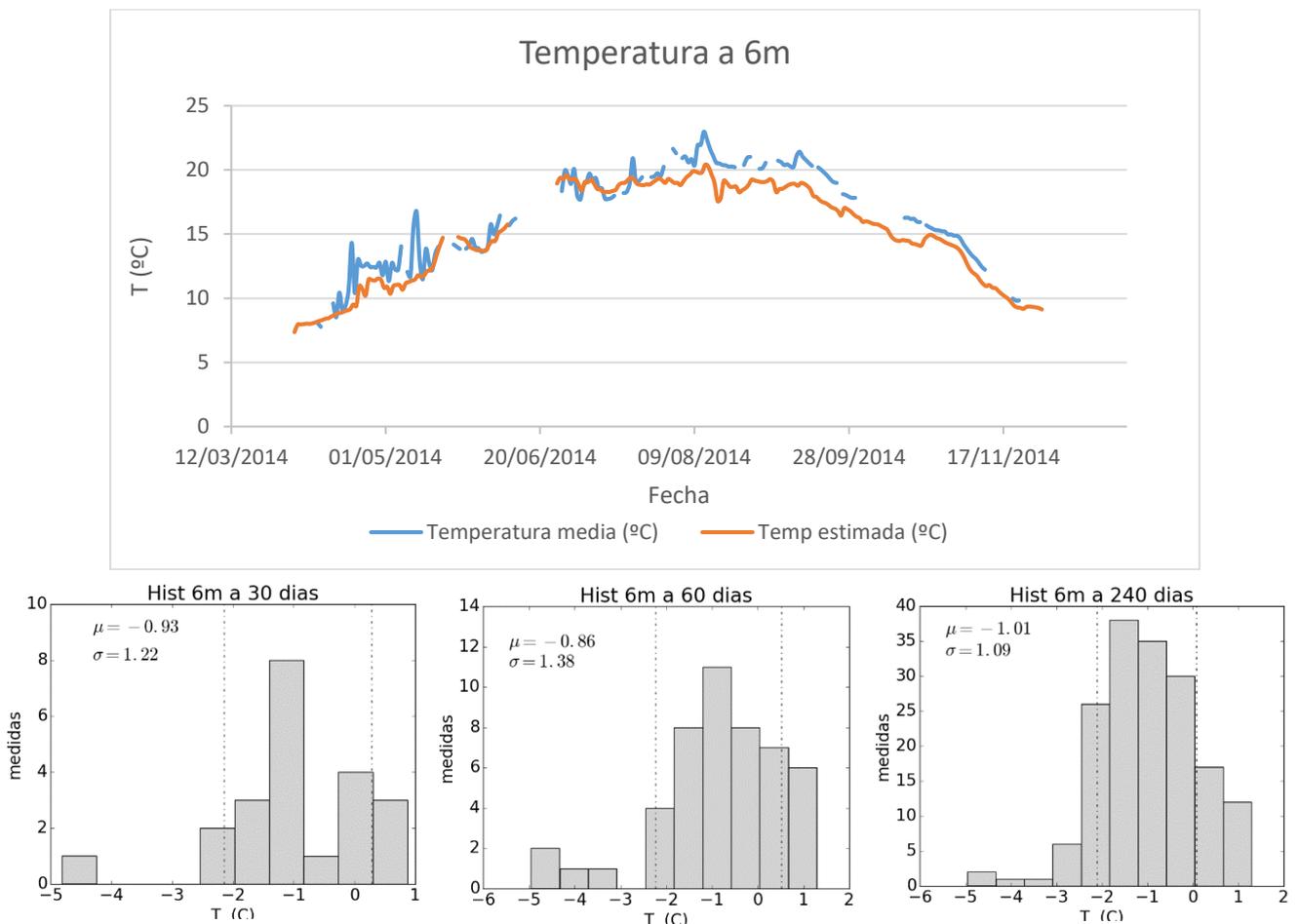
Periodo de simulación (días)	μ (°C)	σ (°C)
30	0.03	1.20
60	0.61	2.26
90	0.72	2.02
120	0.75	1.79
240	0.08	1.57

Tabla 3: Media y desviación estándar de la incertidumbre obtenida en la temperatura estimada a una profundidad de 2m para 30, 60, 90, 120 y 240 días.

En la gráfica y en los valores obtenidos para la media y la desviación estándar de la distribución, podemos ver que la temperatura estimada se ajusta bien para todo el periodo que dura la simulación, si bien tanto la media como la desviación crecen ligeramente en el intervalo medio de la simulación.

Si realizamos el mismo estudio para una profundidad de 6 y de 10 metros y representamos tanto la evolución temporal de la temperatura medida y estimada, como la distribución de probabilidad de la incertidumbre obtenida en la simulación para 30, 60 y 240 días, tenemos:

- 6 metros:



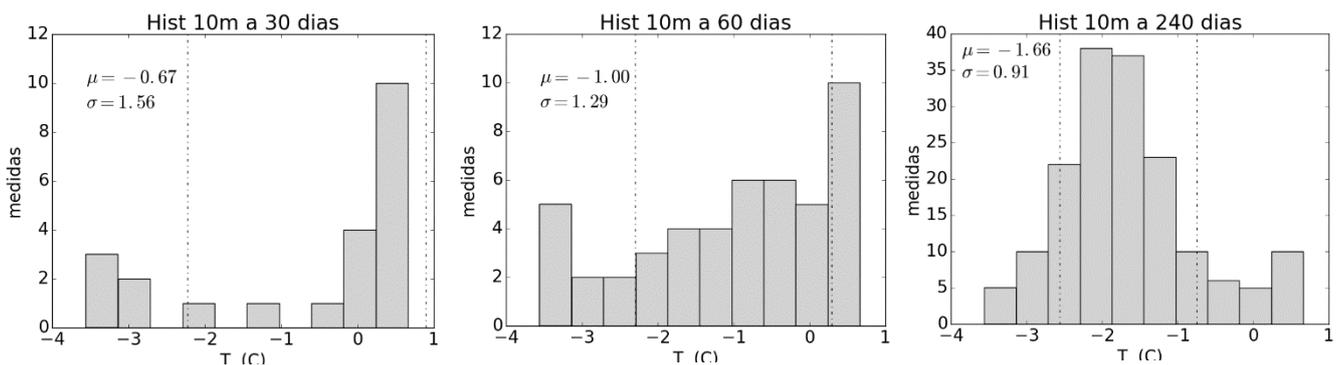
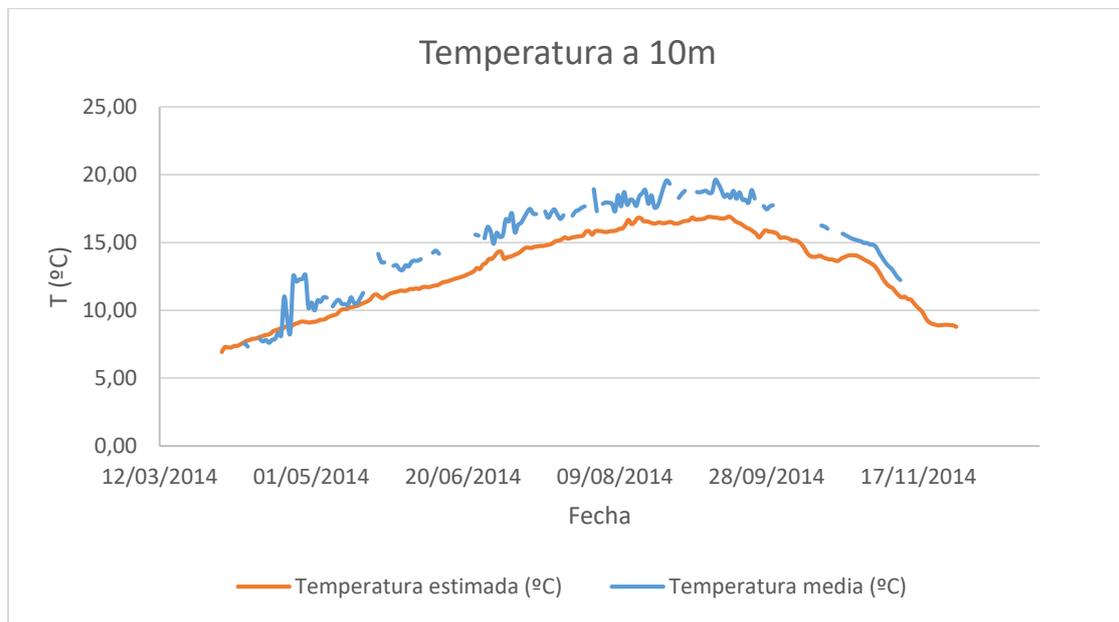
Gráfica 6: Arriba, se representa la temperatura estimada, en naranja, y la temperatura medida, en azul, a 6 metros de profundidad para el periodo de abril a noviembre de 2014. Abajo, de izquierda a derecha se presentan las distribuciones de la incertidumbre obtenida para el valor estimado de la temperatura para 30, 60 y 240 días respectivamente.

Calculamos la media y la desviación estándar de las diferentes distribuciones.

Periodo de simulación (días)	μ (°C)	σ (°C)
30	-0.93	1.22
60	-0.86	1.38
90	-0.68	1.28
120	-0.51	1.17
240	-1.01	1.09

Tabla 4: Media y desviación estándar de la incertidumbre obtenida en la temperatura a una profundidad de 6m para 30, 60, 90, 120 y 240 días.

- 10 metros:



Grafica 7: Arriba, se representa la temperatura estimada, en naranja, y la temperatura medida, en azul, a 10 metros de profundidad para el periodo completo de simulación, de abril a noviembre de 2014. Abajo, de izquierda a derecha se presentan las distribuciones de la incertidumbre obtenida para el valor estimado de la temperatura para 30, 60 y 240 días respectivamente.

Media y desviación estándar de las diferentes distribuciones.

Periodo de simulación (días)	μ (°C)	σ (°C)
30	-0.67	1.56
60	-1.00	1.29
90	-1.26	1.23
120	-1.51	1.13
240	-1.66	0.91

Tabla 5: Media y desviación estándar de la incertidumbre obtenida en la temperatura a una profundidad de 10m para 30, 60, 90, 120 y 240 días.

En la gráfica 6 y en los valores de la tabla 4, datos a la profundidad de 6 metros, se ve como, aunque la media de la distribución sufre una desviación mayor para el periodo de simulación completo que, para el periodo de 120 días, la temperatura simulada se ajusta correctamente a la temperatura medida para todo el periodo.

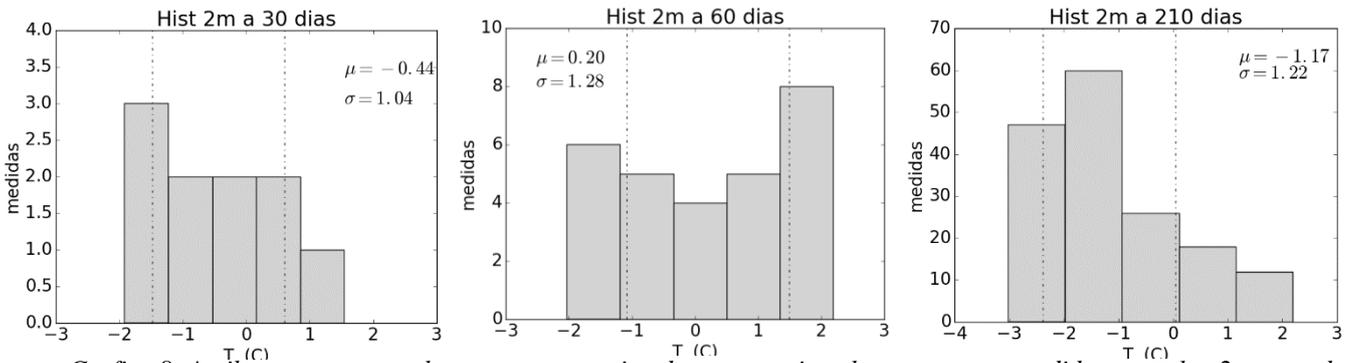
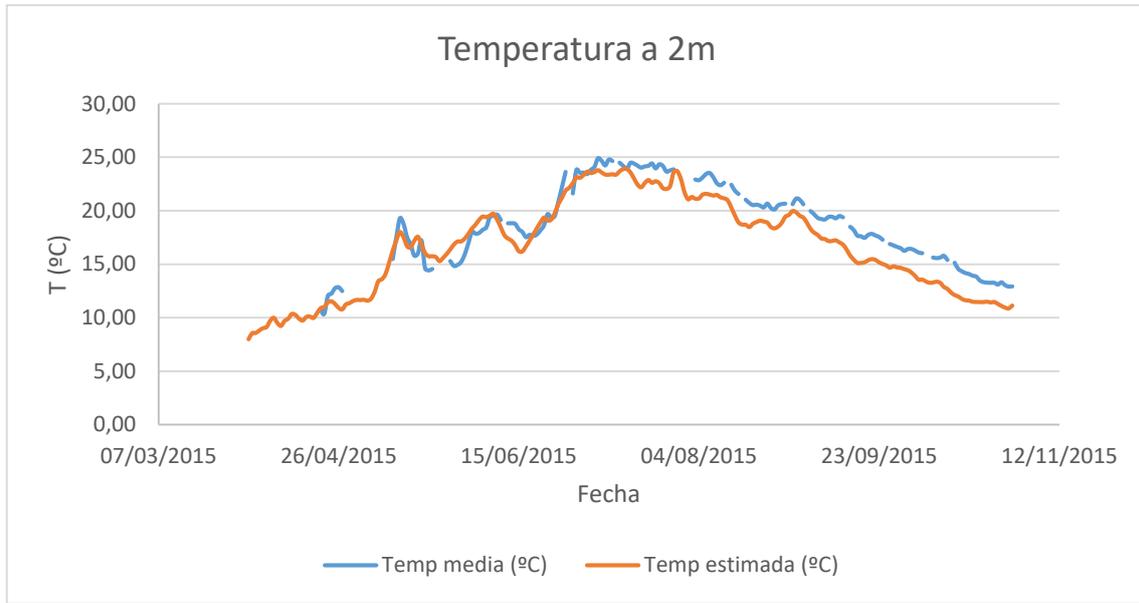
En cambio, en los datos presentados a 10 metros de profundidad, grafica 7 y tabla 5, si bien la simulación es buena en todo el periodo, ya que el comportamiento de la temperatura estimada se ajusta perfectamente al comportamiento de la temperatura medida, se ve como a partir de un periodo de simulación de 120 días, la media de la distribución se desvía por encima de 1.5°C, y la temperatura estimada es siempre menor que la temperatura real.

Aunque es difícil argumentar un motivo por el cual se produce esta desviación, a la hora de considerar alguno de los factores que pueden influir en la configuración del modelo habría que mencionar entre otros: la poca precisión de las medidas medioambientales en 2 periodos de al menos 12 días o la transferencia de calor entre las capas verticales.

- Medidas y Resultados de la Simulación para el año 2015:

Si analizamos ahora los resultados obtenidos para el periodo completo simulado en 2015, de abril a octubre, y representamos la evolución temporal de la temperatura media y estimada para profundidades de 2, 6 y 10 metros y la distribución de probabilidad de la incertidumbre obtenida para la temperatura estimada en la simulación para 30, 60 y 210 días, se obtienen las siguientes gráficas:

- 2 metros



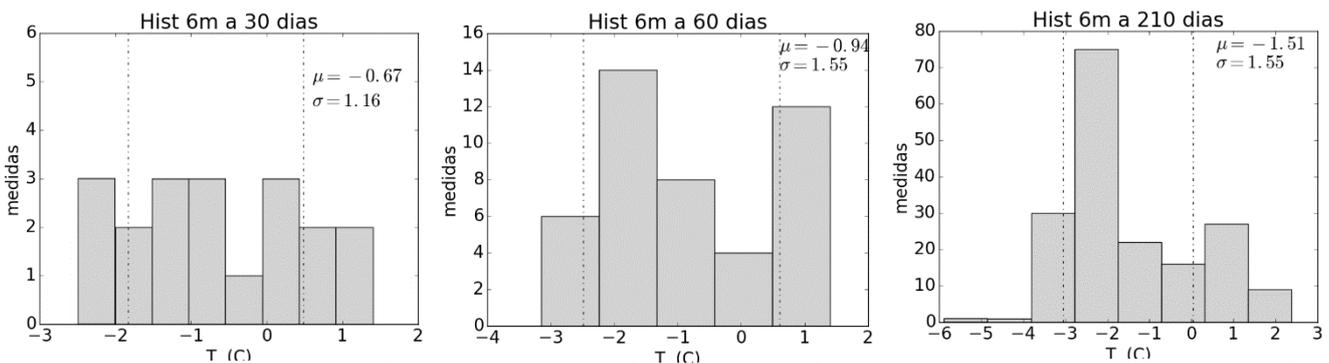
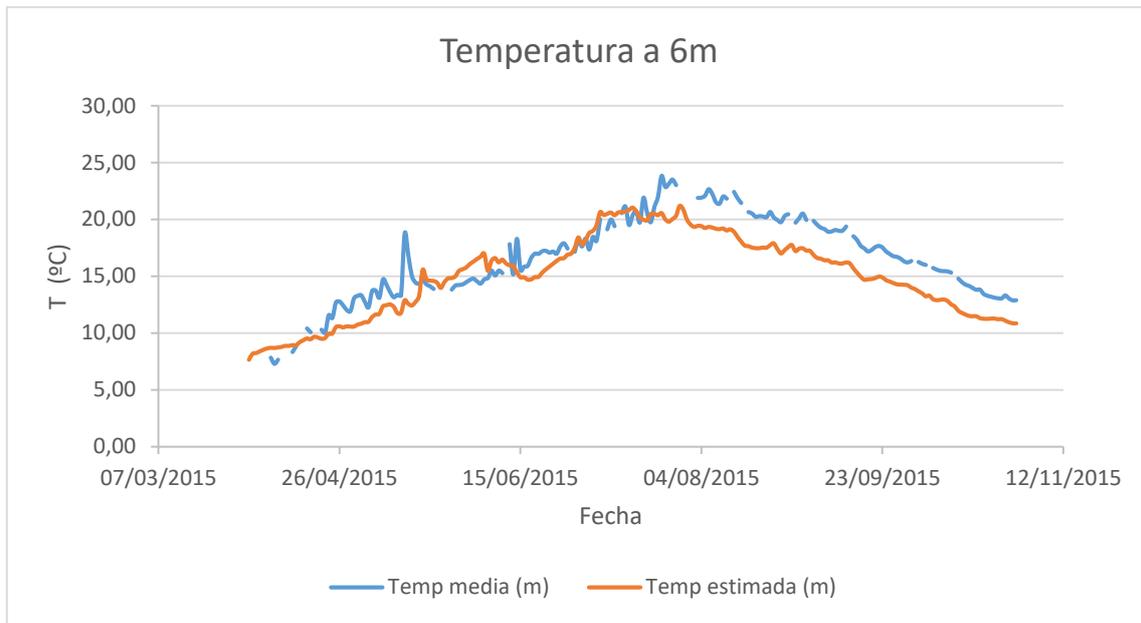
Grafica 8: Arriba, se representa la temperatura estimada, en naranja, y la temperatura medida, en azul, a 2 metros de profundidad para el periodo comprendido entre abril y octubre de 2015. Abajo, de izquierda a derecha se presentan las distribuciones de la incertidumbre obtenida para el valor estimado de la temperatura para 30, 60 y 240 días respectivamente.

Media y desviación estándar de las diferentes distribuciones.

Periodo de simulación (días)	μ (°C)	σ (°C)
30	-0.44	1.04
60	0.20	1.28
90	-0.01	1.18
120	-0.34	1.14
150	-0.67	1.17
180	-0.95	1.21
210	-1.17	1.22

Tabla 6: Media y desviación estándar de la incertidumbre obtenida en la temperatura a una profundidad de 2m en periodos de 30 días.

- 6 metros:



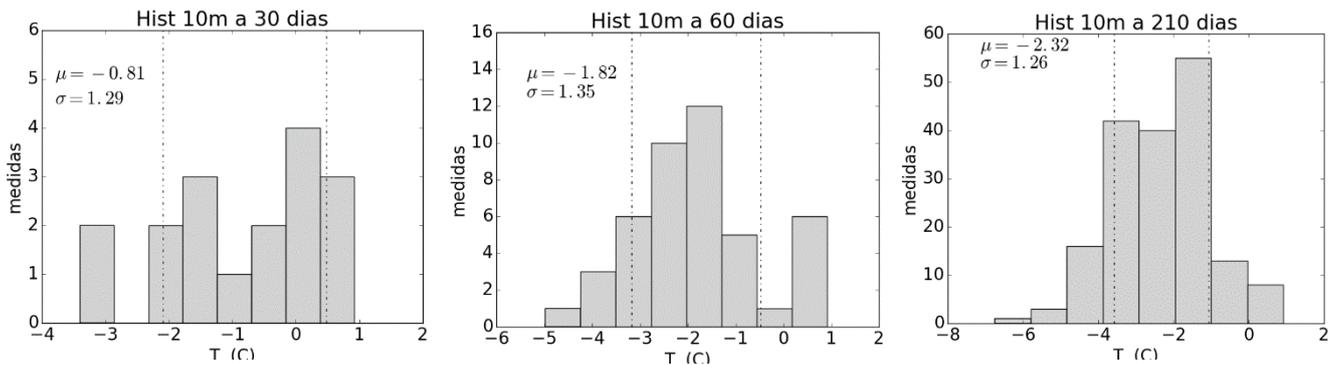
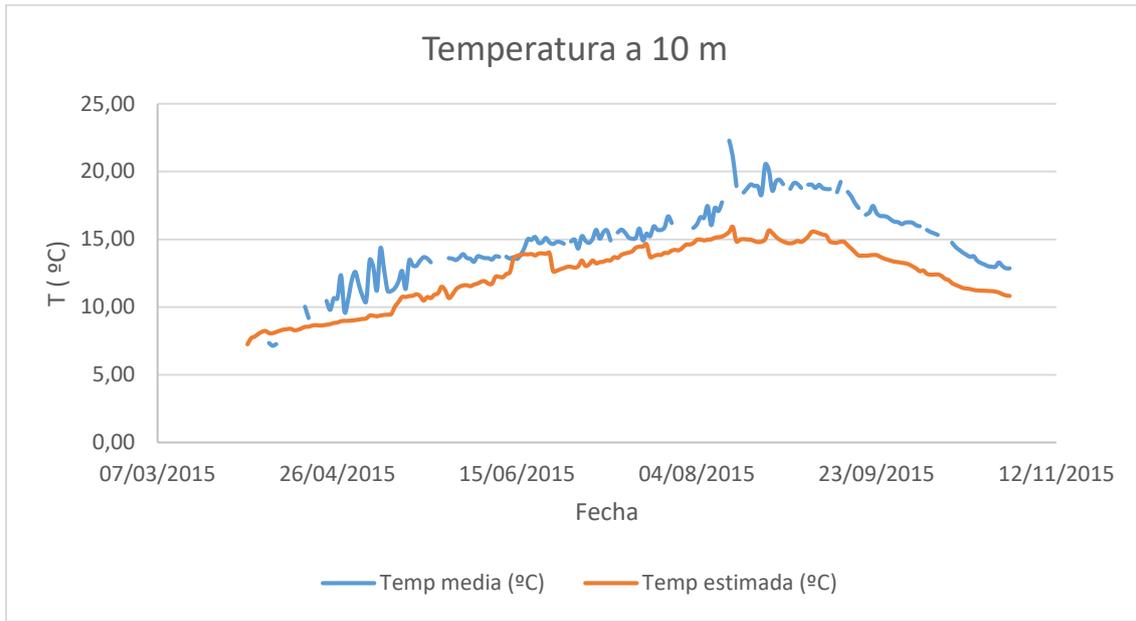
Grafica 9: Arriba, se representa la temperatura estimada, en naranja, y la temperatura medida, en azul, a 6 metros de profundidad para el periodo comprendido entre abril y octubre de 2015. Abajo, de izquierda a derecha se presentan las distribuciones de la incertidumbre obtenida para el valor estimado de la temperatura para 30, 60 y 240 días respectivamente.

Media y desviación estándar de las distribuciones.

Periodo de simulación (días)	μ (°C)	σ (°C)
30	-0.67	1.16
60	-0.94	1.55
90	-0.68	1.56
120	-0.61	1.57
150	-1.06	1.66
180	-1.35	1.63
210	-1.51	1.55

Tabla 7: Media y desviación estándar de la incertidumbre obtenida en la temperatura a una profundidad de 6m en periodos de 30 días.

- 10 metros:



Grafica 10: Arriba, se representa la temperatura estimada, en naranja, y la temperatura medida, en azul, a 10 metros de profundidad para el periodo comprendido entre abril y octubre de 2015. Abajo, de izquierda a derecha se presentan las distribuciones de la incertidumbre obtenida para el valor estimado de la temperatura para 30, 60 y 240 días respectivamente.

Media y desviación estándar de las distribuciones.

Periodo de simulación (días)	μ (°C)	σ (°C)
30	-0.81	1.29
60	-1.82	1.35
90	-1.64	1.15
120	-1.65	1.02
150	-2.02	1.33
180	-2.27	1.34
210	-2.32	1.26

Tabla 8: Media y desviación estándar de la incertidumbre obtenida en la temperatura a una profundidad de 10m en periodos de 30 días.

Como se puede ver en las distintas gráficas y en los valores de las tablas, la temperatura simulada se ajusta muy bien a la temperatura medida en las tres profundidades estudiadas hasta los 120 días de simulación. A partir de los 120 días, si bien la temperatura simulada a 2 metros continúa ajustándose bien para todo el periodo completo, 7 meses, las temperaturas simuladas para las profundidades de 6 y de 10 metros se siguen comportando como la temperatura medida incluso en las fluctuaciones más pequeñas, pero los valores se desvían de esta y la temperatura simulada es menor a la medida.

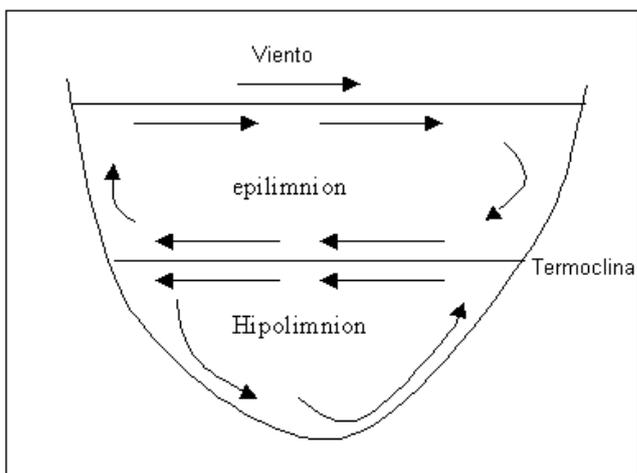
En ambos casos, a 6 metros y a 10 metros de profundidad, no se llega a modelar perfectamente el pico de máxima temperatura medida, lo que hace que después la temperatura simulada sea menor que la real todo el tiempo.

2.2.2 – Estratificación Térmica

La estratificación térmica de la columna de agua es un fenómeno de carácter estacional, y muy importante en el funcionamiento del ecosistema. Controla procesos tan importantes como la difusión vertical de nutrientes en el embalse o el crecimiento de algas, además de influir en otros como el intercambio de sustancia disueltas en el agua entre las diferentes capas de la masa de agua.

Los lagos o los embalses tienen una distribución uniforme de la temperatura durante el invierno y la primavera, hasta que el calor del sol y el calentamiento del aire sobre el agua hacen aumentar su temperatura. En el proceso de estratificación interviene de forma importante el viento

La estratificación térmica divide las masas de agua en tres capas horizontales, epilimnion, metalimnion (también conocido como capa termoclina) e hipolimnion. La termoclina se sitúa a aquella profundidad en la que se detecta un gradiente térmico de al menos 1°C/m. En la siguiente figura se puede ver un esquema de las capas verticales en las que se estratifica la masa de agua.



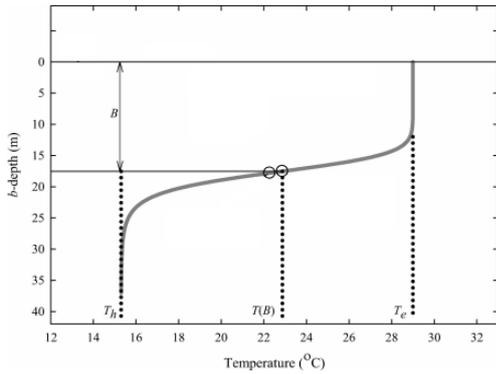
Epilimnio: capa superficial del agua de un lago, en la cual la temperatura es más elevada en verano. se sitúa por encima del estrato de mayor discontinuidad térmica.

Termoclina: capa dentro de un cuerpo de agua donde la temperatura cambia rápidamente con la profundidad.

Hipolimnion: zona profunda de temperatura más fría

Figura 13: Esquema de la estratificación térmica en capas verticales de una masa de agua.
Ref.: [10]

Dado que lo que se pretende es validar los resultados obtenidos en las simulaciones, se han utilizado una serie de parámetros que caracterizan la estratificación térmica vertical de la columna de agua a partir de los datos de profundidad y temperatura a lo largo del perfil. Se ha computado la curva temperatura vs profundidad, y se han comparado los parámetros que caracterizan las diferentes capas o estratos verticales, ajustando cada perfil a la siguiente ecuación empírica (6).



$$T(Z) = T_h + \frac{T_e - T_h}{(1 + (\alpha Z)^n)^{1 - \frac{1}{n}}} \quad (6)$$

α = Parámetro de ajuste de la curva (m^{-1}). Determina la profundidad a la que se encuentra el gradiente máximo de temperatura.

n = parámetro adimensional que controla la pendiente del gradiente térmico

T_e = temperatura del epilimnion

T_h = temperatura del hipolimnion.

Z = profundidad

Figura 14: Esquema y ecuación del ajuste del perfil térmico vertical
Ref.: [11]

A partir de dicha ecuación, y de la primera y segunda derivada se pueden obtener además los indicadores correspondientes a la profundidad de la termoclina, Z_t :

$$Z_t = \frac{1}{\alpha} m^{m-1}$$

Donde $m=1-1/n$. y el gradiente térmico a través del metalimnion:

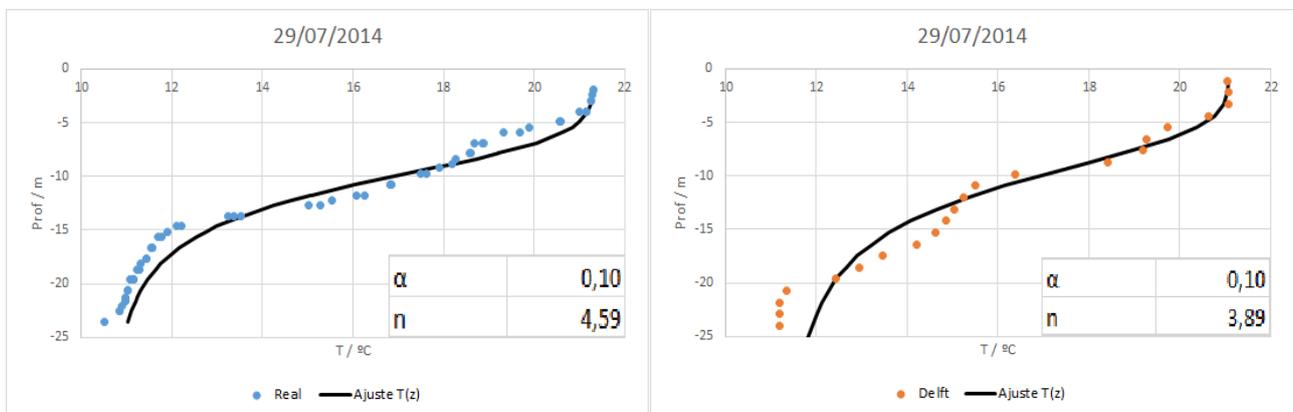
$$S = \frac{T_e - T_h}{Z_b - Z_u}$$

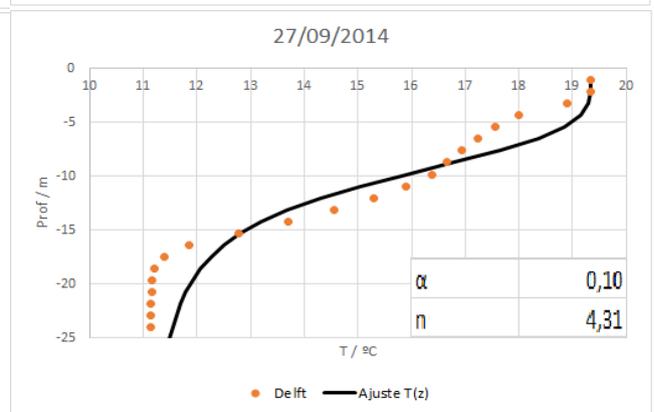
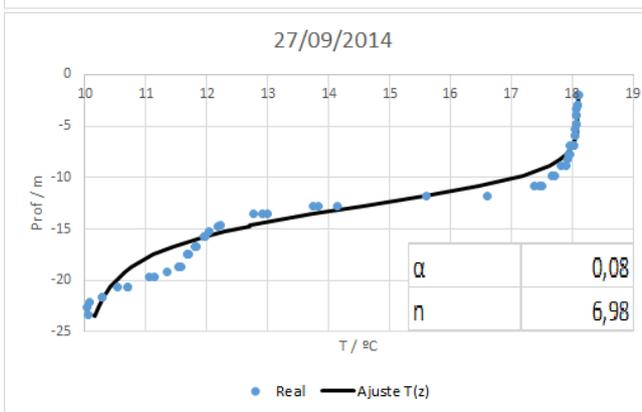
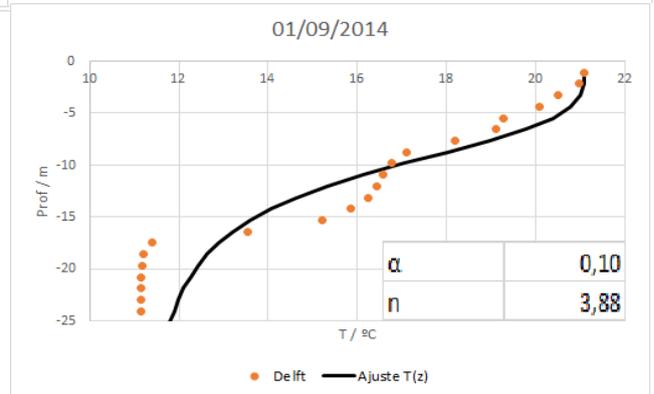
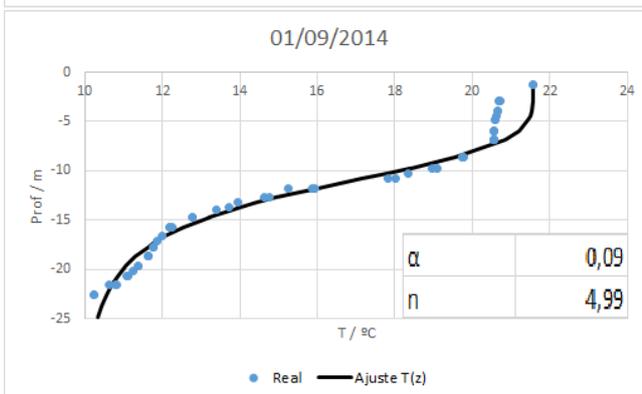
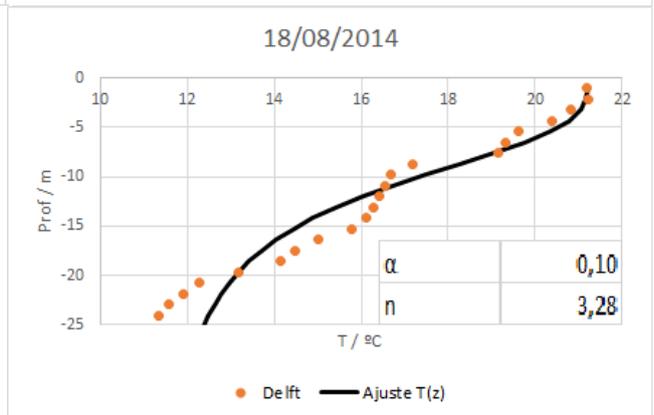
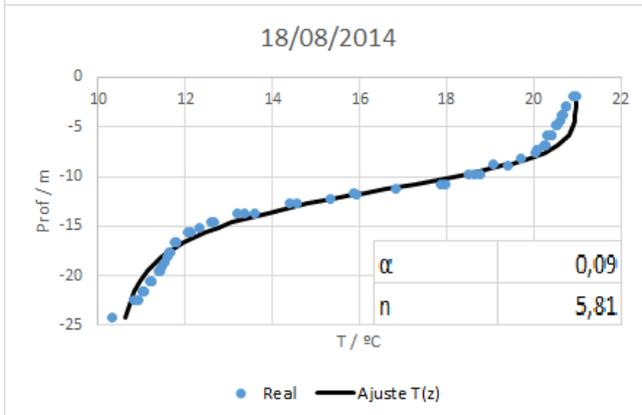
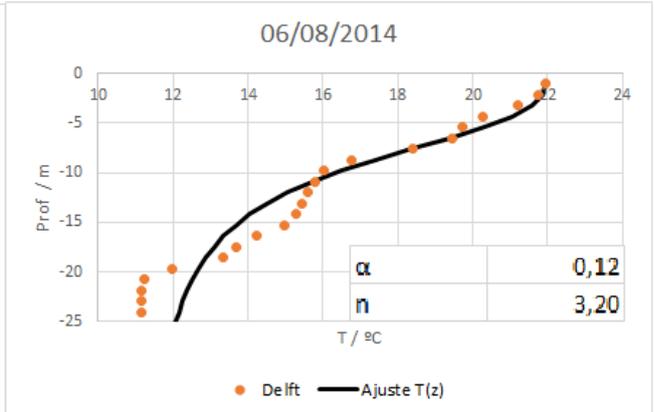
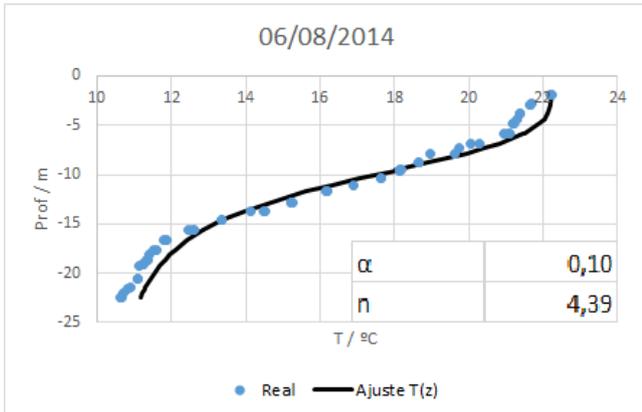
Donde Z_b y Z_u son, la profundidad del límite superior e inferior del metalimnion respectivamente.

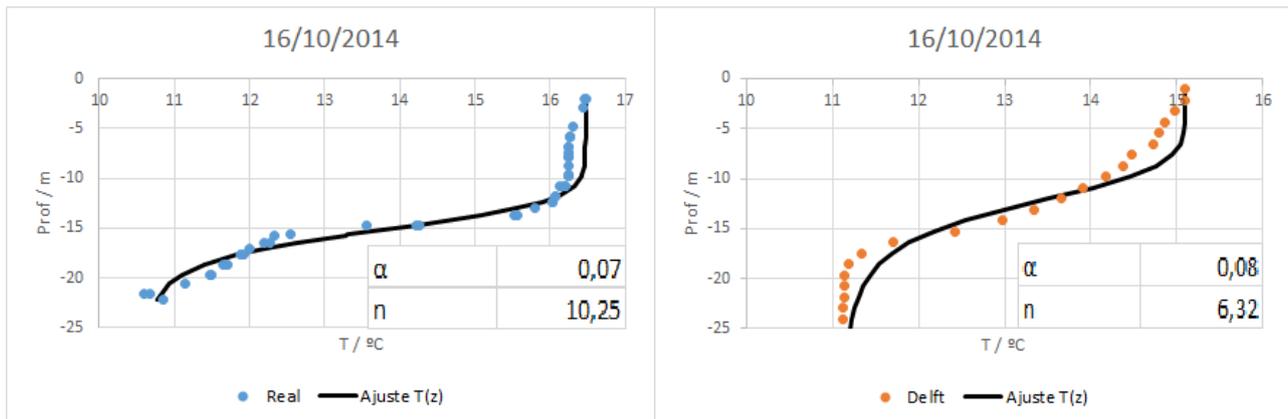
Los resultados obtenidos de las comparaciones se muestran a continuación:

- Medidas y Resultados para el año 2014:

A la izquierda, en color azul, se muestran los datos medidos, y la curva ajustada utilizando la parametrización anterior, y a la derecha, en naranja, el resultado de la simulación.







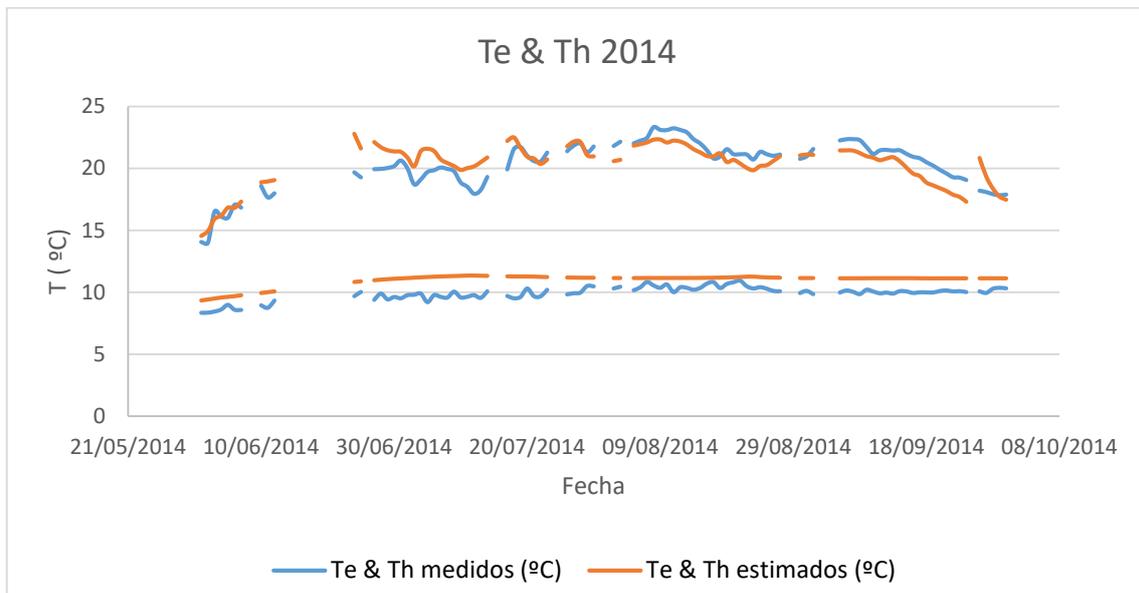
Grafica 11: A la izquierda, en azul, se representa la temperatura medida durante el perfilado para cada metro de profundidad. A la derecha, en naranja, la temperatura de cada capa de la columna vertical obtenida de los resultados de la simulación. En ambos casos los datos se muestran con el ajuste a partir de la ecuación [6] representada en la figura 11 y con los parámetros calculado para la realización de ese ajuste. Todos datos presentados corresponden a 2014.

En la evolución temporal presentada, tanto en las gráficas con los datos obtenidos en los perfiles, como en las gráficas con los datos de temperatura estimada, se puede seguir el proceso de formación, consolidación y disolución de la termoclina en el periodo en el que se produce la estratificación térmica. Además, el modelo representa correctamente la forma de los perfiles térmicos medidos, y tanto los datos medidos como los estimados, se ajustan a la función definida en la ecuación (6) e incluida en las gráficas.

Los datos de temperatura estimada se desvían ligeramente del ajuste a una profundidad de unos 16 metros, y si bien al igual que en ocasiones anteriores es muy difícil argumentar el motivo de esta desviación, a la hora de considerar alguno de los factores que pueden influir en la configuración del modelo habría que mencionar entre otros: las turbulencias creadas por la presa en la descarga de agua, dada la proximidad entre la presa y el punto de medición.

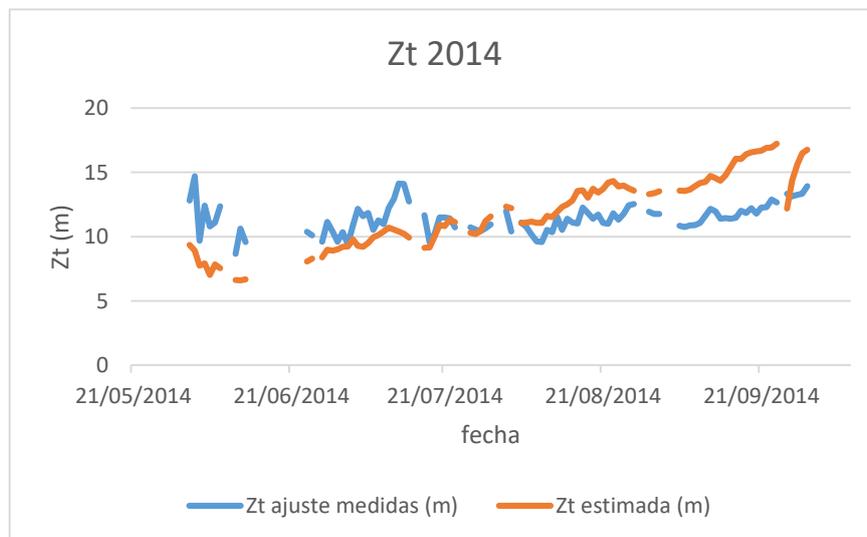
Si estudiamos ahora la temperatura del epilimnion, capa situada en la parte superior de la termoclina, la temperatura de hipolimnion, capa situada en la parte inferior de la termoclina, y la altura a la que se sitúa la termoclina, y la distribución de la incertidumbre en este caso, calculando su media y desviación estándar, a lo largo del periodo en el que se produce la estratificación térmica, obtenemos la siguiente curva:

- Te & Th



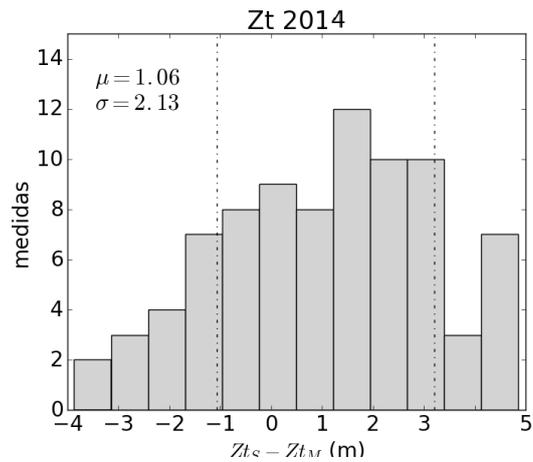
Grafica 12: Temperatura estimada, en naranja, y temperatura medida, en azul, para el epilimnion y el hipolimnion para el periodo en el que se produce la estratificación térmica.

- Zt



Grafica 13: En naranja se representa la profundidad estimada a la que se encuentra la termoclina, y en azul, la profundidad medida para el periodo en el que se produce la estratificación térmica.

Distribución de la incertidumbre obtenida con la media y la desviación estándar.



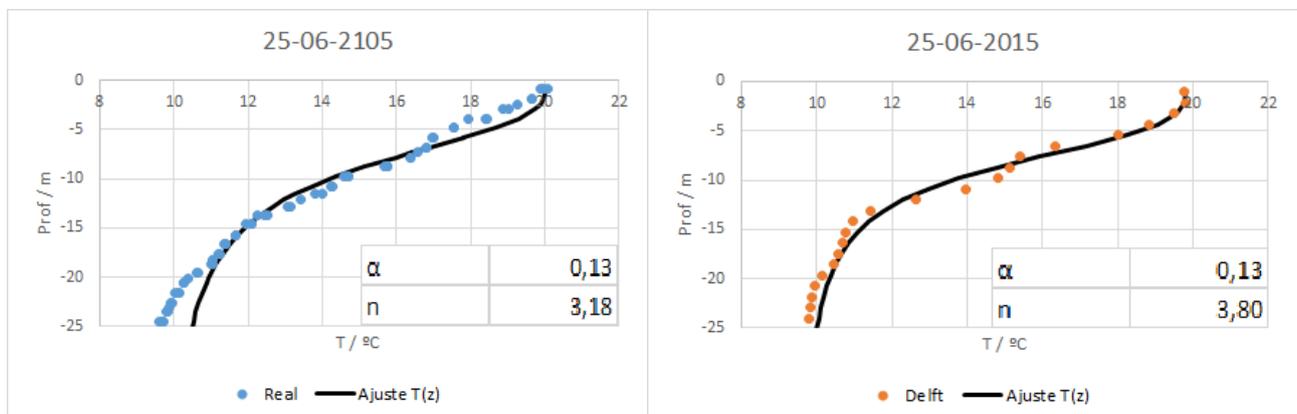
Grafica 14: Se presenta la distribución de la incertidumbre obtenida para el valor estimado de la profundidad a la que se encuentra la termoclina. La distribución se presenta en forma de histograma en el que se presentan, además, los límites marcados por la varianza.

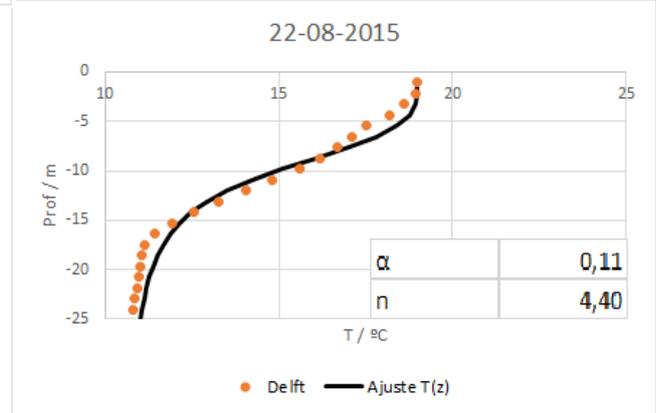
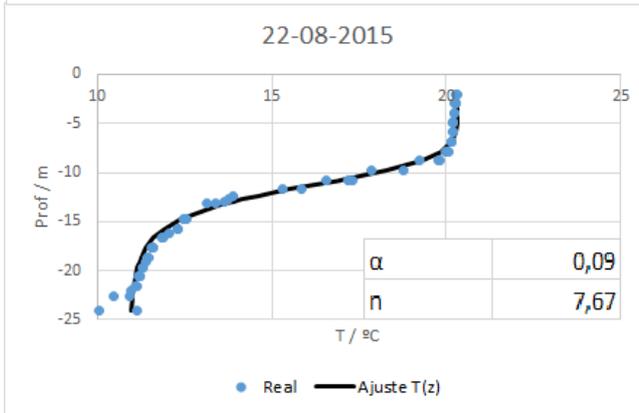
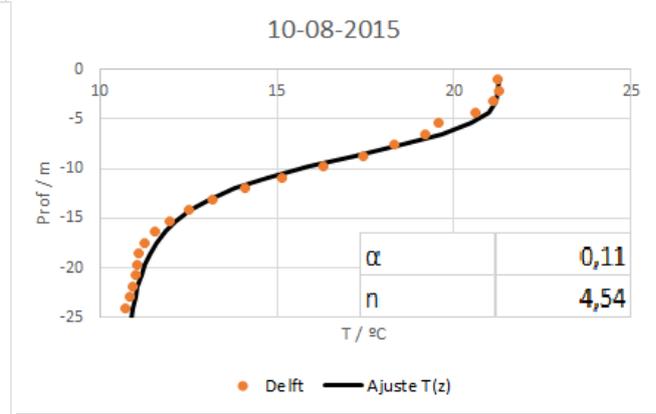
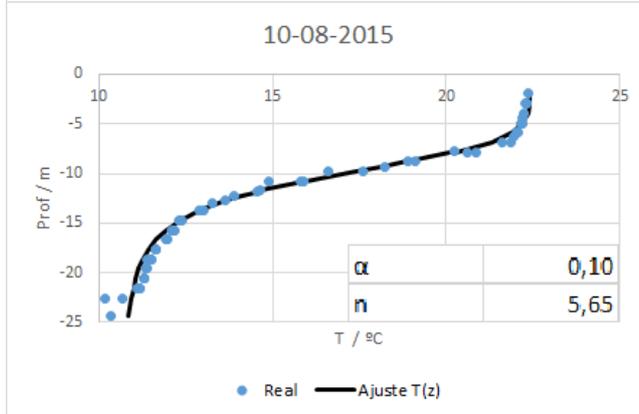
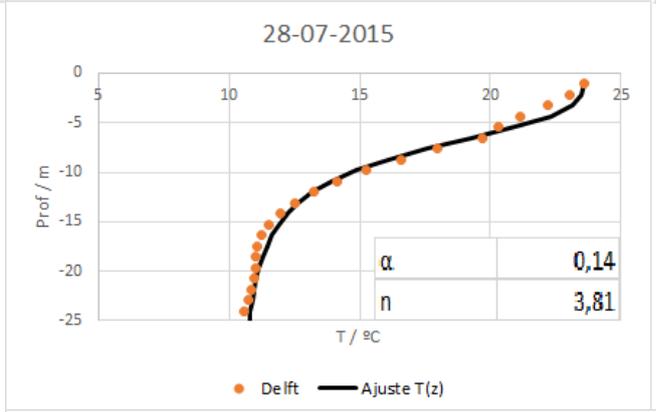
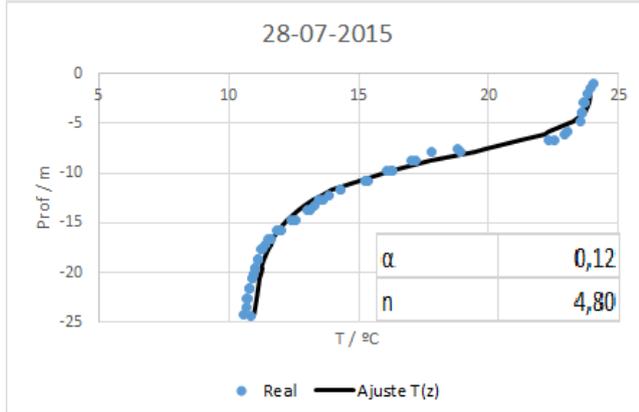
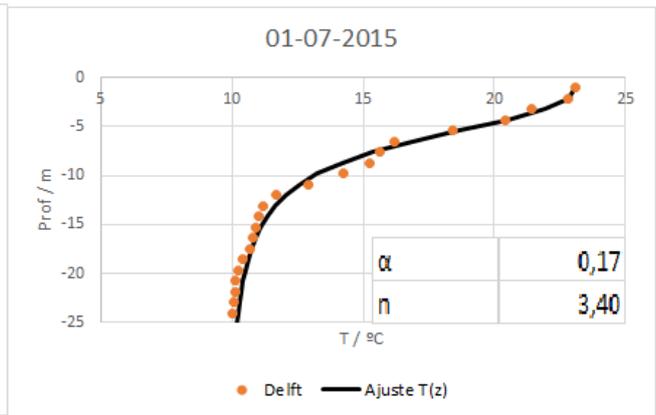
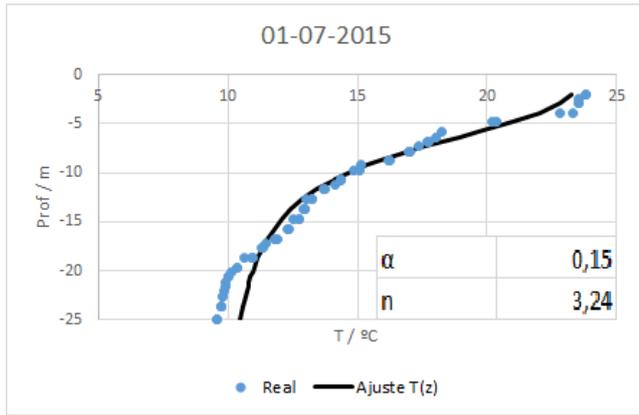
Como se ve, la temperatura del epilimnion y del hipolimnion se modelan correctamente para todo el periodo de tiempo en el que se produce la estratificación térmica y, en ambos casos estas siguen una evolución similar a la de la temperatura medida. Sin embargo, la profundidad a la que se sitúa la termoclina se desvía ligeramente de los datos reales, probablemente influenciada por la desviación de la temperatura estimada al ajuste de la ecuación (6).

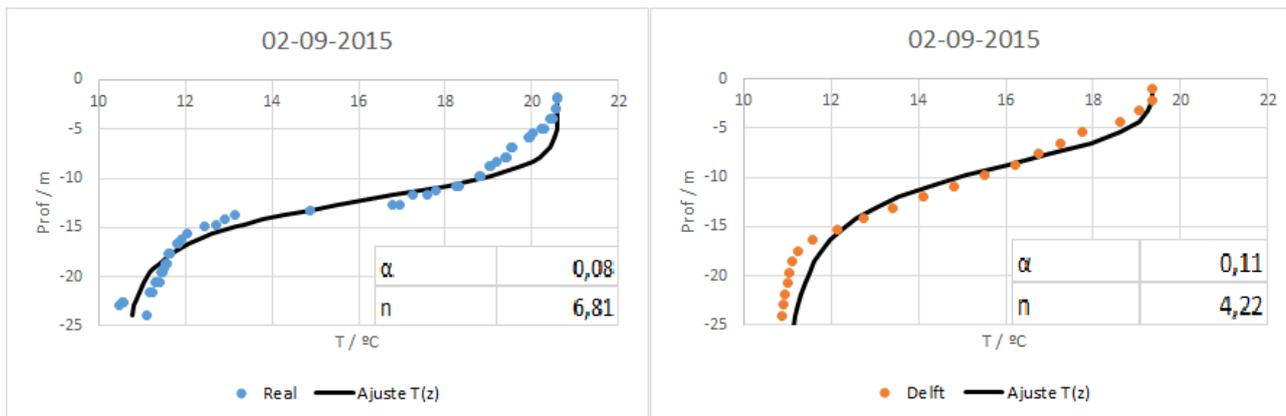
Las gráficas solo se presentan para los meses de junio a septiembre, ambos inclusive, ya que son los meses en los que se produce la estratificación térmica, y por lo tanto los meses en los que tiene sentido calcular estos valores.

- *Medidas y Resultados de la Simulación para el año 2015:*

Si estudiamos ahora la estratificación térmica producida en el periodo de 2015 las gráficas obtenidas son las siguientes:



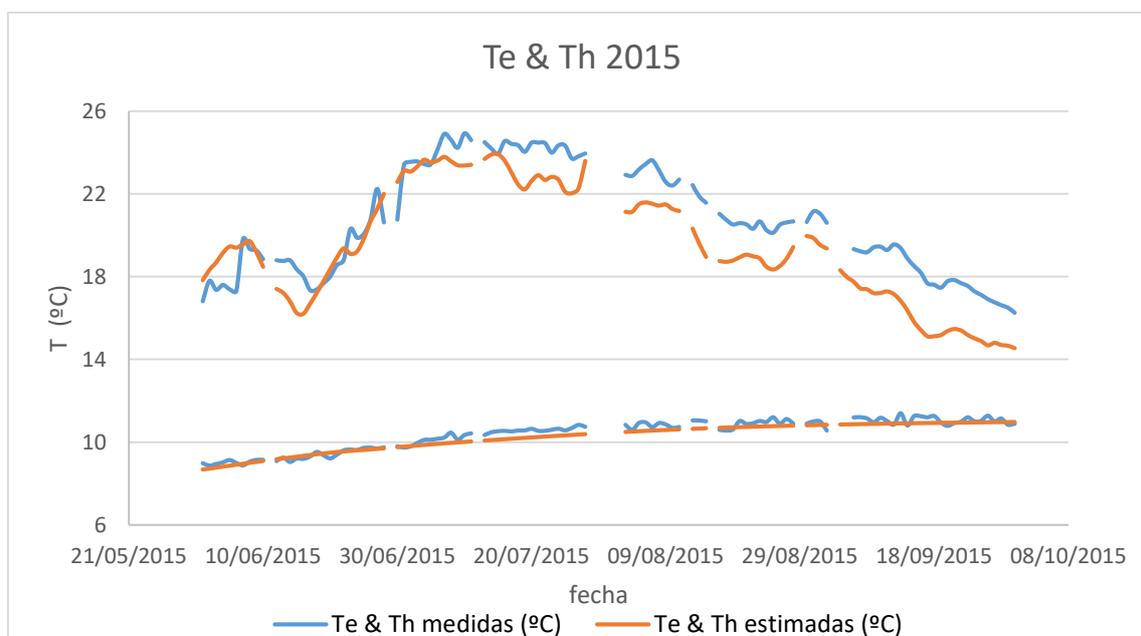




Grafica 15: A la izquierda, en azul, se representa la temperatura real medida durante el perfil para cada metro de profundidad. A la derecha, en naranja, la temperatura de cada capa de la columna vertical obtenida de los resultados de la simulación. En ambos casos los datos se muestran con el ajuste óptimo calculado a partir de la ecuación [6] representada en la figura 11 y con los parámetros calculado para la realización de ese ajuste. Los datos presentados son de la simulación realizada para 2015.

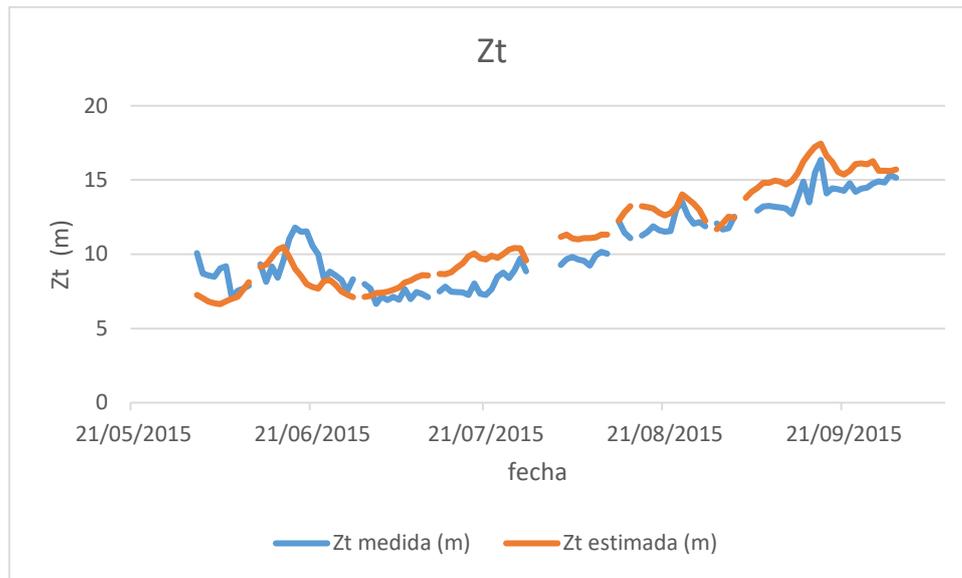
Al igual que en los resultados presentados para 2014, la evolución temporal presentada para 2015, tanto en las gráficas con los datos obtenidos en los perfiles, como en las gráficas con los datos de temperatura estimada, se puede seguir el proceso de formación, consolidación y disolución de la termoclina en los que se produce la estratificación térmica. En este caso, además, la temperatura medida y la temperatura estimada se ajustan perfectamente a la función definida por la ecuación (6).

Por último, si representamos la temperatura del epilimnion, la temperatura de hipolimnion y la altura a la que se sitúa la termoclina, y la distribución de la incertidumbre en este caso, calculando su media y desviación estándar, a lo largo del periodo en el que se produce la estratificación térmica, tenemos:



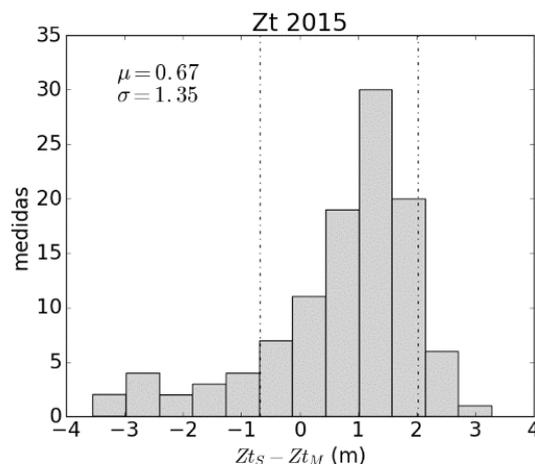
Grafica 16: Temperatura estimada, en naranja, y temperatura medida, en azul, para el epilimnion y el hipolimnion para el periodo en el que se produce la estratificación térmica.

- Z_t



Grafica 17: En naranja se representa la profundidad estimada a la que se encuentra la termoclina, y en azul, la profundidad medida para el periodo en el que se produce la estratificación térmica.

Distribución de la incertidumbre obtenida con la media y la desviación estándar.



Grafica 18: Se presenta la distribución de la incertidumbre obtenida para el valor estimado de la profundidad a la que se encuentra la termoclina. La distribución se presenta en forma de histograma en el que se presentan, además, los límites marcados por la varianza.

En este caso tanto las temperaturas de las dos capas superior e inferior a la termoclina, como la altura a la que esta se sitúa, se modelan perfectamente.

Para la validación de la temperatura del epilimnion y del hipolimnion y para la profundidad estimada de la termoclina, se ha tomado como referencia el estudio realizado en la referencia [11] de la bibliografía, trabajo del cual se ha sacado la ecuación de ajuste de los datos y los diferentes parámetros a comparar, aquellos que caracterizan la estratificación térmica

2.3 – Computación

Como se ha indicado, los modelos de alta resolución emplean una simulación compleja, y deben utilizar una infraestructura de computación lo suficientemente potente. Uno de los objetivos de este proyecto es determinar si dos diferentes entornos HPC, como son los supercomputadores y los sistemas Cloud, son fácilmente flexibles, adaptables e intuitivos, además de satisfacer los requerimientos en cuanto al rendimiento esperado.

Para comparar el rendimiento de ambos entornos de computación, se han ejecutado varias simulaciones en los dos sistemas, con configuraciones de computo diferentes y se han comparado los tiempos de ejecución obtenidos.

En el caso de los modelos computados en Cloud, la demanda de memoria principal es uno de los parámetros configurables a la hora de desplegar el entorno para el modelado. Se muestra a continuación una tabla con el tiempo de ejecución empleado y la memoria principal utilizada:

RAM /MB	Tiempo / s
1024	8756
2048	8468
4096	7252
8192	7150

Tabla 9: Tiempo de ejecución del modelo, en segundos, en función de la memoria RAM utilizada en el entorno de computación Cloud.

El hecho de que en el entorno Cloud el tiempo de ejecución mejore solo en un 25% aumentando un factor 8 la memoria, puede indicar que el modelo no demanda grandes cantidades de memoria para su ejecución.

Por otro lado, en las simulaciones realizadas en el supercomputador Altamira, donde el uso de memoria está limitado a la carga del nodo en el que se ejecute, por lo que no siempre es posible definir la memoria mínima o máxima a utilizar, los tiempos de ejecución son menores, entre los 2800 y 3600 segundos. Esto se debe al tipo de CPU utilizado, con procesadores Intel trabajando a 2,6 GHz en vez de los procesadores Intel E5 trabajando a 2 GHz utilizados en Cloud. Hay que destacar que en ambos casos ha sido imposible ejecutar el modelo utilizando una memoria RAM menor de un 1GB.

En cuanto a la facilidad de uso a la hora de la gestión, calibración y validación de los datos, la interfaz de usuario del entorno de computación Cloud, en el que todo se maneja mediante menús desplegables y en el que los datos se incorporan al modelo adjuntando los archivos, es mucho más amigable que el trabajo con la terminal de Altamira, en la que todo se maneja con los comandos propios del sistema operativo, en este caso Linux.

3 - Conclusiones

Se ha contribuido al desarrollo y operación de un sistema de adquisición y almacenamiento de datos en el embalse de Cuerda del Pozo con diferentes sensores que toman datos tanto de la calidad del agua del embalse, como de las condiciones ambientales. Esta labor se ha realizado empleando el lenguaje de programación grafica del paquete de software Labview.

Se ha configurado el modelo tridimensional *Delft3D hydraulics* adecuándolo a las características particulares del embalse, y se han realizado múltiples simulaciones completas de todo el periodo temporal en el que se produce la estratificación térmica de la masa de agua, de abril a octubre. Las simulaciones realizadas para el año 2014 se han utilizado para configurar el modelo, y las simulaciones del 2015 han permitido abordar una validación del mismo.

Los resultados obtenidos en las simulaciones para 2015 muestran que el modelo es capaz de reproducir el balance hídrico del embalse y por tanto de modelar el nivel de agua embalsado durante el periodo de tiempo simulado, lo que se refleja en la capacidad de estimar la cota del embalse con una incertidumbre menor de 1 metro.

Además, se ha comprobado que el modelo simula correctamente la temperatura en la columna vertical de agua a lo largo del periodo de simulación, y el proceso estacional de estratificación térmica, en el cual se reproduce correctamente la evolución temporal de los perfiles térmicos y la profundidad a la que se sitúa la termoclina o metalimnion.

En cuanto a los recursos de computación, la ejecución del modelo no se beneficia de un incremento en la memoria del sistema, y si depende de la potencia del procesador. Por otra parte, el entorno de computación Cloud proporciona una mayor flexibilidad a la hora de contar con recursos de bajo coste, sin que se vea penalizado excesivamente el rendimiento.

4- Bibliografía.

- [1] – Aproximación basada en ciberinfraestructuras remotas y modelado para mejorar la gestión de la eutrofización en lagos y embalses. Agustín Pedro Monteoliva Herreras. Tesis Doctoral de la Universidad de Cantabria. Febrero de 2016.
- [2] - Anuario de datos foronómicos y de embalses. Año hidrológico 2010-11. Red oficial de estaciones de aforo (r.o.e.a.) comisaría de aguas.
- [3] – Portal de la Confederación Hidrográfica del Duero, embalse Cuerda del Pozo:
<http://www.chduero.es/Inicio/Infraestructuras/Losembalsesdelacuena/EmbalsedeCuerdadelPozo/tabid/229/Default.aspx>
Visitado: 21 Julio 2017
- [4] Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Versión: 3.15. Revisión: 14499. 12 de enero, 2011
- [5] - Delft3D-RGFGRID User Manual. Generation and manipulation of curvilinear grids for Delft3D-FLOW and Delft3D-WAVE. Version: 4.00.34074. 26 May, 2014
- [6] - Validation Document Delft3D-FLOW, a software system for 3D flow simulations. H. Gerritsen, E.D.de Goede, F.W. Platzek, J.A.Th.M. van Kester, M. Genseberger, R.E. Uittenbogaard. 12 September 2008, final
- [7]- <https://grid.ifca.es/wiki/Supercomputing/Userguide>
Visitado: 5 Agosto de 2017
- [8]- Data Management in a Cloud Framework: application to the LifeWatch ESFRI”. Fernando Aguilar. Tesis Doctoral de la Universidad de Cantabria. 2017.
- [9]- <http://fgw02.ncg.ingrid.pt/web/guest/lifewatch>
Visitado: 10 agosto de 2017
- [10] – <http://www.elaguapotable.com/Eutrofizacio.htm>
Visitada 15 septiembre de 2017
- [11] - Cook, F., & Rimmer, A. 2010. Chemical stratification in thermally stratified lakes: A chloride mass balance model (vol. 50, pg. 147, 2010). Limnology and Oceanography 55(3): 1463-1465.
- [12] - 3-D hydro-environmental simulation of Miyun reservoir, Beijin. Yuhui Wang, Yunzhong Jiang, Weihong Liao, Pin Gao, Xiaomin Huang, Hao Wang, Xinshan Song, Xiaohui Lei b. Journal of Hydro-environment Research 8 (2014) 383 – 395.