



***Facultad
de
Ciencias***

**ANÁLISIS DE UNA ESPECIE
AMENAZADA UTILIZANDO TÉCNICAS DE
OBSERVACIÓN DE LA TIERRA: UNA
APLICACIÓN DE DATA SCIENCE
(ANALYSING A THREATENED SPECIES
USING EARTH OBSERVATION TECHNIQUES:
A DATA SCIENCE APPLICATION)**

**Trabajo de Fin de Grado
para acceder al**

GRADO EN FÍSICA

Autor: Sergio Soler López

Director: Jesús Marco de Lucas

Co-Director: Francisco Pando de la Hoz

Junio - 2017

Agradecimientos

En primer lugar he de dar las gracias a Jesús Marco, el director de este proyecto, por toda la atención y el tiempo prestados y su buen carácter durante todo el proceso de elaboración del TFG, también he de dar las gracias a Francisco Pando por sus conocimientos y consejos en biología, de gran utilidad para el enfoque adecuado de este trabajo, y a Daniel García por su ayuda para generar el código para obtener las imágenes de los índices del Sentinel-2 y por estar siempre disponible cuando he necesitado ayuda.

También quiero dar las gracias a la Facultad de Ciencias, al Instituto de Física de Cantabria y a todos los profesores que he tenido en la carrera por todo lo que he podido aprender desde que empecé la carrera y por formarme como físico.

Por último también doy las gracias a la ciudad de Santander, ya que pese haber estado cuatro años lejos de casa siempre me he sentido como en casa o incluso mejor.

Resumen

En este trabajo se analiza un problema en el campo de la biodiversidad, las condiciones de los hábitats de especies amenazadas, usando un modelo que utiliza los datos de distribución comparándolos con las condiciones medioambientales. Se ha escogido el caso del sapo partero bético y se ha estimado su área de distribución utilizando un modelo de máxima entropía tomando tres conjuntos de datos bioclimáticos diferentes, y se han comparado los resultados con los que proporciona el informe de referencia SARE (Servidor de Anfibios y Reptiles de España), sobre esta especie, el *Alytes dickhilleni* Arntzen & García-París, 1995. En el primer caso se han considerado las variables climáticas y la elevación del terreno, de modosimilar al informe SARE, para tener una referencia propia, cómo asegura el buen resultado del modelo (AUC~0.99). La variable de mayor peso es la elevación (~37%) seguida a distancia de la precipitación del trimestre más frío (~19%).

Por otro lado, en el segundo y tercer caso, y cómo aportación original del trabajo, se han tomado exclusivamente variables obtenidas de la combinación de bandas del satélite de la ESA de Observación de la Tierra Sentinel-2: en el segundo caso se han tomado índices observados en el mes de agosto y en el tercer caso en el mes de abril. Los resultados obtenidos indican la posibilidad de utilizar solamente estos datos para estimar el hábitat más relevante para esta especie amenazada: AUC~0.96 en ambos casos, siendo las variables de mayor relevancia MNDWI (una variante del NDWI, Normalized Difference Water Index) y SR (Simple Ratio Index), con pesos diferentes en los dos casos, pero una contribución total cercana al 70%.

Los mapas obtenidos en los tres casos asociados a los modelos de distribución concuerdan con el modelo de referencia (SARE). El uso de las técnicas de Observación de la Tierra puede ser por tanto un buen complemento para extender este tipo de análisis a otras especies y territorios.

Palabras Clave: especies amenazadas, Sentinel-2, Maxent, área de habitabilidad, técnicas de observación de la Tierra, teledetección, *Alytes dickhilleni*.

Abstract

In this work we analyse a biodiversity problem, the threatened species habitat using a model that uses the distribution data and compare it with environmental variables. We have chosen the case of the Spanish midwife toad and we have estimated its distribution area by using a maximum entropy model taking three different bioclimatic data ensembles, and the results have been compared with the reference report SARE (Servidor de Anfibios y Reptiles de España), about this species, the *Alytes dickhilleni* Arntzen & García-París, 1995. In the first case, we have considered the climatic variables and the ground elevation, as the SARE report, in order to have a reference assuring a good model with $AUC \sim 0.99$. The most important variable was the elevation with ($\sim 37\%$) of importance followed by the rainfall in the coldest quarter ($\sim 19\%$).

On the other hand, in the second and third case, and as original idea to the work, we have taken just variables derived from the combination of the Sentinel-2 of ESA satellite bands: in the second case, we took the indices in August and in the third case in April. The results obtained show the possibility to use only those data to estimate the most relevant habitat for this threatened species: $AUC \sim 0.96$ in both cases, being the most important variables MNDWI (a variant from NDWI, Normalized Difference Water Index) and SR (Simple Ratio Index), with different weights in both cases, but with a total contribution near 70%.

The obtained maps in all the cases associated with the distribution models agree with the SARE reference. The use of Earth Observation Techniques can be a useful tool in order to extend this kind of analysis to other species or territories

Key words: threatened species, Sentinel-2, Maxent, distribution area, Earth observation techniques, satellite remote sensing, *Alytes dickhilleni*.

Tabla de contenido

Resumen.....	3
Abstract.....	4
Capítulo 1: Introducción.....	6
Introducción a las EBV.....	6
GLOBIS-B.....	7
COOP+.....	8
Fuentes de datos sobre especies amenazadas.....	8
Especies amenazadas.....	9
Categorías.....	9
El sapo partero bético (<i>Alytes dickhilleni</i>)	11
Amenazas para su supervivencia	12
Capítulo 2: Modelo de nicho ecológico	17
Modelo BAM.....	17
Modelo de distribución de especies.....	18
El modelo de máxima entropía	18
Programa Maxent.....	19
Capítulo 3: Teledetección.....	20
Corine Land Cover	23
SRTM.....	23
Sentinel-2.....	23
Índices usuales en teledetección	25
Capítulo 4: Implementación del modelo y resultados.....	28
Modelo del SARE.....	28
Caso 1: Elevación y variables climáticas.....	29
Caso 2: 33 Índices del Sentinel-2 en el mes de agosto.....	31
Caso 3: 33 índices mes de abril	33
Discusión	34
Capítulo 5: Mejoras del seguimiento para el futuro	35
Conclusión	37
Bibliografía.....	38
Apéndices.....	41
Apéndice 1.....	41
Apéndice 2.....	44

Capítulo 1: Introducción

El objetivo de este trabajo de fin de grado es intentar resolver problemas complejos relacionados con la biodiversidad utilizando avances computacionales e instrumentales que están transformando muchas áreas de la ciencia, un ejemplo de lo que se conoce como “Data Science” o Ciencias de Datos.

El problema propuesto se enmarca en la participación del IFCA en la iniciativa LifeWatch (www.lifewatch.eu), la primera infraestructura de investigación europea con sede en España, y cuyo fin es estudiar la biodiversidad de los ecosistemas.

El tema de las especies amenazadas es especialmente relevante y se está estudiando en dos proyectos europeos en marcha, GLOBIS-B y COOP+, en los que colaboran investigadores del Instituto de Física de Cantabria y del Real Jardín Botánico que han dirigido este proyecto.

La cuestión planteada es qué pueden aportar las nuevas medidas de observación de la Tierra, en concreto los satélites Sentinel-2 de la ESA, al estudio de las poblaciones de ecosistemas, en particular a las especies amenazadas como es el sapo partero bético.

Cabe destacar la complejidad de abordar este problema para un físico dado que hay que tratar muchos temas distintos, por ejemplo: situarse en el contexto del área de la biología, medio ambiente y biodiversidad; entender las nuevas técnicas de observación de la Tierra y compararlas con las tradicionales (Sentinel-2 vs información meteorológica y geográfica); también hay que entender la forma de acceder y manejar la información disponible, empleando herramientas como Google Earth Engine o sistemas de información geográfica (QGIS) [34] y un software específico para este caso como es Maxent [18].

En el primer capítulo de este proyecto se reseñan los proyectos citados anteriormente y se comentan las variables de biodiversidad esenciales, la Lista Roja de IUCN junto con sus criterios, y finalmente se hace una descripción del sapo partero bético y sus principales amenazas. Posteriormente en el capítulo segundo se introducen los conceptos de: nicho ecológico, modelo BAM, distribución de especies y el modelo de máxima entropía. En el capítulo 3 se comentan los fundamentos de la teledetección, así como los diferentes sistemas mediante los cuales podemos observar el estado de la superficie terrestre, finalmente se concluye con la explicación de los índices obtenidos de la combinación de bandas de los Sentinel-2 más relevantes en el modelo Maxent. En el capítulo cuarto se exponen los resultados de SARE y se comparan con los obtenidos ejecutando Maxent en 3 situaciones diferentes: con elevación y variables climáticas, y con los 33 índices que proporcionan los satélites Sentinel-2. En el capítulo 5 se proponen mejoras para un futuro en el seguimiento del sapo y concluimos.

Introducción a las EBV

Existen muchos datos de biodiversidad a nivel mundial, pero el reto más importante es poder analizar ese conocimiento para poder apreciar situaciones y tendencias. El concepto de variable esencial de la biodiversidad [1] (EBV) se ha introducido con el fin de estructurar los datos de monitoreo de la biodiversidad a nivel mundial y crear estándares para poder ser capaces de estudiar y manejar los datos con el menor número de variables posibles.

Para poder monitorizar toda la biodiversidad se han propuesto por GEOBON [2] un total de 22 EBVs divididas en 6 clases distintas: composición genética, poblaciones de especies, rasgos de especies, composición de las comunidades, funcionamiento del ecosistema y estructura del

ecosistema. Por tanto, con estas categorías se proporciona la información necesaria para investigar y manejar los datos.

La clase de EBV población de especies se describe mediante 3 EBVs: distribución de especies, abundancia de poblaciones y estructura de poblaciones. La distribución y la abundancia de las especies proporcionan indicadores para cuantificar la tendencia de las poblaciones y el riesgo de extinción por especies invasoras o cambio climático o del hábitat.

La distribución de especies se puede definir como la presencia o ausencia de especies basado en las observaciones con unas determinadas dimensiones espaciales y temporales, esta EBV se suele representar como una variable binaria que dice si hay o no hay presencia, además también se puede representar como una distribución de probabilidad del 0 al 100% como es el caso de los modelos de distribución de especies (SDM).

La abundancia de las poblaciones se define como los tamaños de las poblaciones basados en observaciones en unas determinadas dimensiones espacio-temporales. La mayoría de métodos estiman la densidad o abundancia relativas.

La distribución y la abundancia de especies son dos EBV que están íntimamente relacionadas. La abundancia de poblaciones contiene más información que la distribución, sin embargo, es más fácil recopilar datos de distribución que de abundancia de especies.

Debido a que el problema es muy complejo necesita ser abordado desde puntos de vista muy distintos, por ello un enfoque del problema que puede resultar de gran utilidad es el Data Science o Ciencia de Datos, que es un campo interdisciplinar que utiliza métodos científicos, sistemas, algoritmos y ecuaciones con el fin de poder entender mejor los datos y obtener nueva información.

Un problema de actualidad que se puede resolver desde el punto de vista de las ciencias de datos es estudiar los motivos por los que algunas especies están amenazadas, ya que el hecho de que la población de una especie esté disminuyendo puede ser debido a múltiples motivos, como por ejemplo un cambio del clima, del hábitat, actividad humana, contaminantes, etc. Para poder utilizar el Data Science en la resolución un problema es imprescindible disponer de bases de datos, las cuales albergan información de manera sistemática y ordenada de un conjunto de datos que pertenecen a un mismo tema.

Desde el departamento de Computación Avanzada del Instituto de Física de Cantabria se colabora en proyectos internacionales como GLOBIS-B o COOP+ con el fin de entender mejor la razón por la cual muchas especies están amenazadas, además de tratar de unificar los datos de biodiversidad, ya que los datos se encuentran en muchos organismos y asociaciones, y en ocasiones la información está incompleta.

GLOBIS-B

El objetivo del proyecto GLOBIS-B [2] es fomentar la cooperación en investigación en biodiversidad con el fin de implementar y calcular las variables esenciales de biodiversidad (EBVs). El concepto de EBVs ha sido introducido por GEOBON [2], que es un grupo de observación de biodiversidad. Las EBV son necesarias para estudiar, informar y gestionar los cambios en la biodiversidad con el fin de monitorizarla adecuadamente para poder tomar las medidas adecuadas para evitar su deterioro o incluso su desaparición.

GLOBIS-B es un proyecto financiado por la Comisión Europea dentro del programa Horizon 2020 por un periodo de 36 meses, de junio de 2015 a mayo de 2018. El proyecto pretende identificar los datos necesarios, herramientas, metodologías y posibles problemas legales para crear una agenda para investigar y crear infraestructuras para poder computar las EBVs.

El proyecto se centra en los datos relacionados con la distribución y abundancia de especies, rasgos ecológicos e interacción de especies. Los distintos grupos tratan de identificar las claves para poder calcular y testear las EBVs, y como la cooperación global puede mejorar los conocimientos en biodiversidad y EBVs.

COOP+

El objetivo principal de COOP+ es reforzar las conexiones y la coordinación de las infraestructuras relacionadas con el fin de crear un marco común para el desarrollo de investigación en biodiversidad y temas ambientales.

Los Global Challenges se definen como problemas mundiales que se pretenden resolver con ayuda de infraestructuras de investigación (por ejemplo, LifeWatch), para poder entender bien el problema e identificar los métodos más eficaces, y mejorar los servicios para una buena comunicación entre científicos y las distintas administraciones.

Este trabajo de fin de grado pretende contribuir al Global Challenge 4 de COOP+ (“Global monitoring of distribution and demography of threatened species using distributed Research Infrastructures”). En los últimos tiempos las poblaciones de muchas especies están disminuyendo, además contamos con el problema de que hay mucha ausencia de datos. Por ello en este trabajo se pretende contribuir a una mejora de los modelos de distribución de especies introduciendo todas las variables de remote sensing del Sentinel-2 de la ESA, y por tanto aportar otro enfoque en el seguimiento de las poblaciones de especies.

Fuentes de datos sobre especies amenazadas

El portal IUCN contiene una base de datos donde se almacena información y descripción de las distintas especies amenazadas en el mundo, clasificándolas desde sin peligro hasta extintas. Una clase de animal muy sensible a los cambios ambientales y del hábitat son los anfibios, por ello si estudiamos las causas por las cuales decrece una población de anfibios podemos determinar las causas por las cuales se está degradando un determinado hábitat, y viceversa.

Si miramos en la IUCN, la lista de anfibios que están en peligro en España, podemos ver como la especie del *Alytes dickhilleni* (sapo partero bético) está clasificada como vulnerable [3] y su población está decreciendo. Este sapo se encuentra en un área relativamente grande en el sur de España (ver Figura 1), por ello, si analizamos el cambio en la distribución de la especie podremos averiguar cómo está cambiando el entorno.

También cabe destacar como fuente de datos GBIF (Global Biodiversity Information Facility) [4], que es una red de bases de datos intercomunicadas a nivel mundial donde se registran las presencias de las especies observadas o recogidas para colecciones, y el momento y lugar correspondiente. En el caso del sapo partero bético la información que figura en GBIF procede de las siguientes fuentes: El Inventario Español de Especies Terrestres, Inventario Nacional de Biodiversidad, El Museo Nacional de Ciencias Naturales, la Fonoteca Zoológica y una Estación Experimental de Zonas Áridas. Cabe destacar que los registros posteriores al 2006 están incompletos o no se han actualizado.

Para este trabajo se tomará como área de habitabilidad del sapo partero bético la que proporciona el Servidor de Información de Anfibios y Reptiles de España (SIARE) [5], ya que cubre todas las casillas 10x10km en UTM donde se han dado registros del sapo históricamente. Además desde esta página podemos descargar un archivo “.kml” para poder visualizar en un sistema de información geográfica estas casillas, cómo se verá en apartados posteriores.

Especies amenazadas

La Lista Roja de IUCN tiene varios fines específicos para catalogar las especies amenazadas, entre los que destaca: el hecho de aportar un sistema capaz de ser empleado por diferentes personas y organismos, mejorar la objetividad y ofrecer una guía detallada de como poder evaluar adecuadamente los distintos factores que pueden conducir a la extinción de una especie, ofrecer un sistema que facilite comparaciones entre taxones de manera amplia o proporcionar a las personas que se encuentran utilizando listas de especies amenazadas una adecuada comprensión de cómo fue clasificada la especie.

Categorías

Extinto (EX): se dice que un taxón está extinto cuando no queda duda de que el último individuo existente ha fallecido, esto se determina tras realizar prospecciones exhaustivas en su hábitat y a lo largo de su distribución histórica en periodos de tiempo apropiados al ciclo y forma de vida de la especie.

En estado silvestre (EW): este término se aplica cuando solo sobrevive en cautividad o en poblaciones naturalizadas fuera de su distribución original, al igual que en el caso anterior previamente se habrá hecho un estudio exhaustivo en su zona de distribución habitual en un periodo de tiempo ajustado a su ciclo de vida.

En peligro crítico (CR): se aplica esta clasificación a las especies que cumplen cualquiera de los 5 requisitos para peligro crítico, lo que implica que tiene un extremadamente alto riesgo de extinción en estado silvestre, en la tabla 1 se detallan los diferentes criterios y umbrales.

En peligro (EN): un taxón se considera en peligro cuando hay evidencias de que cumple cualquiera de los criterios que se indican en la tabla 1 para en peligro, por tanto, se enfrenta a un muy alto riesgo de extinción en estado silvestre.

Vulnerable (VU): un taxón es vulnerable cuando la mejor evidencia disponible indica que cumple cualquiera de los criterios que se detallan en la tabla 1 para vulnerable, por tanto, se enfrenta a un riesgo de extinción alto en estado de vida silvestre.

Casi amenazado (NT): se clasifica en esta categoría a los taxones que aun habiendo sido evaluados no cumplen ninguno de los criterios para ser clasificados como en peligro, en peligro crítico o vulnerable.

Preocupación menor (LC): un taxón se clasifica en esta categoría cuando tras haber sido evaluado según los criterios de la lista no cumple con los requisitos para ser clasificado como en peligro crítico, el peligro, vulnerable o casi amenazado, por tanto en esta categoría se incluyen taxones abundantes y con amplia distribución.

Datos insuficientes (DD): no hay información adecuada o suficiente para poder hacer una evaluación del riesgo de extinción basándose en su abundancia o distribución, por tanto, esta categoría no implica que la especie esté amenazada.

No evaluado (NE): un taxón no está evaluado cuando aún no ha sido clasificado según los criterios anteriores.

A. Reducción del tamaño poblacional. Reducción del tamaño de la población basada en cualquiera de los subcriterios A1 a A4. El nivel de reducción se mide considerando el período más largo, ya sea 10 años o 3 generaciones.			
	En Peligro Crítico	En Peligro	Vulnerable
A1	≥ 90%	≥ 70%	≥ 50%
A2, A3 & A4	≥ 80%	≥ 50%	≥ 30%
A1 Reducción del tamaño de la población observada, estimada, inferida o sospechada, en el pasado donde las causas de la reducción son claramente reversibles Y entendidas y conocidas Y han cesado. A2 Reducción del tamaño de la población observada, estimada, inferida o sospechada, en el pasado donde las causas de la reducción pudieron no haber cesado O no ser entendidas y conocidas O no ser reversibles. A3 Reducción del tamaño de la población que se proyecta, se infiere o se sospecha será alcanzada en el futuro (hasta un máximo de 100 años) [(a) no puede ser usado]. A4 Reducción del tamaño de la población observada, estimada, inferida, proyectada o sospechada donde el período de tiempo considerado debe incluir el pasado y el futuro (hasta un máx. de 100 años en el futuro), y donde las causas de la reducción pueden no haber cesado O pueden no ser entendidas y conocidas O pueden no ser reversibles.		(a) observación directa [excepto A3] (b) un índice de abundancia apropiado para el taxón (c) una reducción del área de ocupación (AOO), extensión de presencia (EOO) y/o calidad del hábitat (d) niveles de explotación reales o potenciales (e) como consecuencia de taxones introducidos, hibridación, patógenos, contaminantes, competidores o parásitos	
Con base en y especificando cualquiera de los siguientes puntos:			
B. Distribución geográfica representada como extensión de presencia (B1) Y/O área de ocupación (B2)			
	En Peligro Crítico	En Peligro	Vulnerable
B1. Extensión de presencia (EOO)	< 100 km ²	< 5.000 km ²	< 20.000 km ²
B2. Área de ocupación (AOO)	< 10 km ²	< 500 km ²	< 2.000 km ²
Y por lo menos 2 de las siguientes 3 condiciones:			
(a) Severamente fragmentada, O Número de localidades	= 1	≤ 5	≤ 10
(b) Disminución continua observada, estimada, inferida o proyectada en cualesquiera de: (i) extensión de presencia; (ii) área de ocupación; (iii) área, extensión y/o calidad del hábitat; (iv) número de localidades o subpoblaciones; (v) número de individuos maduros			
(c) Fluctuaciones extremas en cualesquiera de: (i) extensión de presencia; (ii) área de ocupación; (iii) número de localidades o subpoblaciones; (iv) número de individuos maduros			
C. Pequeño tamaño de la población y disminución.			
	En Peligro Crítico	En Peligro	Vulnerable
Número de individuos maduros	< 250	< 2.500	< 10.000
Y por lo menos uno de C1 o C2			
C1. Una disminución continua observada, estimada o proyectada (hasta un máximo de 100 años en el futuro) de al menos:	el 25% en 3 años o 1 generación (lo que fuese más largo)	el 20% en 5 años o 2 generaciones (lo que fuese más largo)	el 10% en 10 años o 3 generaciones (lo que fuese más largo)
C2. Una disminución continua observada, estimada, proyectada o inferida Y por lo menos 1 de las siguientes 3 condiciones:			
(a) (i) Número de individuos maduros en cada subpoblación	≤ 50	≤ 250	≤ 1.000
(ii) % de individuos en una sola subpoblación =	90–100%	95–100%	100%
(b) Fluctuaciones extremas en el número de individuos maduros			
D. Población muy pequeña o restringida			
	En Peligro Crítico	En Peligro	Vulnerable
D. Número de individuos maduros	< 50	< 250	D1. < 1.000
D2. Solo aplicable a la categoría VU Área de ocupación restringida o bajo número de localidades con una posibilidad razonable de verse afectados por una amenaza futura que podría elevar al taxón a CR o EX en un tiempo muy corto.	-	-	D2. típicamente: AOO < 20 km ² o número de localidades ≤ 5
E. Análisis Cuantitativo			
	En Peligro Crítico	En Peligro	Vulnerable
Indica que la probabilidad de extinción en estado silvestre es:	≥ 50% dentro de 10 años o 3 generaciones, lo que fuese más largo (100 años max.)	≥ 20% dentro de 20 años o 5 generaciones, lo que fuese más largo (100 años max.)	≥ 10% dentro de 100 años

Tabla 1: Criterios que sirven para clasificar un taxón en peligro crítico, en peligro o vulnerable, con cumplir uno de ellos (A a E) basta para clasificar en dicha categoría [6], el sapo partero bético se clasifica como vulnerable B2ab(iii,iv) [3], lo que indica un bajo número de poblaciones y una disminución de su área.

El sapo partero bético (*Alytes dickhilleni*)

El sapo partero bético es una especie endémica de los sistemas montañosos del sureste de España. Se encuentra en la Sierra de Alcaraz (Albacete), Sierras de Revolcadores y Espuña (Murcia), donde se encuentra su mayor número (82%) es en las sierras béticas andaluzas, tales como: Segura, Cazorla, Castril, Mágina, Filabres, Sierra Nevada, Baza, Gádor, María, Tejeda y Almijara. En la figura 1 se representa el área donde habita el *Alytes dickhilleni* representado por cuadrículas de 10x10 km en UTM.

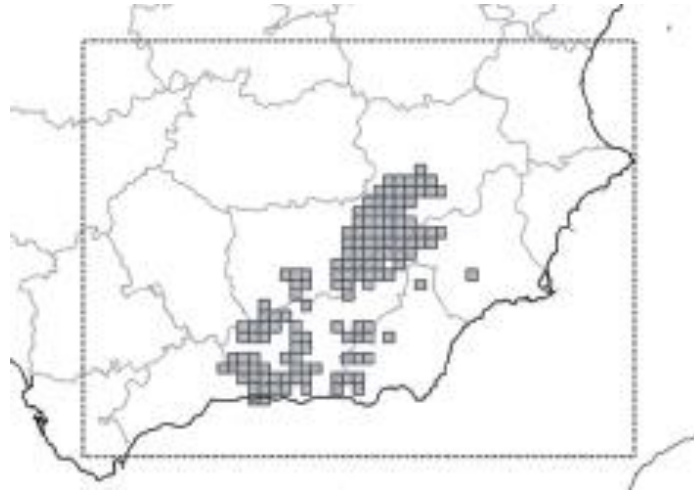


Figura 1: Representación del área donde habita el *Alytes dickhilleni*, según el informe de García-París donde se describía esta especie [7].

Existen más tipos de sapos del género *Alytes* en la península además del *A. dickhilleni*, como son: el *A. obstetricans*, *A. muletensis* y *A. cisternasii*. Una característica que los *Alytes* es su modo de reproducción, ya que el sapo macho porta los huevos fertilizados durante un mes hasta que las larvas están completamente desarrolladas, es entonces cuando se acerca a zonas con agua para depositarlas, lo que convierte a este género en el único de los sapos que realiza un cuidado de su descendencia [7].



Figura 2: Macho de sapo partero bético portando los huevos pocos desarrollados en la Sierra de Cazorla [8].

Principalmente se encuentra en sistemas montañosos, pero también es posible encontrarlos al nivel del mar casi en las provincias de Málaga y Granada. Para su reproducción y desarrollo de larvas utilizan puntos de agua de sus áreas de distribución, naturales y artificiales. El tiempo que tardan las larvas en hacerse adultos varía entre los 3 y los 16 meses, lo que los hace bastante vulnerables. El tiempo varía significativamente dependiendo de la altura y las temperaturas, en las zonas altas de montaña, donde se registran las temperaturas más bajas, se dan los mayores tiempos de desarrollo.

El área común natural de reproducción la constituyen las charcas y arroyos de montaña, pero también es común encontrarlos en medios artificiales como pueden ser abrevaderos, albercas, fuentes o aljibes. Esta especie es muy dependiente del hombre, ya que especialmente en las sierras más secas como Gádor o Filabres las construcciones artificiales del hombre son imprescindibles, ya que los arroyos permanentes son muy escasos o han sido canalizados, por tanto, sin el correcto mantenimiento de esos sistemas es inviable la supervivencia del sapo en esas zonas.

Es de interés el estudio de esta especie para determinar cuáles son sus principales amenazas ya que se trata de una especie amenazada catalogada como vulnerable en la IUCN [3]. Los principales problemas que presentan son: una alta fragmentación demográfica y aislamiento genético, lo que dificulta el contacto entre diferentes poblaciones, además también hay que considerar que las distintas poblaciones cuentan con muy pocos individuos reproductores. Otro aspecto a considerar es que esta especie es muy dependiente de los puntos de agua presentes, la mayoría creados por el hombre, y muchos de ellos se están perdiendo por abandono del pastoreo o modificaciones que impiden que los sapos se reproduzcan en él.

Amenazas para su supervivencia

Depredadores

El depredador más destacado es una culebra de agua, la *Natrix maura* que es capaz de matar a todas las larvas de un abrevadero en unos pocos días, no obstante, es escasa y puntual, pero se puede encontrar en toda el área donde habita el sapo como se puede apreciar en la figura 3.

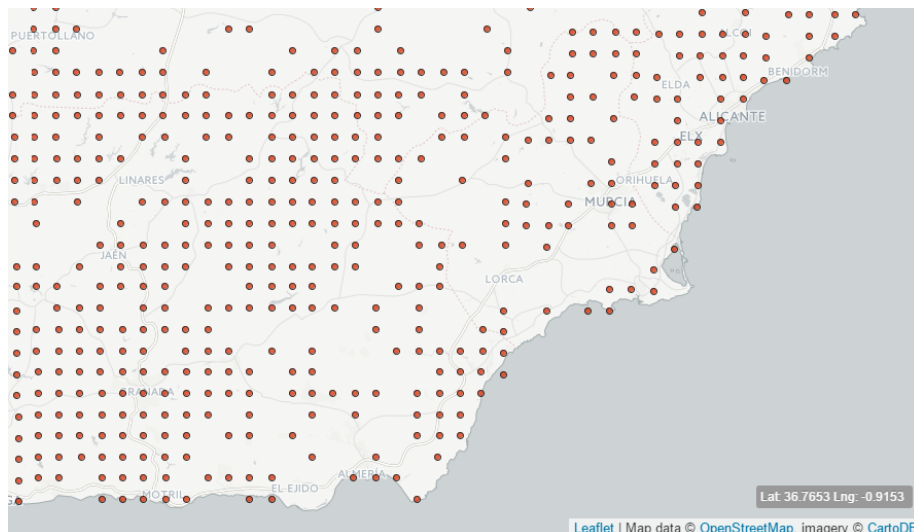


Figura 3: Zona de distribución de la culebra de agua, datos de 2006 de GBIF.es [10], cada punto representa una cuadrícula de 10x10 km en coordenadas UTM, el mismo formato que hay en la figura 1.

Además de la serpiente mencionada anteriormente también existen otros depredadores naturales tales como las larvas de otros anfibios, como por ejemplo la salamandra, peces como las carpas o el jabalí.

Quitridiomycosis

Una de las principales amenazas de los anfibios en España es la aparición de la quitridiomycosis [9], se trata de una enfermedad causada por el hongo (*Batrachochytrium dendrobatidis*), este hongo se reproduce por zoosporas acuáticas que liberan en el agua e infectan a las larvas y a los adultos, las mortalidades más altas se dan al final de la metamorfosis. En general se desarrolla mejor en temperaturas frescas y muere a altas temperaturas. En las zonas de clima templado las zonas más favorables para su desarrollo son las zonas de montaña, por ello es tan peligroso este hongo para el sapo partero bético, ya que su área de habitabilidad es idónea para el desarrollo de este hongo.

El hongo responsable de la quitridiomycosis presenta una gran complejidad en su interacción con los factores bióticos y abióticos que condicionan la enfermedad. La intensidad de la infección también varía mucho con en función de la fase de desarrollo de los individuos, en concreto la metamorfosis es la parte más crítica porque coincide con la expansión de la queratina por toda la piel del ejemplar y con la supresión de su sistema inmune.

El *Alytes* es el taxón más frágil a esta enfermedad, pero además sus larvas se comportan como hospedadores de la enfermedad y la pueden transmitir a otras especies o a la siguiente generación de larvas, en el caso de las invernantes por transmisión directa. Esto se debe al largo periodo larvario, ya que las larvas infectadas del *Alytes dickhilleni* pueden infectar a otras especies, además, también depende del tipo de hábitat, y el hidroperiodo (tiempo en el que hay agua en un determinado lugar). Por ejemplo, en los arroyos las esporas del hongo son arrastradas por la corriente, mientras que en zonas de agua estancada es más fácil la infección al alcanzarse concentraciones más altas, también hay que considerar que si una charca está expuesta a la radiación solar se calentará y por tanto este hecho puede hacer disminuir la infección si se supera la temperatura de reproducción del hongo, esto hace que las larvas invernantes mueran al final de la metamorfosis, mientras que las que viven en arroyos o charcas temporales no lo hagan.

Los tres factores abióticos más relevantes para la proliferación del hongo son la radiación ultravioleta, el agua y sobretodo la temperatura. La prevalencia de la infección en el *Alytes obstetricans*, un pariente cercano del *A. dickhilleni*, es inversamente proporcional a la cantidad de radiación ultravioleta, y la mortalidad aumenta considerablemente en áreas de montaña con bajas temperaturas mínimas. La radiación destruye las zoosporas del hongo.

Una hipótesis de la aparición de este patógeno es la del “patógeno endémico”, es decir, siempre ha estado ahí, es una razón que explicaría el hecho de que haya aparecido en muchos lugares distintos a la vez. Esto podría deberse a que un cambio en las condiciones climáticas podría estar impulsando su desarrollo. Por ejemplo, antes de las epidemias suele haber un aumento notable de la temperatura y de la humedad, así como del número de días soleados del verano, que es cuando tiene lugar la metamorfosis y los anfibios son más vulnerables. Por tanto, los efectos del calentamiento global están aumentando el número de días con temperaturas en los que el desarrollo del patógeno es óptimo, esto también ayudaría a su expansión a las zonas de montaña.

Existe la posibilidad de que los anfibios se vayan adaptando al patógeno, no obstante, si sucede, este proceso será largo y en el transcurso pueden desaparecer muchas especies como el *Alytes dickhilleni*. También hemos de considerar que recientemente algunos informes indican que la expansión de la quitridiomycosis podría darse debido a la propagación por parte de las aves acuáticas que viajan por distintas charcas y transportan el hongo a zonas sanas [36][37].

Por último, cabe destacar que además del hongo de la quitridiomycosis, existen otros como el *Batrachochytrium salamandrivorans*, que es originario de Asia y que ha sido introducido en Europa debido al comercio internacional de mascotas, en concreto tritones del género *Cynops*, y ha provocado declives en la población de salamandras en el norte de Europa, y si llega a España probablemente pueda suponer una amenaza para los *Alytes*. También se está registrando una expansión de otro patógeno, el *Ranavirus*, que puede acabar con poblaciones enteras.

Afortunadamente en España solo hay 3 focos localizados donde se encuentra el hongo de la quitridiomycosis en la sierra de Tejeda y en Cazorla, pero debido a que las condiciones ambientales son muy favorables en las sierras del sureste de España, este hongo podría propagarse a más zonas de cría.

En la figura 3 se adjunta una imagen con las principales zonas afectadas.

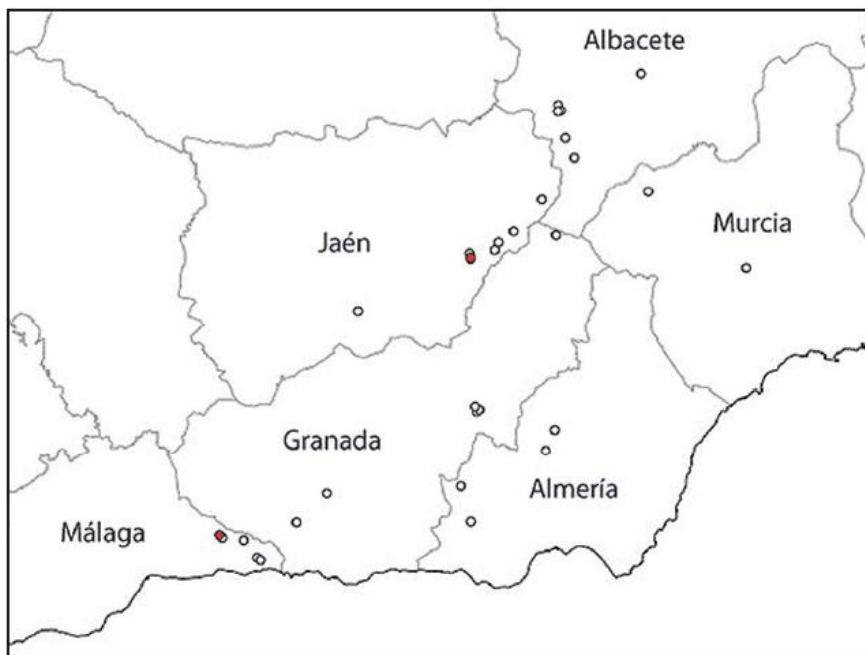


Figura 4: Los puntos blancos son las diferentes zonas donde se han realizado los muestreos, y los puntos rojos son lugares donde el resultado ha sido positivo [7].

Tiempo de metamorfosis

Otro factor que amenaza al sapo es el hecho de que en esas zonas las precipitaciones pueden llegar a ser muy irregulares desde 300 a 1500mm de lluvia anuales, el hecho de que haya larvas que necesiten más de 1 año para desarrollarse implica que esos puntos han de tener obligatoriamente agua todo el año.

Transformación del hábitat

Las principales causas por las que se está viendo afectado el hábitat del sapo partero bético están relacionadas con la actividad humana. Entre las más perjudiciales destaca: la transformación de los abrevaderos tradicionales por unos nuevos, pero más inaccesibles para los sapos, o los aljibes y albercas tradicionales que se han sustituido por balsas de plástico o muros de cemento, dificultando la entrada y salida de los sapos de los mismos. Otro problema es que se están abandonando muchas zonas de pastoreo de montaña, esto hace que se deterioren los abrevaderos, impidiendo en algunos casos el almacenamiento de agua.

Además, muchas zonas naturales están siendo transformadas en olivares, principalmente en Jaén y Granada, también cabe destacar el hecho de que en el siglo pasado hubo muchas repoblaciones de pinos, lo que representa un alto riesgo de incendio, además de que son más susceptibles a plagas que otros árboles, y los plaguicidas utilizados pueden perjudicar al sapo.

Las poblaciones donde habita el sapo están aisladas y además cuentan con pocos ejemplares adultos, muchas carreteras o caminos pasan por las zonas del sapo partero bético y anualmente se registran atropellos, se estima que este problema tan solo es relevante en la carretera Alfacar-Víznar, en Granada. Sin embargo, otro estudio [11] ha hecho 12 tramos quincenales entre marzo y agosto de 2014 y no se ha registrado ningún ejemplar atropellado.

Por último, cabe destacar la amenaza del cambio climático, ya que cada vez se prevé que haya menos precipitaciones y que haya un aumento de las temperaturas, secando muchos puntos de cría.

En la figura 5 se puede ver la variación que ha experimentado la cubierta vegetal en el periodo 2006-2012, el hecho más destacable consiste en la proliferación de nuevos olivares o la creación de una planta de energía solar, este hecho puede ser nocivo para la supervivencia del sapo si se crean en sus zonas de cría. No todos los lugares en los que vive el sapo son parques naturales, los lugares que no gozan de esta condición tienen más probabilidades de degradarse por el impacto de la mano del hombre.

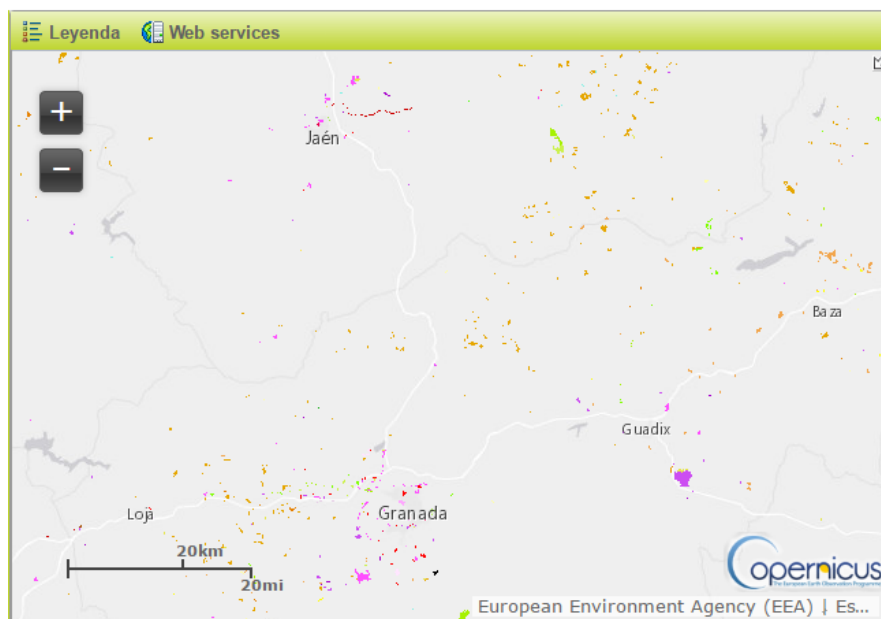


Figura 5: los colores anaranjados son las zonas donde se han plantado nuevos olivares, la mancha violeta cerca de la localidad granadina de Guadix es la planta solar [12].

Incendios

Como ya se comentó con anterioridad la presencia de pinos agrava el riesgo de incendio. A través de imágenes satelitales se puede ver las zonas que se han quemado, además también existen algunos mapas, como este creado por la Universidad de Maryland [9] donde podemos ver directamente la superficie quemada entre 2000 y 2014.



Figura 6: Las áreas marcadas en rojo muestran las áreas afectadas por incendios entre los años 2000-2014 [13].

Capítulo 2: Modelo de nicho ecológico

El nicho ecológico según Hutchinson es el hipervolumen n -dimensional en el cual cada punto se asocia a un estado del ambiente que es capaz de permitir que las poblaciones de una especie puedan existir de forma indefinida [14], es decir, son el conjunto de condiciones ambientales, bióticas y abióticas, en las que una especie puede sobrevivir indefinidamente sin necesidad de inmigración, es decir, introducción de nuevos ejemplares. Si conseguimos definir el nicho ecológico para una especie podemos ver toda su área potencial de vida, aun cuando no esté aún instalada en dicha área.

En primer lugar, disponemos de unas variables ambientales de una región, se puede extrapolar a otras, y de una zona de distribución (espacio geográfico). Con esa información se puede pasar al espacio ecológico desde el cual se pueden utilizar distintos algoritmos para modelar dicho nicho y finalmente regresar al espacio geográfico otra vez mostrando su potencial área de distribución, ver figura 7.

El modelado de nichos ecológicos a través del espacio

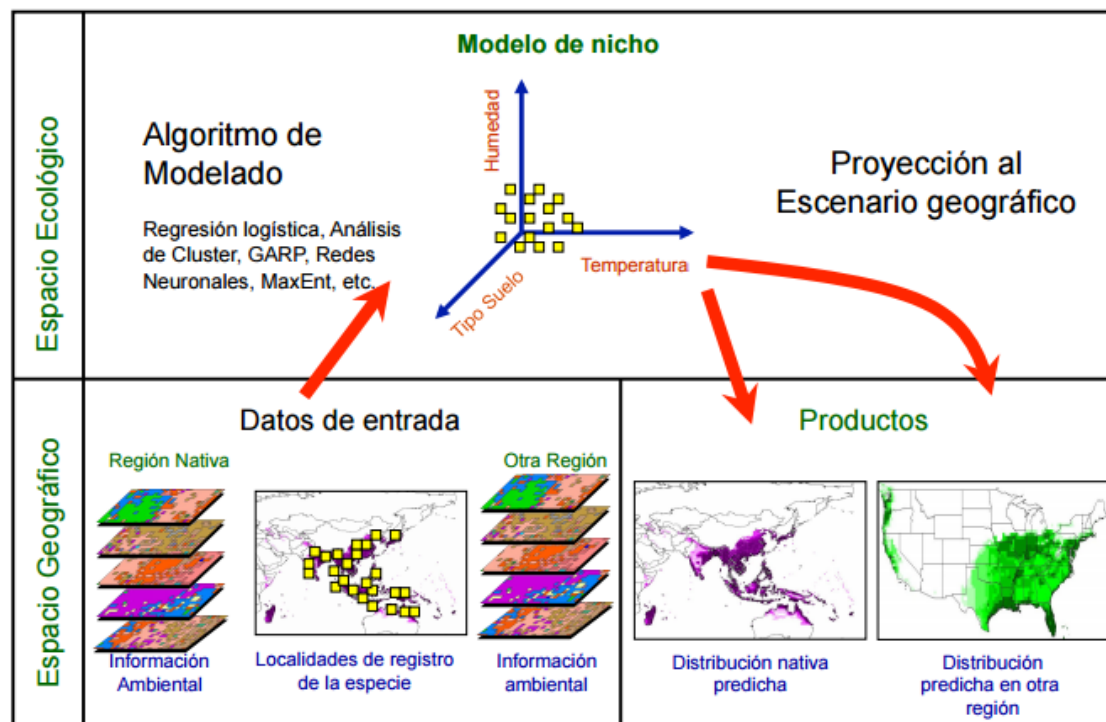


Figura 7: Diagrama representativo de cómo se obtiene el área potencial de distribución de una especie a partir de las variables ambientales y de registros de la especie pasando del espacio geográfico al ecológico [14].

Modelo BAM

A continuación, y en relación al modelo de nicho ecológico es interesante introducir el modelo BAM [15]. Es un diagrama donde se hace una representación abstracta del espacio geográfico, la región del mundo donde están las variables ambientales que permiten la supervivencia y reproducción de la especie (nicho fundamental) se denota con la letra A y se mide utilizando variables scenopoéticas, que son las condiciones medioambientales que permiten a las especie

sobrevivir, por ejemplo la temperatura en meses invernales, que si baja de una determinada temperatura puede afectar la supervivencia de la especie.

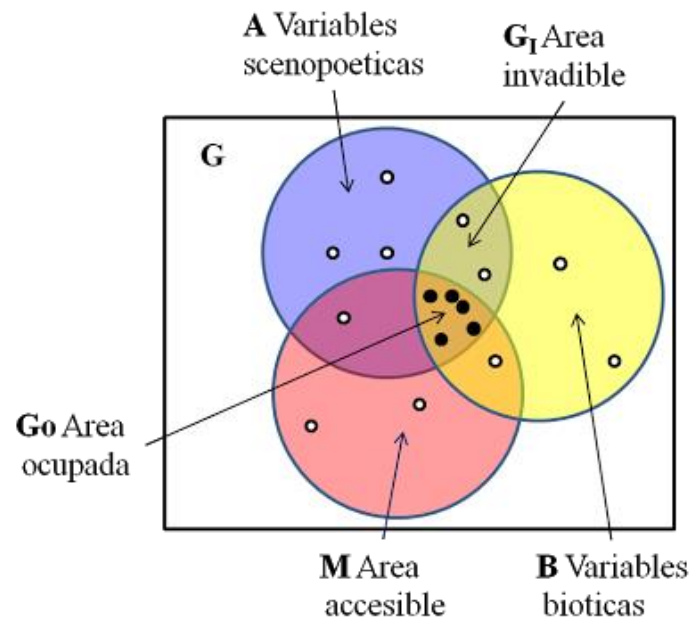


Figura 8: Representación del modelo BAM.

Otra región del diagrama BAM es la B, que es el ambiente biótico adecuado para la especie, es decir, los lugares donde los competidores no son capaces de excluir a la especie. Por último la M hace referencia al área accesible a los lugares donde vive o ha vivido la especie.

Estas zonas que se han definido sirven para definir el área ocupada G_0 , que es la zona en la que habita la especie y se define como la intersección de las tres áreas BAM, el área invadible es la intersección de A y B – M, es decir, es una zona con condiciones favorables para el desarrollo de la especie, pero no accesible por diferentes motivos, tales como la existencia de barreras o un tiempo insuficiente para expandirse.

Modelo de distribución de especies

Dentro de este contexto, los modelos de distribución de especies (SDMs) son herramientas matemáticas que combinan observaciones o abundancias de especies con estimaciones ambientales [16]. Estos modelos se utilizan con el fin de predecir la distribución espacial de las especies, extrapolando las condiciones necesarias del hábitat conocido. Estos modelos sirven para comprender el comportamiento y como se distribuye una especie en una determinada región.

El modelo de máxima entropía

Una eficaz manera de representar el área de habitabilidad de una especie cuando solo tenemos algunas coordenadas de presencia y algunas variables es aplicar el modelo de máxima entropía [17] con ayuda de un programa informático.

Se tiene un determinado espacio finito X representando una zona geográfica, el espacio X viene representado en una cuadrícula discreta. Además también tenemos puntos $x_1, \dots, x_n$ en X representando las coordenadas geográficas de una determinada especie en ese lugar geográfico X. Finalmente también tenemos una serie de variables que tienen un determinado valor para cada una de las casillas de la cuadrícula X.

Con los datos anteriores el objetivo consiste en determinar el área potencial de habitabilidad de una especie en el espacio geográfico. La especie se distribuye en X con una determinada distribución de probabilidad π que desconocemos a priori, por tanto, si se consigue estimar π tendremos la distribución potencial de la especie. Es decir, el problema consiste en conseguir una distribución π' que aproxime lo mejor posible la distribución π . Para construir π' es necesario que todas las f capas que contienen las variables que condicionan el modelo tengan todas las mismas coordenadas geográficas, por ejemplo, cuadrículas 1x1km en WGS84, que es un tipo de estándar utilizado en cartografía representando la superficie terrestre como un elipsoide.

Pueden existir distintas distribuciones que satisfagan estas condiciones, el principio de máxima entropía dice que entre todas las distribuciones posibles la mejor es la de máxima entropía. La entropía S de una distribución p en X se define como

$$S(p) = -\sum_{x \in X} p(x) \ln p(x) \quad (1)$$

En resumen, el programa identifica los valores de las distintas capas donde se tiene la posición en coordenadas geográficas de una especie para todo el espacio X, después, con esa información busca la distribución de probabilidad que cumpla el principio de máxima entropía y asigna a cada una de las casillas un valor del 0 al 1 de probabilidad según convenga.

Programa Maxent

El programa Maxent [18] es un software de libre distribución que sirve para calcular la distribución de una especie basándose en el principio de máxima entropía, tan solo necesitamos un archivo '.csv' (comma separated values) indicando la especie, longitud y latitud y unas capas en formato ASCII con unos valores fijados para cada celda dentro de la región donde queremos calcular la distribución de la especie. Las capas ambientales se pueden obtener, por ejemplo, desde Worldclim donde se proporciona información de las variables climáticas de todo el planeta en unas resoluciones de hasta 30' de arco o 1km, esta información se ha obtenido por interpolación "thin plate splines" [19] de datos de estaciones meteorológicas esparcidas por todo el planeta. Worldclim proporciona un mapamundi dividido en celdas desde las cuales podemos descargar la información [20] necesaria con las capas a aplicar para modelar la distribución del *Alytes dickhilleni*.

El programa Maxent devuelve un fichero en formato ASCII, el cual se puede meter en un sistema de información geográfica (SIG) desde el cual se puede visualizar mejor los resultados, en el apéndice dos se detalla el proceso. Además, el programa también es capaz de proporcionarnos unas curvas de respuesta donde se puede ver la probabilidad de presencia de una especie según los valores de las capas que hemos introducido previamente, en el eje X se ve el valor de la variable y en el eje y se ve la probabilidad para dicho punto Cloglog, el ajuste Cloglog deriva de un Proceso Poissoniano Inhomogeneo IPP [21]. Un IPP es un modelo que se utiliza cuando tenemos un conjunto Z de puntos aleatorios dentro de un determinado espacio D. En el modelo de distribución de especies Z son las ocurrencias de los individuos y D es el área geográfica en cuestión. El IPP se puede definir por una función de intensidad I la cual asigna valores positivos I(z) a cada z en D. La densidad de probabilidad dentro del dominio D puede escribirse como:

$$p_{\lambda}(z) = \frac{\lambda(z)}{\int_D \lambda(z) dz} \quad (2)$$

Donde $\lambda(z) = \exp(\alpha + \beta' x(z))$. La probabilidad del IPP es la misma que la del Maxent, porque p(I) es la distribución exponencial del Maxent.

Capítulo 3: Teledetección

Un sistema de teledetección espacial se compone de los siguientes elementos [22]: el primero lo podemos definir como la fuente de energía, es decir, de donde proviene la energía que le permite funcionar, la más común es la solar. El siguiente elemento a considerar en la teledetección es la cobertura terrestre, constituida por vegetación, agua, suelos, etc. Cada una de las distintas superficies emite una energía distinta dependiendo de sus propiedades. Finalmente se necesita un intérprete para traducir la señal de la información recibida en información útil.

Los sensores remotos captan la radiación electromagnética que refleja o emite la superficie terrestre para poder caracterizarla. Los sensores remotos en satélites permiten obtener imágenes asociadas a diferentes bandas espectrales mostrando el porcentaje de reflectancia en cada banda, a partir de las cuales se puede obtener mucha información como: estado de la vegetación, cobertura nubosa, temperatura, humedad, etc. Las principales misiones de satélites de teledetección son Landsat (NASA), y Sentinel (ESA).

La información obtenida por satélites se procesa mediante sistemas de información geográfica (SIG), por lo que es una herramienta importante cuando se trabaja con sistemas de teledetección.

Para definir la resolución de un sensor, es decir, el detalle con el que puede dar información, hay que concretar los cuatro tipos de resolución que existen, en primer lugar la resolución espacial se refiere al objeto más pequeño que es capaz de distinguir el sensor, es decir, la mínima separación que ha de existir entre dos objetos para que se puedan distinguir. Otro tipo de resolución es la resolución espectral, que hace referencia al número y ancho de las bandas espectrales que el sensor es capaz de discernir en el espectro electromagnético. La resolución temporal hace referencia a la frecuencia con la que un determinado sensor remoto cubre una determinada zona, este tiempo puede variar considerablemente, en el caso de las imágenes satelitales esta resolución tiene el orden de magnitud de días. Por último, la resolución radiométrica es la que se encarga de detectar variaciones en la radiancia espectral, esto va asociado al máximo número de niveles digitales. Es decir, cuanto mayor sea más colores o tonalidades de gris podremos distinguir en la imagen.

Existen dos tipos de sensores remotos [23], los activos y los pasivos, los pasivos registran la radiación reflejada o emitida por la superficie, un ejemplo de los sensores de este tipo son los satélites como los Landsat de la Nasa o los Sentinel de la ESA, mientras que por el contrario los activos generan la radiación que miden tras ser reflejada, un ejemplo de este tipo de satélites son los radares o lidar (análogo al radar, pero con tecnología láser).

Según el tipo de barrido que haga el sensor sobre el área de estudio se puede distinguir entre los de no barrido (not-scanning), los cuales registran la radiación reflejada en un determinado momento, y los de barrido (scanning), los cuales hacen una adquisición secuencial de imágenes, un ejemplo está en los satélites Landsat o Sentinel.

El flujo de energía, es decir, la radiación, es el responsable de la interacción entre el sensor y la superficie a analizar, la información se recibe por reflexión o por emisión directa de la superficie, esta interacción electromagnética es la que nos aporta información necesaria para saber las características del terreno.

Cuando la radiación interactúa con la superficie pueden darse hasta 3 comportamientos distintos: reflexión, transmisión y absorción, la suma de estas tres partes es la radiación incidente. La radiación que recibe el satélite además también depende de otros parámetros tales como el ángulo de iluminación, modificaciones del relieve o la influencia de la atmósfera y nubes.

La radiación solar se puede aproximar a la que emite un cuerpo negro a 6000K, la radiación que llega a la Tierra se compone de: 43% radiación visible, 49% infrarrojo cercano, 7% ultravioleta, y el 1% sobrante son rayos X, rayos Gamma y ondas de radio. Antes de alcanzar la superficie de la Tierra ha de atravesar la atmósfera, donde tras sufrir efectos de reflexión, dispersión y absorción llega tan solo el 50% de la radiación emitida inicialmente por el Sol. El 25% de la radiación llega como radiación directa, y el 25% restante es radiación difusa, es decir, que se ha dispersado en la atmósfera, esto depende del tamaño de las partículas presentes en la misma. El 30% de la radiación que alcanza la Tierra se refleja sin modificar la longitud de onda, esto se conoce como albedo y depende de muchos factores como la nubosidad o partículas en suspensión. El 20% de la radiación se absorbe en la atmósfera, debido principalmente a los gases oxígeno, ozono y vapor de agua.

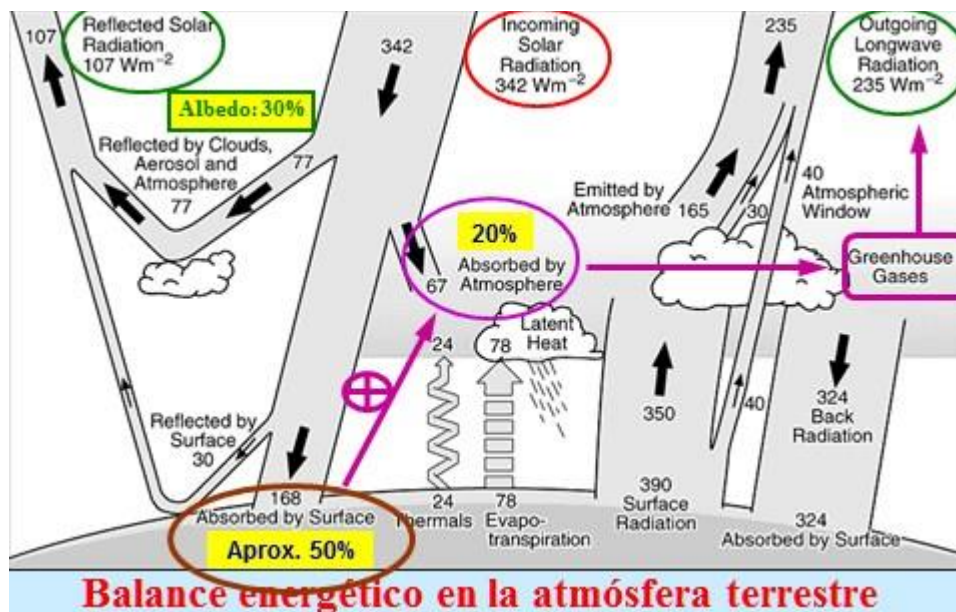


Figura 9: Esquema del balance radiativo que tiene lugar en la atmósfera terrestre [24].

En la figura 10 se puede ver la reflectancia de diferentes tipos de superficie según la zona del espectro electromagnético en la que nos encontremos, se puede ver claramente como no es igual en todas las bandas, es por ello que los satélites toman imágenes en diferentes segmentos del espectro.

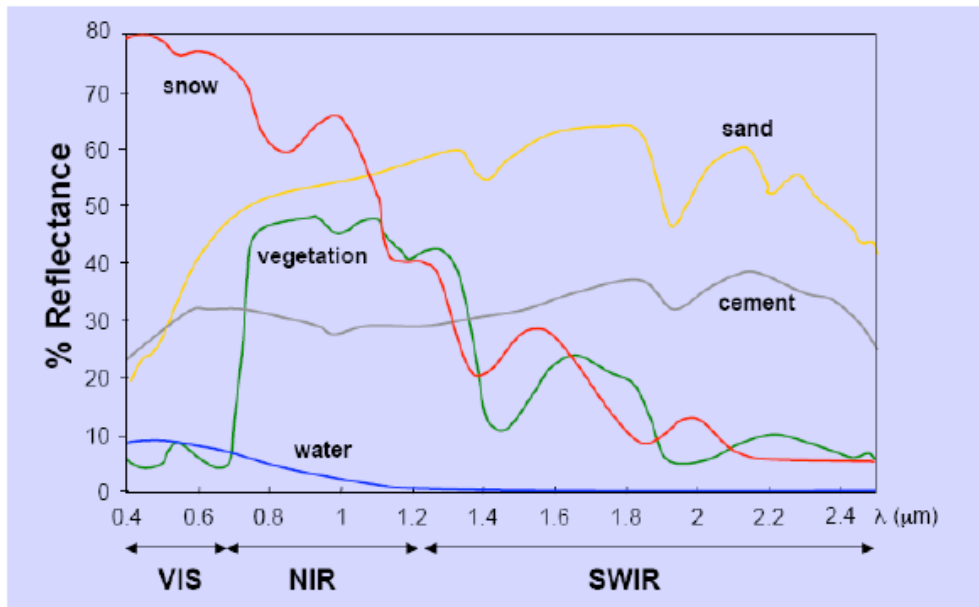


Figura 10: Curva de reflectancia representando el porcentaje de energía que reflejan distintas superficies en función de la zona del espectro en la que nos encontremos, desde el visible VIS, hasta el infrarrojo de onda corta SWIR pasando por el infrarrojo cercano[22].

En la tabla 3 se muestra que tipo de propiedades se pueden analizar en cada una de las bandas capaces de detectar el sensor de escaneo óptico TM que trabaja en el visible y el infrarrojo de los satélites Landsat.

Banda	Rango Espectral	Resolución	Características y aplicaciones
TM1	0.45-0.52	30	Profundidad agua con poca turbidez, diferencia suelo-vegetación y tipos de suelos y distinción vegetación conífera y decidua.
TM2	0.52-0.60	30	Tasa de crecimiento y vigor de la vegetación, concentración de sedimentación y profundidad agua turbia.
TM3	0.63-0.69	30	Absorción de clorofila, clasificación de copas de árboles y aplicaciones geológicas.
TM4	0.76-0.90	30	Delineamiento de cuerpos de agua, áreas de incendio y variaciones de biomasa
TM5	1.55-1.75	30	Humedad y distinción de nieve y nubes.
TM6	10.4-12.5	120	Propiedades térmicas del suelo, corrientes marinas y distinción de áreas quemadas y cuerpos con agua.
TM7	2.08-2.35	30	Mapeo hidrotermal y exploraciones mineras

Tabla 2: Breve descripción de algunas de las aplicaciones de las bandas obtenidas mediante el sensor óptico TM del satélite Landsat-7 [25].

Corine Land Cover

El CLC [12] es un inventario que se inició en 1985 y que se encarga de determinar el cambio que ha experimentado una superficie consistente en un conjunto de 44 tipos de cubierta del suelo distintos. Este sistema tiene una resolución de 100m y toma unas imágenes mínimas de mapeo (MMU) de 25ha. Las series temporales de datos se complementan por cambios de capas de la cubierta del terreno. El resultado final es un mapa donde podemos ver pintado en diferentes colores, cada uno asociado a los 44 tipos de terreno distinguibles.

SRTM

El SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) [26] de la NASA proporciona un modelo digital de elevaciones para el 80% del planeta (la mayoría de huecos están en zonas de agua) con una resolución de hasta 90 metros y con un error de elevación de 16m.

Se transmite una onda desde el transbordador, y se recogen desde una antena situada a 60 metros y otra situada a una determinada distancia (baseline) que se mantiene constante, por tanto utilizando esta información y las diferencias en las señales reflejadas se puede calcular la elevación en la superficie terrestre.

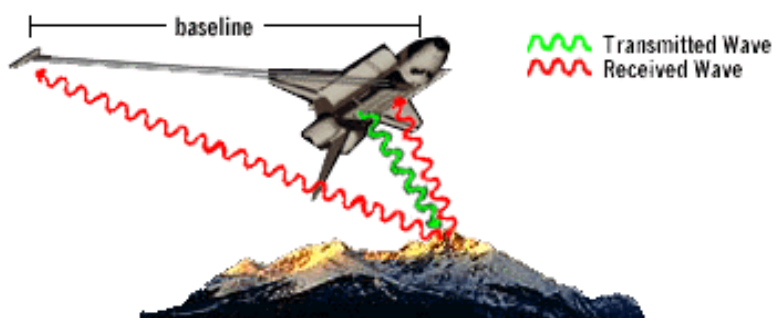


Figura 11: esquema del funcionamiento de la misión SRTM [27].

Sentinel-2

El Sentinel-2 incorpora una cámara que registra imágenes multiespectrales de alta resolución con 13 bandas espectrales distintas con el fin de estudiar la superficie y la vegetación terrestre.

El sistema consiste en 2 satélites idénticos en la misma órbita separados 180 grados con el fin de tener una cobertura óptima. Los dos satélites juntos son capaces de cubrir toda la superficie terrestre cada 5 días. En primer lugar, se lanzó el Sentinel-2A el 23 de junio de 2015, durante este tiempo se tenían imágenes cada 10 días. El pasado 7 de marzo de 2017 se lanzó el Sentinel-2B, y desde entonces disponemos de imágenes cada 5 días. Ambos satélites pertenecen a la Comisión Europea.

En la tabla 4 se indica la resolución espacial máxima de cada banda junto con longitud de onda asociada al máximo de emisión.

Banda	Longitud de onda del máximo/nm	Resolución Espacial/m
B1	443	60
B2	490	10
B3	560	10
B4	665	10
B5	705	20
B6	740	20
B7	783	20
B8	842	10
B8a	865	20
B9	940	60
B10	1375	60
B11	1610	20
B12	2190	20

Tabla 4: Espectro de cada una de las bandas del Sentinel-2, junto con su resolución espacial.

Mediante la plataforma Google Earth Engine [28] se puede obtener las imágenes de distintos satélites y el modelo digital de elevaciones STRM, en la figura 12 se muestra un ejemplo mostrando la elevación del sur de España con una resolución de 1km. Mediante esta plataforma se obtendrán todas las imágenes correspondientes a los distintos índices posibles de obtener con el Sentinel-2 así como el modelo digital de elevaciones.

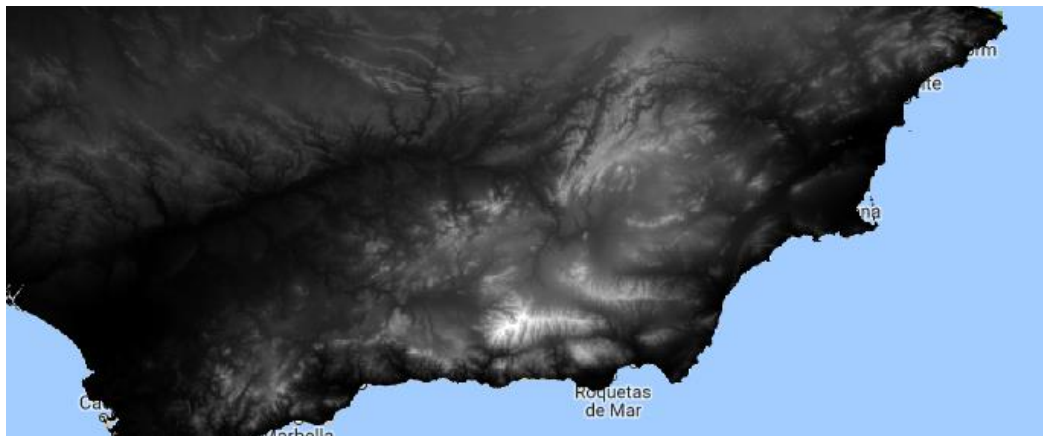


Figura 12: Imagen en escala de grises del sur de España representado de negro a blanco en orden creciente de altitud, código disponible en los anexos.

Google Earth Engine nos proporciona imágenes en formato *‘.TIF’*, pero para poder utilizarlas con el modelo de máxima entropía Maxent es necesario transformarlas al formato *‘.asc’* para tener una red donde esté definido el espacio geográfico. Para realizar estas transformaciones se utiliza el sistema de información geográfica (SIG) QGIS, que es libre y gratuito y se puede descargar en <http://www.qgis.org/es/site/>. Se representan todas las imágenes utilizando el modelo WGS84 [29], que es un sistema de coordenadas geográficas ampliamente utilizado en cartografía, geodesia, navegación y GPS. Es decir, aproxima la Tierra a un elipsoide del cual toma las coordenadas.

Índices usuales en teledetección

A continuación se explica el significado de algunos de los índices más conocidos o los que han sido más relevantes en nuestro modelo, la longitud de onda asociada a la reflectancia de cada banda viene en la tabla 4.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

El índice de vegetación con diferencia normalizada es uno de los más usados [22], esto se debe a que es fácil de calcular, tiene un rango entre -1 y 1, y sirve para interpretar los parámetros biofísicos de la vegetación. Permite identificar si hay vegetación verde en una superficie y mostrar cómo se distribuye espacialmente. Está condicionado por la climatología y la fenología anuales, y hay que considerarlos para distinguir oscilaciones naturales con otros factores, como por ejemplo: el agua tiene mayor reflectancia en el infrarrojo, lo que implica valores negativos, el suelo sin vegetación presenta una ligera anomalía positiva o que las nubes tienen un índice de valores próximos a 0.

Tiene un gran uso en ecología debido a que es capaz de estimar la fracción de la radiación fotosintéticamente activa captada por la vegetación, se calcula por medio de la siguiente expresión.

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4} \quad (3)$$

Enhanced Vegetation Index (EVI)

El EVI es un índice de vegetación mejorado que presenta una mayor sensibilidad en zonas donde haya mucha biomasa y reduce las influencias de la atmósfera. El NDVI es sensible a la clorofila, mientras que el EVI responde más ante la variación de la cubierta vegetal, otra diferencia es que en presencia de nieve el NDVI disminuye y el EVI aumenta.

Ambos índices de vegetación se complementan y sirven para analizar el estado de la vegetación. El EVI se define como:

$$EVI = \frac{2.5(B8 - B4)}{(B8 + 6B4 - 7.5B2 + 1)} \quad (4)$$

ARI 1 (Anthocyanin Reflectance Index 1)

El cambio en antiocianina, que es un pigmento que da los colores rojo, azul o púrpura a las plantas, en la hojas indica cambios en el follaje, crecimiento de brotes o muerte [30]. La reflectancia de la antiocianina es máxima alrededor de 550nm y también está influenciada por la clorofila, por tanto este índice también considera la reflectancia a 700nm con el fin de tener en consideración la clorofila. Los valores normales de este índice se sitúan entre 0 y 0.2, la vegetación que se está debilitando presenta los valores más altos. El ARI1 viene dado por la siguiente ecuación

$$ARI = \frac{1}{B3} - \frac{1}{B5} \quad (5)$$

ARI 2(Anthocyanin Reflectance Index 2)

Este índice es similar al anterior, la diferencia es que es capaz de detectar concentraciones más altas de antocianinas en la vegetación, el ARI2 viene definido por la siguiente expresión

$$ARI2 = \frac{B8}{B2} - \frac{B8}{B3} \quad (6)$$

GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)

El GNDVI es un índice que indica la actividad fotosintética de las plantas, y es utilizado normalmente para determinar la captación del agua y nitrógeno por la cubierta vegetal, se formula igual que el NDVI pero cambiando la banda del rojo por la del verde y se puede escribir como

$$GNDVI = \frac{B8 - B3}{B8 + B3} \quad (7)$$

MNDWI (Modification of Normalized Difference Water Index)

El NDWI [31] lo que hace es: maximizar la reflectancia del agua usando longitud de onda verde y considerar el infrarrojo emitido por las superficies, de esta manera la vegetación y el suelo presentan normalmente valores cercanos a 0 o negativos mientras que las masas de agua presentan los valores positivos, sin embargo el NDWI en áreas urbanas no consigue los resultados esperados debido a la reflectancia del pavimento y de los edificios, para eliminar este ruido de la señal, es por ello que se utiliza el infrarrojo medio en lugar del infrarrojo cercano. El MNDWI se formula como

$$MNDWI = \frac{B3 - B11}{B3 + B11} \quad (8)$$

El cálculo del MNDWI proporciona 3 resultados: en primer lugar el agua da valores más positivos que en el caso del NDWI porque absorbe más en el infrarrojo medio que en el cercano, las áreas urbanas pasan a tener valores negativos, y el suelo y la vegetación siguen teniendo valores negativos debido a estos reflejan más en el infrarrojo medio que en el cercano.

SR (Simple Ratio Index)

El SR es un índice que indica la cantidad de vegetación que hay en una determinada zona y se define como el cociente entre la reflectancia en el infrarrojo cercano entre la del rojo

$$SR = \frac{B8}{B4} \quad (9)$$

En suelo sin vegetación se refleja aproximadamente lo mismo en ambas bandas, conforme aumenta la vegetación este índice va creciendo y puede llegar hasta valores de 30.

MSI (Moisture Stress Index)

El MSI es sensible al contenido en agua de las hojas. Con el aumento en contenido en agua en las hojas aumenta la absorción entorno a 1599nm. Se usa la absorción a 819nm porque apenas cambia con el contenido en agua. Se utiliza para el análisis de las cubiertas vegetales, estimar riesgos de incendio y estudiar ecosistemas. Valores altos indican bajo contenido en agua, los valores medios están entre 0.4 y 2, pero puede oscilar entre 0 y 3 o más.

$$MSI = \frac{B_{11}}{B_8} \quad (10)$$

Capítulo 4: Implementación del modelo y resultados

En este capítulo se parte del modelo de distribución del sapo partero bético de la monografía del SARE [7] (ver los resultados en la figura 13) y después repetimos lo mismo que ha hecho el SARE pero de tres maneras distintas: en un primer caso introducimos como capas la elevación y las 19 variables climáticas que proporciona Worldclim para verificar lo que ha hecho el SARE y ver qué se obtiene, en el segundo caso cambiamos completamente el procedimiento y pasamos a ejecutar el modelo Maxent para ver el área de distribución en un determinado intervalo de tiempo en agosto ('2016-08-01', '2016-08-01'), para ello obtenemos 33 imágenes con la ayuda de Google Earth Engine, cada una con un índice distinto proporcionado por la combinación de las bandas espectrales que recibe el Sentinel-2. En el tercer y último caso se hace lo mismo que en agosto, pero esta vez en el mes de abril ('2016-04-01', '2016-04-15'). Elegimos estas dos fechas dado que los sapos suelen depositar sus larvas entre febrero y septiembre dependiendo de la zona y su metamorfosis se suele dar a finales de verano. También cabe destacar que para realizar este análisis hemos de tomar imágenes en días de cielos despejados, debido a que cuando hay nubes las bandas en el visible no permiten ver la superficie terrestre.

Al tratarse de una especie protegida en ningún organismo oficial del estado hemos encontrado las posiciones geográficas de los sapos, tan solo nos dejan acceder a ver las cuadrículas 10x10 UTM indicando presencia o ausencia, por tanto para generar este modelo hemos tomado los puntos que proporciona [32], donde se indica que proceden de MAGRAMA 2012. Todos esos puntos se colocarán también en nuestro mapa de resultados. Además para tomar las cuadrículas del área donde habita el sapo también hay varios mapas distintos, hemos tomado el del Servidor de Información de Anfibios y Reptiles de España por la comodidad de poder exportar las casillas en un fichero '.kmf' al sistema de información geográfica QGIS, de una base de datos a otra alguna cuadrícula puede variar pero son muy parecidas unas de otras.

Modelo del SARE

El modelo del SARE ejecuta el algoritmo Maxent con las variables que se indican en la figura 13, cabe destacar tan solo consideran variables del terreno y unas pocas variables climáticas y mencionan que han empezado a introducir variables procedentes de satellite remote sensing, de ahí la idea de profundizar más en el análisis de los modelos de distribuciones introduciendo hasta 33 índices en los casos 2 y 3.

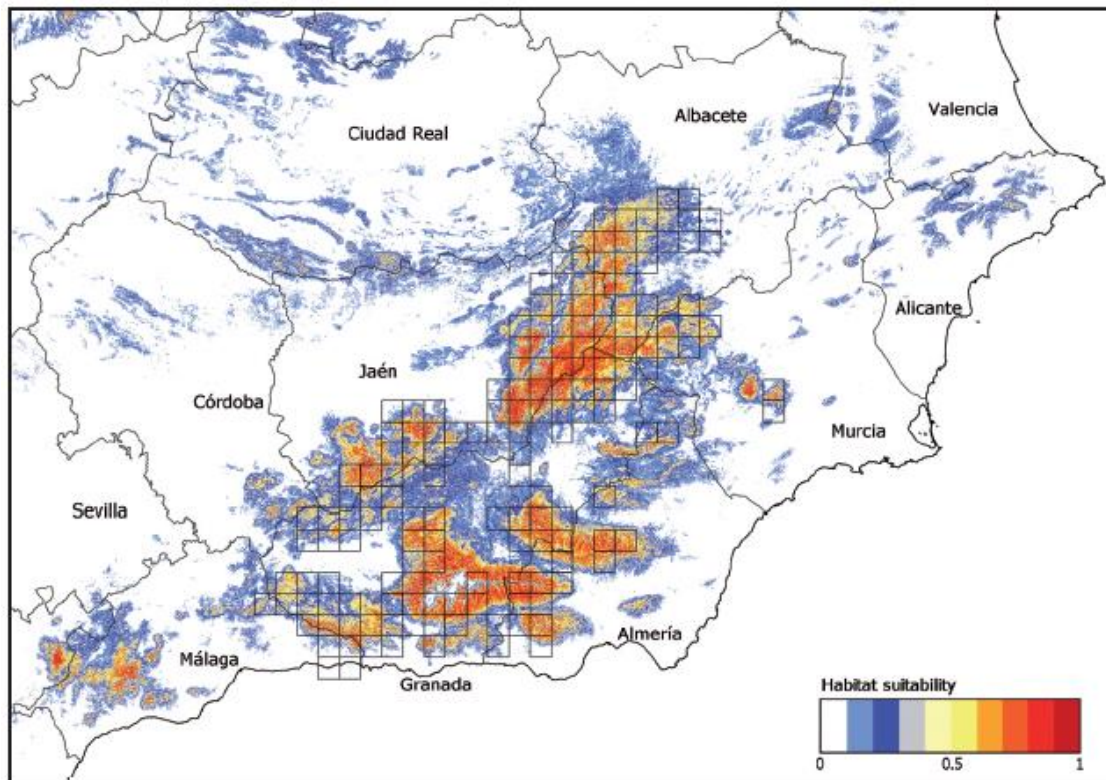


Figura 13: Modelo de distribución del sapo partero según la monografía del SARE [7], $AUC=0.944$, el peso de las variables utilizadas en este mapa son: altitud (65.8%), curvatura (9.6%), temperatura mínima anual (2.9%), pendiente (6.1%), temperatura máxima anual (2.2%), NDVI junio (7.7%), disponibilidad hídrica (1.1%), NDVI abril (2.7%), EVI junio (0.4%), EVI marzo (0.1%), EVI febrero (1%), NDVI febrero (0.2%) y EVI enero (0.2%).

Caso 1: Elevación y variables climáticas

En la figura 14 se muestra el resultado con las variables climáticas y la elevación de la ejecución del modelo Maxent, y en la tabla 5 se muestran todos los pesos de las variables utilizadas junto con su significado, finalmente en la figura 15 se muestran las curvas de respuesta de las 2 variables más relevantes

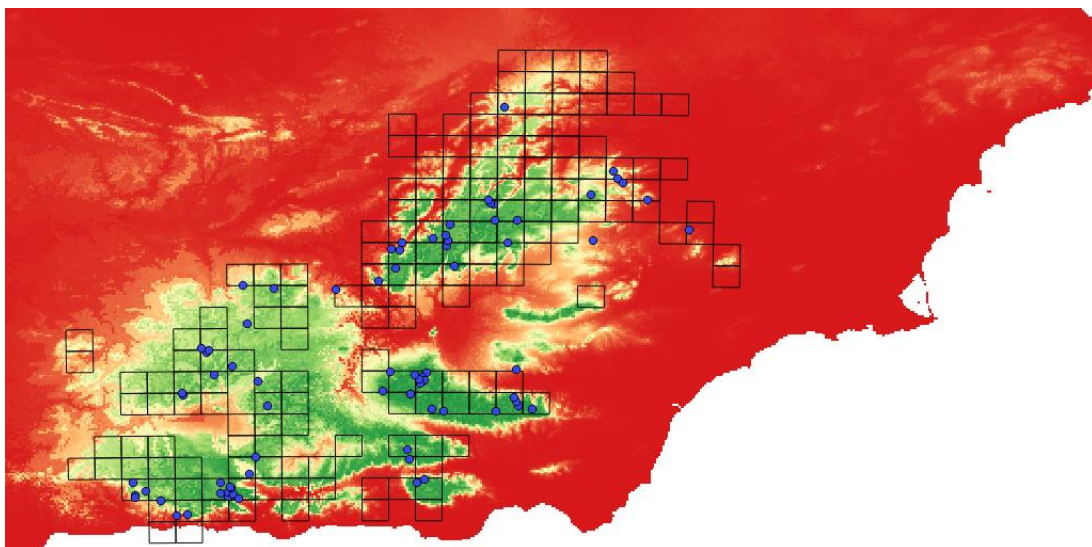


Figura 14: Representación del área potencial de habitabilidad del sapo partero bético, de rojo a verde en orden creciente a partir de las variables introducidas en la tabla 5, los puntos azules representan las muestras de presencia disponibles, y los cuadrados son las cuadrículas de tamaño 10x10 km que ofrece el SIARE, las variables introducidas tienen una resolución de 1x1km. AUC=0.991.

Variable	Significado	Peso en el Modelo/%
Elevación	Elevación	36.71
Bio1	T media anual	0
Bio2	Rango de T media (Promedio Mensual(Tmax-Tmin))	13.10
Bio3	Isotermalidad (Bio7/Bio2)	0.77
Bio4	T estacional (Std Dev*100)	0.06
Bio5	T máxima mes más cálido	2.16
Bio6	T mínima mes más frío	0.02
Bio7	Bio5- Bio6	8.81
Bio8	T media trimestre más húmedo	0.03
Bio9	T media trimestre más seco	0.04
Bio10	T media trimestre más cálido	0
Bio11	T media trimestre más frío	0.07
Bio12	Precipitación anual	0
Bio13	Precipitación mes más húmedo	0.23
Bio14	Precipitación mes más seco	4.76
Bio15	Precipitación estacional (Coeficiente de variación)	10.50
Bio16	Precipitación trimestre más húmedo	1.69
Bio17	Precipitación trimestre más seco	0
Bio18	Precipitación trimestre más cálido	2.27
Bio19	Precipitación trimestre más frío	18.78

Tabla 5: Variables ambientales medidas en el modelo Maxent junto con su significado y sus correspondientes pesos.

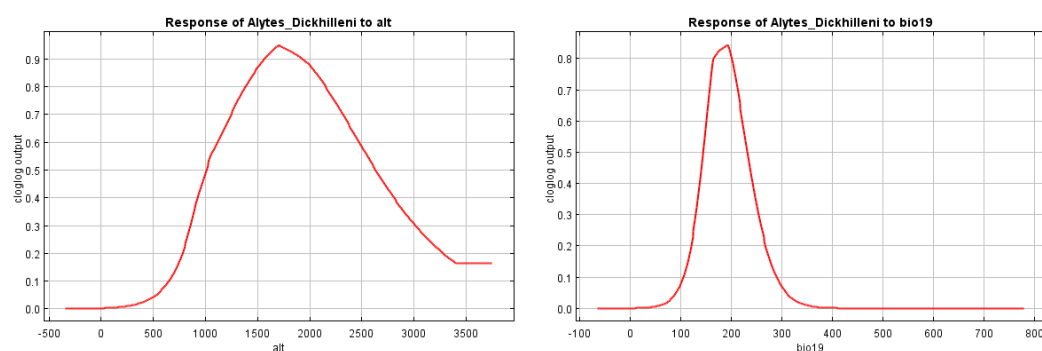


Figura 11: Curvas de respuesta de las dos variables más relevantes, la elevación en metros con un 36.71%, y la precipitación del trimestre más frío en l/m³ con un 18.78%.

Como era de esperar hemos obtenido prácticamente los mismos resultados que en el modelo del SARE dado que hemos seguido el procedimiento habitual sólo que hemos metido más variables.

Caso 2: 33 Índices del Sentinel-2 en el mes de agosto

En este caso hemos repetido la ejecución del modelo Maxent pero esta vez hemos tomado todas fórmulas de [30] y con ayuda de Google Earth Engine hemos creado 33 códigos para descargar 33 imágenes TIF asociadas a cada uno de los índices, en los apéndices se indica como calcular alguno de ellos, pero hacer los demás es sencillo, ya que solo hay que cambiar la fórmula de la ecuación y la fecha una vez tenemos el código principal. En la figura 16 se pueden ver los resultados, en la tabla 6 se pueden ver los índices, sus fórmulas correspondientes y los pesos que han tenido cada uno de ellos para los meses de agosto (caso 2) y abril (caso 3).

Índice	Ecuación	Valor Maxent Agosto/%	Valor Maxent Abril/%
ARI2	$(B8/B2)-(B8/B3)$	5.65	2.47
GNDVI	$(B8-B3)/(B8+B3)$	5.06	10.98
MCARI	$1-0.2*(B5-B3)/(B5-B4)$	0	0
MNDWI	$(B3-B11)/(B3+B11)$	16.63	40.27
MSI	$B11/B8$	2.78	4.02
mSR705	$(B6-B1)/(B5-B1)$	0	0
MTCI	$(B6-B5)/(B5-B4)$	0	0
NDBI	$(B11-B8)/(B11+B8)$	0.45	0
PSRI	$(B4-B2)/B5$	1.18	0
PSRI-NIR	$(B4-B2)/B8$	0	0
Red NDVI	$(B8-B6)/(B8+B6)$	0.11	0.65
Re-NDWI	$(B3-B5)/(B3+B5)$	0.15	0.57
SR	$B8/B4$	52.10	29.31
ARI1	$(1/B3)-(1/B5)$	7.56	8.73
ARVI	$(B8-(2*B4-B2))/(B8+(2*B4-B2))$	0	0
BAI	$1/((0.1-B4)^2+(0.06-B8)^2)$	0	0
CHL	$B5/B8$	0.06	0
CR2	$(1/B2)-(1/B5)$	0.93	0.12
CR1	$(1/B2)-(1/B3)$	2.01	0
EVI1	$2.5*(B8-B4)/(B8+6*B4-7.5*B2+1)$	0.33	0
EVI2	$2.5*(B8-B4)/(B8+2.4*B4+1)$	0	0
GRVI1	$(B4-B3)/(B4+B3)$	0	0.47
mNDVI705	$(B6-B5)/(B6+B5-2*B1)$	0.03	0
NBR	$(B8-B12)/(B8+B12)$	2.05	0.84
NDI45	$(B5-B4)/(B5-B4)$	1.20	1.15
NDII	$(B8-B11)/(B8+B11)$	0.10	0
NDVI	$(B8-B4)/(B8+B4)$	0	0
NDVI705	$(B6-B5)/(B6+B5)$	0.11	0.07
NDVIG	$B3*(B8-B4)/(B8-B4)$	1.57	0
NDWI	$(B3-B8)/(B3+B8)$	0.02	0.09
SAVI	$1.5*(B8-B4)/(B8+B4+0.5)$	0	0.27
SIPI	$(B8-B1)/(B8-B4)$	0	0
S2REP	$705+35*(0.5*(B7+B4)-B5)/(B6-B5)$	0	0

Tabla 6: índices del Sentinel-2 junto con su ecuación y los pesos dados en el modelo Maxent para los meses de agosto y abril, los valores de las bandas se indican en la tabla 4.

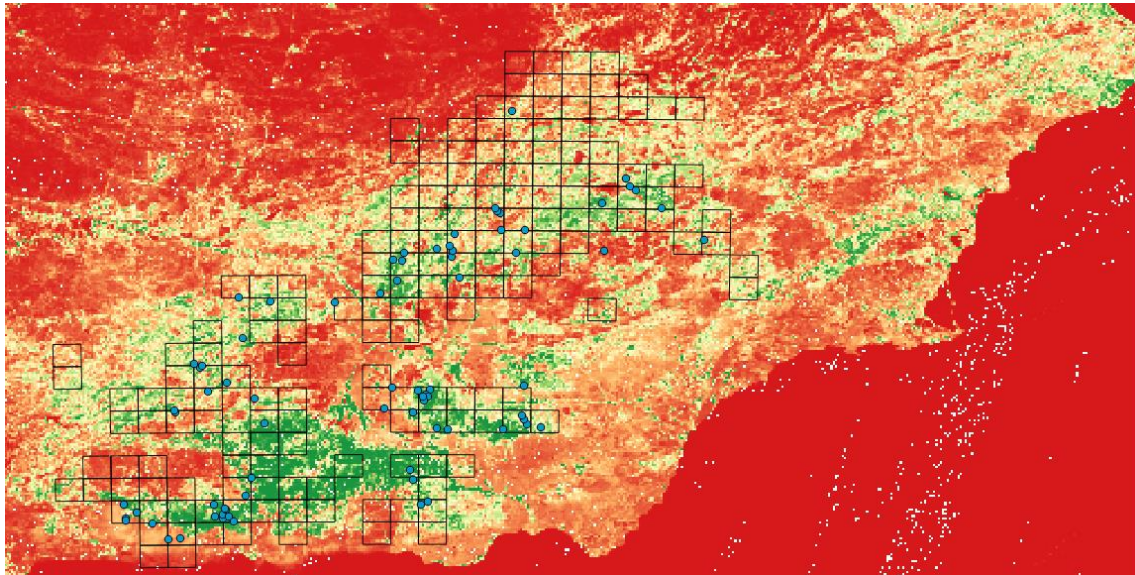


Figura 16: Representación de la distribución del sapo partero bético a partir de las mismas presencias que en los casos anteriores (puntos circulares azules), se representa el área de habitabilidad como una probabilidad de 0 a 1 de rojo a verde, solamente se han utilizado capas con los índices que proporciona el satélite Sentinel-2 para el mes de agosto ('2016-08-01', '2016-08-10') los pesos de cada variable están en la columna 3 de la tabla 6.

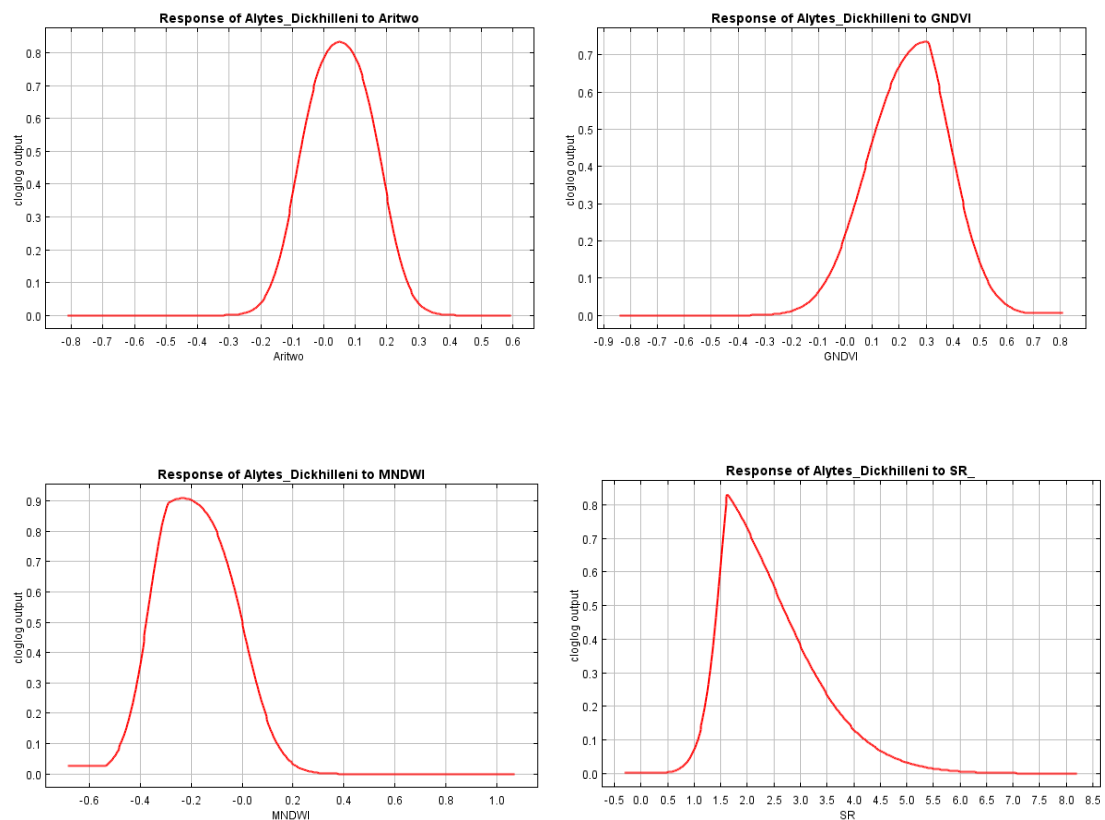


Figura 17: Curvas de Respuesta de los índices que han sido más relevantes en la ejecución del modelo Maxent con datos para el mes de agosto ('2016-08-01', '2016-08-10').

Caso 3: 33 índices mes de abril

En el último caso hemos repetido los pasos del paso anterior, pero hemos cambiado en el código las fechas en las cuales hemos tomado las imágenes, en la columna 4 de la tabla 6 se puede ver los pesos de cada una de las variables, en la figura 18 se visualiza el mapa de distribución y en la figura 19 indicamos algunas curvas de respuesta.

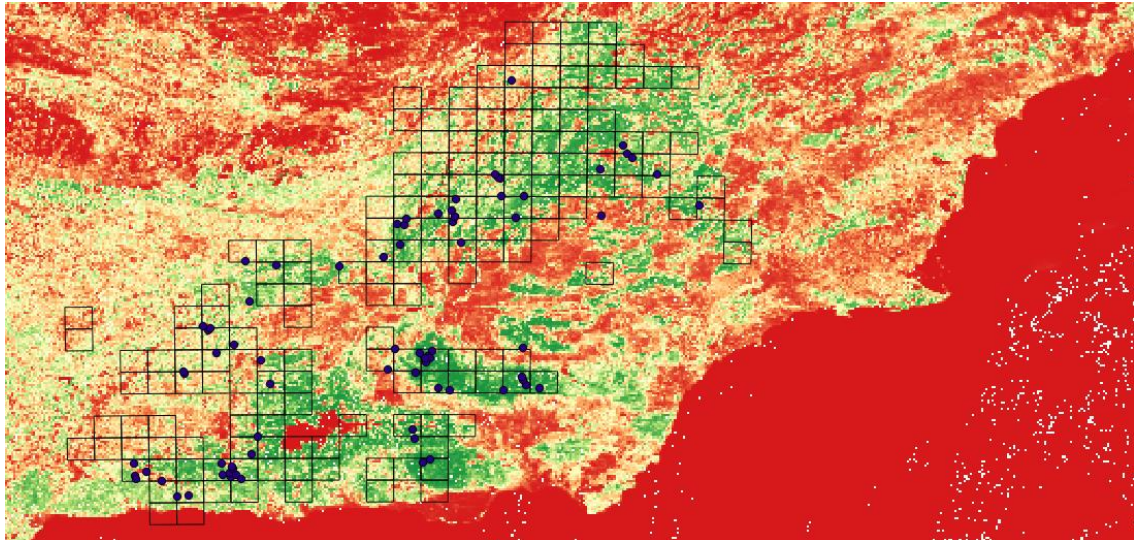


Figura 18: Representación de la distribución del sapo partero con los mismos datos que en la figura anterior pero esta vez con los índices en el mes de abril ('2016-04-01','2016-04-10'), los pesos de cada variable se pueden ver en la columna 4 de la tabla 6.

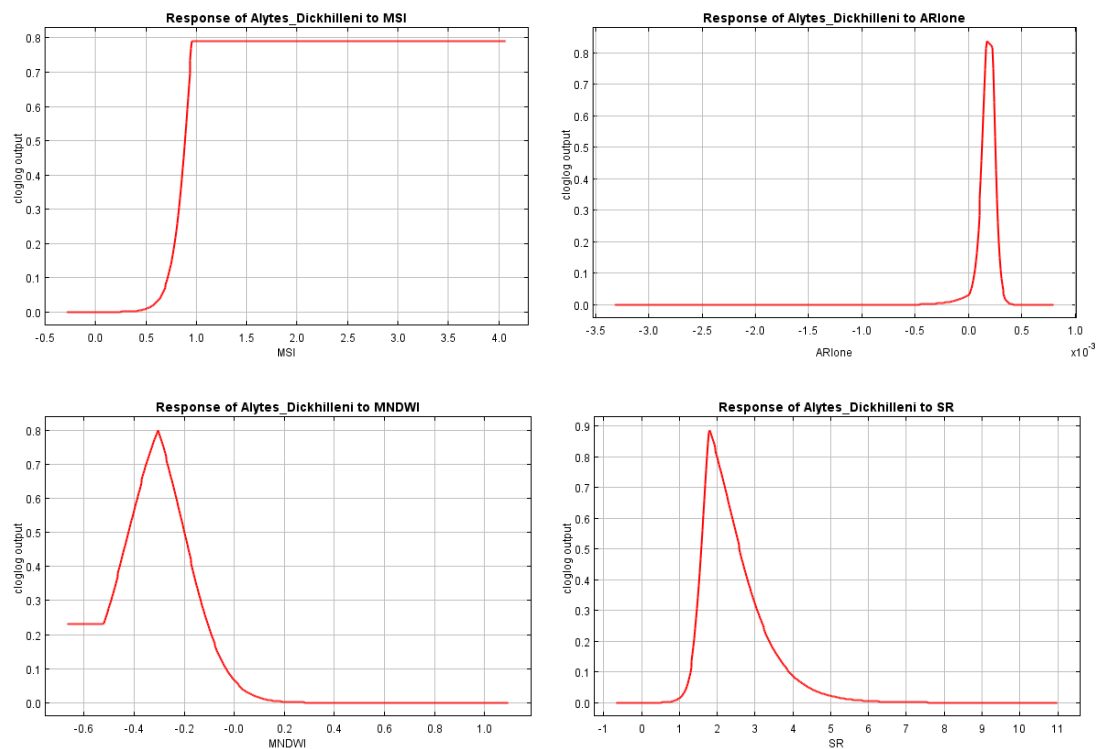


Figura 19: Curva de respuesta de los índices más relevantes de ejecutar el Maxent para el periodo de abril ('2016-04-01','2016-04-10'), la relevancia de cada viene indicada en la tabla 6

Discusión

Como se indica en la tabla 7 en todos los casos hemos obtenido una buena estimación de la predicción del Maxent con AUC superior a 0.9, en cuanto a los métodos tradicionales SARE y Caso1, hemos obtenido que la variable más importante ha sido la elevación. Cuando en los casos 2 y 3 hemos pasado a buscar un modelo tan solo utilizando los índices que proporciona el Sentinel-2 hemos obtenido que las variables más importantes han sido el SR y el MNDWI respectivamente. Los valores que han dado máximo en las curvas de respuesta para estos índices han sido: -0.3 en el caso del MNDWI lo que indica la escasez de agua del terreno, y 1.7 para el SR lo que da a entender que son zonas sin demasiada vegetación, lo que tiene sentido considerando que estamos en el sur de España. Además de estos índices también han dado resultado los índices de antocianinas ARI1 y ARI2 con valores próximos a 0, al haber poca vegetación es normal que se detecte pocos cambios entre aparición o desaparición de hojas; otro índice que ha tenido relevancia es el MSI, que se encarga de medir la humedad del suelo, la curva de respuesta da valores máximos a partir de 1, lo que indica en el hábitat del sapo la cantidad de agua en la vegetación oscila desde valores medios a secos. Por último, el GNDVI se sitúa alrededor de 0.3 su valor donde es más probable en el área del sapo, este índice da valores entre -1 y 1 dependiendo de la salud de la vegetación.

Se ha podido ver cómo los cuatro mapas presentan resultados muy similares y consiguen hacer una buena aproximación del hábitat del sapo partero bético, por tanto se puede validar el procedimiento de analizar el área de distribución de una especie tan solo tomando índices de satélites, no obstante el realizar este procedimiento para un momento dado tiene el inconveniente de no poder considerar las fluctuaciones climáticas posibles, es por ello que para validar este método necesitaríamos repetir el procedimiento para más meses y durante más años para obtener un resultado de más calidad.

	Modelo SARE	Caso 1	Caso 2	Caso 3
AUC	0.94	0.99	0.96	0.96
1ª Variable más importante	Elevación	Elevación	SR	MNDWI
Peso en el Maxent/%	65.50	36.71	52.10	40.27
2ª Variable más importante	Curvatura del terreno	Precipitación trimestre más frío	MNDWI	SR
Peso en el Maxent/%	9.40	18.78	16.63	29.31

Tabla 7: En esta tabla se indica el AUC de cada modelo junto con las 2 variables más importantes en cada caso y sus correspondientes pesos. Caso 1 tomando elevación y variables climáticas y Casos 2 y 3 tomando los 33 índices que proporciona el Sentinel-2 para agosto y abril respectivamente.

Capítulo 5: Mejoras del seguimiento para el futuro

Uno de los principales problemas en este tipo de estudios es el muestreo, directo o indirecto, de las poblaciones para determinar la presencia/ausencia del sapo, para ello en este último capítulo se sugieren algunas alternativas en el seguimiento.

Es posible diferenciar el canto del sapo partero bético del resto debido a que su canto es único [33], es decir, el espectro sonoro que se puede apreciar para cada especie es distinto y puede ser un método indirecto útil para seguir al sapo, por lo que si se instalan micrófonos en cada uno de los puntos de reproducción sería posible determinar la presencia o ausencia de machos adultos reproductores comparando el sonido ambiental con el del sapo partero bético. El espectro sonoro que emite el *Alytes dickhilleni* es distinto al del *A. obstetricans* o *A. cisternasii*, en la figura 20 se puede ver cómo, a pesar de ser muy parecidos el canto de cada uno de ellos es único en intensidad y duración.

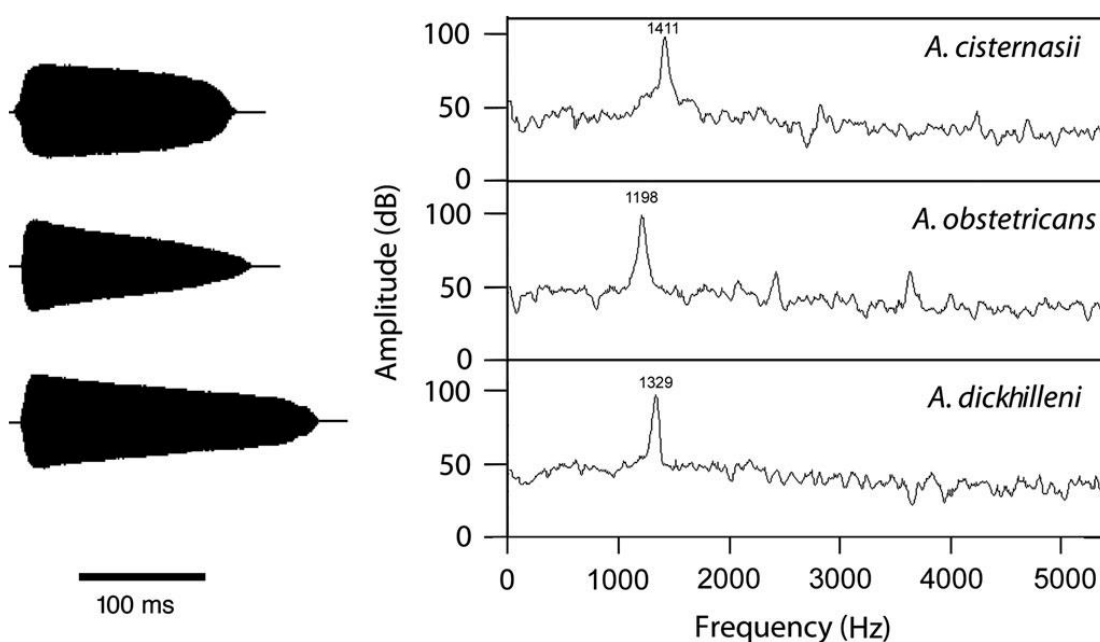


Figura 20: Típico canto de las tres especies de *Alytes* de la península ibérica indicando los principales picos de frecuencias en cada una de ellas.

En la tabla 7 se muestra el tipo de amenaza, los daños ocasionados y algunas de las soluciones que se han llevado a cabo para tratar de conservar el sapo partero bético en la Sierra de los Filabres, Almería. Posteriormente en la figura 21 se puede ver la evolución del número de individuos del sapo y de las larvas tras aplicarse estas medidas. Por lo que se puede comprobar como el ser humano en lugar de ser una amenaza para la supervivencia de esta especie también es capaz de convertirse en su salvador si se aplican las medidas oportunas.

Amenaza	Consecuencias	Medidas
Abandono de infraestructuras.	Desaparición del punto de agua.	Reparación y rehabilitación para poder seguir albergando agua y sapos.
Puntos de agua de difícil acceso o salida.	Ahogamientos o muerte por inanición.	Instalación de rampas.
Transformación de infraestructuras.	Desaparición del punto de agua o estructuras trampa.	Creación de puntos alternativos.
Presión ganadera.	Destrucción de la vegetación o contaminación del agua.	Vallar el punto de reproducción del sapo y crear uno alternativo para el ganado.
Sedimentación.	Exceso de sedimentos produce una desaparición.	Retirada manual de sedimentos
Manejo inadecuado del agua.	Contaminación del agua o introducción de enfermedades.	Vallado e instalación de paneles informativos.
Introducción de especies exóticas.	Depredación de larvas y aumento de la turbidez.	Eliminación de especies y puesta de paneles informativos.
Aislamiento de poblaciones.	Pérdida de diversidad genética.	Creación de putos de agua intermedios
Captura.	Retirada de larvas o sapos por niños.	Instalación de paneles y aplicación de la ley.
Intoxicación por plaguicidas.	Muerte de larvas y sapos.	Separación de las áreas de los sapos de las del uso de plaguicidas (cultivos).

Tabla 7: Principales peligros para el sapo junto con sus causas y posibles soluciones.

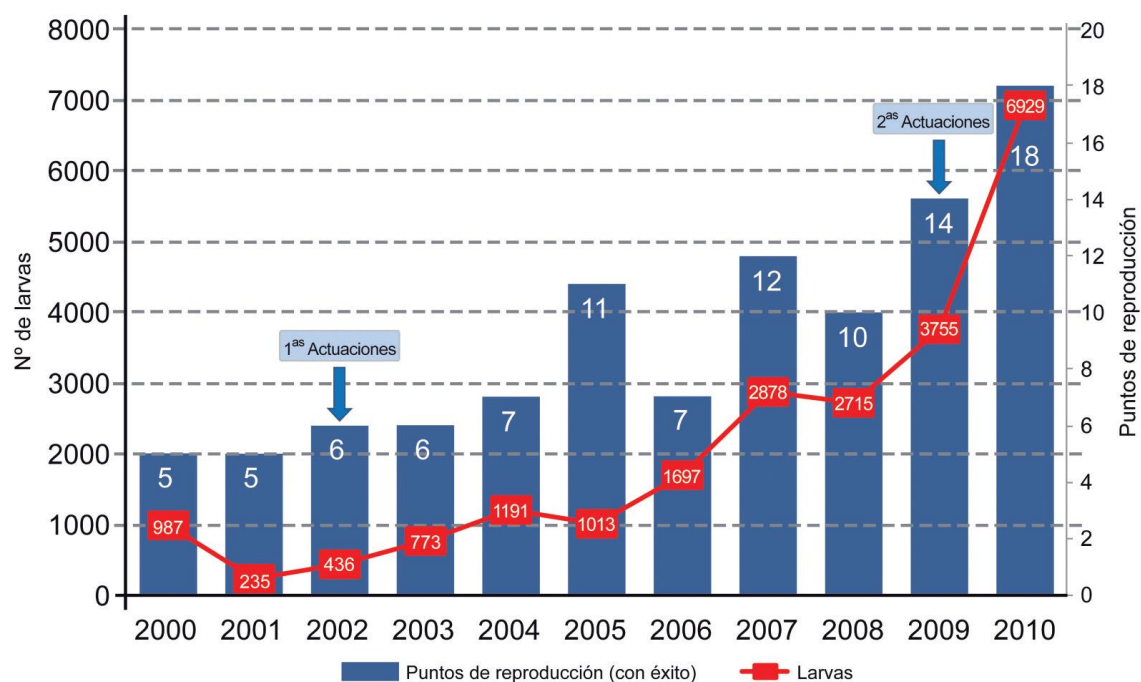


Figura 21: Evolución del número de puntos de reproducción y del número de larvas del sapo partero bético en la Sierra de los Filabres, Almería entre los años 2000 y 2010.

Además de las medidas sugeridas anteriormente para mejorar la conservación del sapo partero bético también se puede mejorar el seguimiento del sapo usando técnicas de observación de la Tierra, como utilizar los 33 índices del Sentinel-2, pero hacer el mismo procedimiento a lo largo de los meses durante un periodo de 10 años y analizar detenidamente como va variando su área potencial de distribución con las estaciones, y en función de los cambios detectados por las medidas de los satélites determinar los cambios en el hábitat.

También existen otros satélites Sentinel o Landsat que permiten también analizar la superficie terrestre, pero con otras técnicas, por lo que podría ser interesante ver los resultados del modelo introduciendo nuevas variables de satélites y ver si es eficaz.

Otro aspecto importante para la conservación del sapo sería hacer un estudio exhaustivo anual de su zona de distribución, ya que no hay demasiados estudios al respecto o se hacen en intervalos de tiempo demasiado grandes para tratarse de especies amenazadas. Por tanto sería interesante ver cómo se puede complementar la información del satélite con la toma de datos in-situ.

Finalmente destacar la importancia de compartir información entre las distintas organizaciones y administraciones, de manera que se puede reutilizar la información de cada dato y sacar el máximo provecho de la información debido a lo costoso de tomar datos sobre el terreno. Además también sería interesante explorar el interés de que los datos registrados por los ciudadanos se registren y publiquen.

Conclusión

Se ha conseguido implementar un modelo de distribución de especies utilizando el algoritmo Maxent que se basa en el principio de máxima entropía a partir de datos climáticos y de imágenes del satélite Sentinel-2, estimando en todos los casos una distribución similar.

La conclusión de este trabajo de fin de grado es que la información que proporcionan los sistemas de observación de la Tierra puede ser de gran utilidad para monitorizar y analizar cómo evolucionan los ecosistemas y los hábitats que pueden ocupar las especies amenazadas. Esto puede ser especialmente útil en zonas donde no haya suficientes datos climáticos; no obstante, para obtener un modelo fiable sería conveniente obtener el modelo de distribución de especies periódicamente, para verificar si su área de habitabilidad se ha visto mermada por una amenaza real o por episodio extremo dentro de las variables utilizadas, por ejemplo, olas de calor o lluvias torrenciales.

Bibliografía

- [1] Kissling, W et al. 2017. "Building essential biodiversity variables (EBVs) of species distribution and abundance at a global scale". Biological Reviews. ID BRV-01-2017-0029 p1-11.
- [2] Pereira, H. M., S. Ferrier, M. Walters, G. N. Geller, R. H. G. Jongman, R. J. Scholes, M. W. Bruford, et al. (2013): Essential Biodiversity Variables. Science 339, 277-278. doi: 10.1126/science.1229931.
- [3] Bosch, J., Tejedo, M., Lizana, M., Martínez Solano, I., Salvador, A., García París, M., Recuero Gil, E., Arntzen, J., Márquez, R., Díaz-Paniagua, C. & Podlousky, R. 2009. *Alytes dickhilleni*. (errata version published in 2016) The IUCN Red List of Threatened Species 2009: e.T979A86229986. Downloaded on 10 June 2017.
- [4] <http://www.gbif.es/gbif.php> Consultado 10/06/2017
- [5] <http://siare.herpetologica.es/bdh/distribucion> Consultado 10/06/2017
- [6] UICN. (2012). Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN: Versión 3.1. Segunda edición. Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido: UICN. vi + 34pp. ISBN: 978-2-8317-1539-1
- [7] Bosch, J. González-Miras, E. 2012. Seguimiento del *Alytes dickhilleni*: Informe final. Monografías SARE. Asociación Herpetológica Española, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. ISBN: 84-921999-5-4.
- [8] Arntzen & García París. 1995. *Alytes dickhilleni*. Atlas Libro Rojo de los Anfibios. p74-76. ISBN: 84-8014-450-5
- [9] Bosch, J. Fernández-Beaskoetxea, S. 2016. Aportaciones al conocimiento del impacto de Batrachochytrium dendrobatidis en España. Boletín de la Asociación Herpetológica Española, Vol 27, p 3-17
- [10] http://datos.gbif.es/generic-hub/occurrences/search?q=Natrix+Maura#tab_mapView Consultado 28/04/2017 GBIF España.
- [11] González, J.M. 2014. Distribución, hábitats reproductores y problemas de conservación del sapo partero bético en el Parque Natural de la Sierra de Huétor (Granada, España). Zool. baetica, 25: 41-54, 2014
- [12] <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/lcc-2006-2012/view> . Consultado 1/5/17. Web oficial de Corine Land Cover.
- [13] <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest> Consultado 1/5/17 Universidad de Maryland.
- [14] Martínez Meyer, E. 2014. "Introducción al modelado de nichos ecológicos y distribuciones de especies". Instituto de Biología. Universidad Autónoma de México. Apuntes http://www.recibio.net/wp-content/uploads/2014/01/Intro-Modelado-de-nichos_EMM.pdf Consultado 22/06/17
- [15] <http://nicho.conabio.gob.mx/conceptos-y-teoria/diagrama-bam>. Consultado 11/06/17

- [16] Elith, J., J.R. Leathwich, 2009, "Species Distribution Models: Ecological Explanation and Prediction Across Space and Time". The annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. Vol. 40:677-697 <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- [17] Phillips, S. J., Dudík, M., Shapire, R. E. 2004. "A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling". Princeton University. Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning, pages 655-662.
- [18] Steven J. Phillips, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire. [Internet] Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Available from url: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Accessed on 2017-6-18.
- [19] Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. [International Journal of Climatology 25: 1965-1978.](#)
- [20] <http://www.worldclim.org/tiles.php?Zone=15> Consultado 13/06/17
- [21] Steven J. Phillips, Robert P. Anderson, Miroslav Dudík, Robert E. Schapire, Mary Blair. 2017. Opening the black box: an open-source release of Maxent. In Ecography. DOI: 10.1111/ecog.03049
- [22] O.E, Rodriguez. H.A, Arredondo. 2005. "MANUAL PARA EL MANEJO Y PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES OBTENIDAS DEL SENSOR REMOTO MODIS DE LA NASA APLICADO EN ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL". Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis123.pdf> Consultado 22/06/17
- [23] Pérez, D. 2007. "Introducción a los Sensores Remotos –Aplicaciones en Geología". Universidad de Buenos Aires. http://avis.gi.fcen.uba.ar/Curso_SR/Guia_Curso_sr_2007.pdf. Consultado 22/06/17.
- [24] <http://blogs.hoy.es/ciencia-facil/tag/atmosfera/> Consultado 13/05/2017.
- [25] Martínez, J. 2005. "Fundamentos de Teledetección Espacial". COMISION NACIONAL DEL AGUA. <http://siga.cna.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF> Consultado 22/06/17.
- [26] Jarvis, A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara, 2008, Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>)
- [27] <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/instrumentinterferometry.html> Consultado 11/06/17.
- [28] <https://earthengine.google.com/> Consultado 13/06/17.
- [29] https://en.wikipedia.org/wiki/World_Geodetic_System Consultado 13/06/17.
- [30] http://www.sentinel-hub.com/apps/wms/wms-parameters/EOproducts?_ga=1.114706247.1760379799.1486073797 Consultado 14/06/17
- [31] Xu et all. 2006. "Modification of normalized difference water index to enhance water features in remotely sensed imagery". [International Journal of Remote Sensing](#) 27(14):3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179

- [32] Dias, G et al. 2014. "Limited gene flow and high genetic diversity in the threatened Betic midwife toad (*Alytes dickhilleni*): evolutionary and conservation". *Conservation Genetics* 16:459-476. DOI 10.1007/s10592-014-0672-2.
- [33] Bosch, J. Penna, M. Velásquez, N.A. 2015. Dissimilarities in auditory tuning in midwife toads of genus *Alytes* (Amphibia: Anura). *Biological Journal of the Linnean Society*. Volume 116, Issue 1. Pages 41–51. DOI: 10.1111/bij.12563.
- [34] Lizana, F.J. 2016. Proyecto de creación de hábitats para la conservación de anfibios en la provincia de Jaén. Universidad de Jaén. Trabajo de fin de grado.
http://tauja.ujaen.es/bitstream/10953.1/2807/1/TFG_FRANCISCO%20JOS%C3%89%20LIZANA%20ROMERO.pdf Consultado 22/06/17
- [35] <http://www.qgis.org/es/site/forusers/download.html#> Consultado 21/06/17.
- [36] Burrowes, P.A. & De la Riva, I., (2017) Detection of the Amphibian Chytrid Fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* in Museum Specimens of Andean Aquatic Birds: Implications for Pathogen Dispersal. *Journal of Wildlife Diseases*, doi: 10.7589/2016-04-074
- [37] Burrowes, P. A. & De la Riva, I. 2017. Unraveling the historical prevalence of the invasive chytrid fungus in the Bolivian Andes: Implications in recent amphibian declines. *Biological Invasions*, doi: 10.1007/s10530-017-1390-8.

Apéndices

Apéndice 1

Código de ejemplo del cual hemos obtenido las imágenes de Google Earth Engine. Solo se indican 3 ejemplos uno del modelo digital de elevaciones, otro del índice SR del mes de agosto y el último del MNDWI en abril. Para el resto de índices tan solo hay que cambiar fechas y la fórmula que define el índice indicando sus correspondientes bandas en el Sentinel-2. En total han sido 67 códigos distintos para descargar 67 imágenes distintas los utilizados.

Modelo Digital de Elevaciones

```
// Cargo la imagen.

var image = ee.Image('srtm90_v4');

//Fijo su centro en coordenadas geográficas

Map.setCenter(-2, 38, 7);

//Pongo una escala de intensidades

Map.addLayer(image, {min: 0, max: 3000});

//La descargo

var path = image.getDownloadURL({

  //Asigno a cada pixel 1000x1000m

  'scale': 1000,

  //Selecciono un rectángulo

  'region': '[[[-11.9750976562,35.87124685],[4.9707062244,35.87124685],[4.9707062244,41.0402187131],[-11.9750976562,41.0402187131],[-11.9750976562,35.87124685]]'

});

//Obtengo un enlace para descargar la imagen

print(path)
```

SR en Agosto

```
//Poligono dentro del cual quiero obtener las imagenes del Sentinel-2

var geometry = ee.Geometry.Polygon(

  [[[[-11.9750976562,34.87124685],[4.9707062244,34.87124685],[4.9707062244,41.0402187131],[-11.9750976562,41.0402187131],[-11.9750976562,34.87124685]]]]);

//Imagenes que se encuentren en el poligono anterior y en un rango de fechas,Agosto

//El satellite no recorre toda la superficie terrestre en 1 día.
```

```
var s2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2').filterBounds(geometry).filterDate('2016-08-01',  
'2016-08-10');
```

```
//Compone todas las imágenes en una sola.
```

```
var imageS2=s2.mosaic();
```

```
//Función que devuelve el SR según su fórmula.
```

```
var SR = function(image) {  
  return ee.Image(0).expression(  
    'float(eigth/four)',  
    {  
      'eigth': image.select('B8'),  
      'four': image.select('B4')  
    });  
};
```

```
//Se aplica la función a la imagen compuesta anteriormente
```

```
var sr=SR(imageS2)
```

```
//Añado la capa al mapa para visualizarlo
```

```
Map.addLayer(sr);
```

```
//Al igual que en el caso anterior descargo la misma región con la escala que quiera.
```

```
var path = sr.getDownloadURL({  
  'scale': 1000,  
  'region': '[[  
11.9750976562,35.87124685],[4.9707062244,35.87124685],[4.9707062244,41.0402187131],[-  
11.9750976562,41.0402187131],[-11.9750976562,35.87124685]]'  
});  
  
//Enlace para descargar la imagen  
print(path);
```

MNDWI en abril

```
//Poligono dentro del cual quiero obtener las imagenes del Sentinel-2
var geometry = ee.Geometry.Polygon(
  [[[
    11.9750976562,34.87124685],[4.9707062244,34.87124685],[4.9707062244,41.0402187131],[-
    11.9750976562,41.0402187131],[-11.9750976562,34.87124685]]]);

//Imágenes que se encuentren en el poligono anterior y en un rango de fechas,
//El satélite no recorre toda la superficie terrestre en 1 día.
var s2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2').filterBounds(geometry).filterDate('2016-04-01',
'2016-04-15');

//Compone todas las imágenes en una sola.
var imageS2=s2.mosaic();

//Función que devuelve el NDII según su fórmula.
var MNDWI = function(image) {
  return ee.Image(0).expression(
    'float((three-eleven)/(three+eleven))',
    {
      'three': image.select('B3'),
      'eleven': image.select('B11'),
    });
};

//Se aplica la función a la imagen compuesta anteriormente
var mndwi=MNDWI(imageS2)

//Añado la capa al mapa para visualizarlo
Map.addLayer(mndwi);

//Al igual que en el caso anterior descargo la misma región con la escala que quiera.
var path = mndwi.getDownloadURL({
  'scale': 1000,
  'region': '[[[
    11.9750976562,35.87124685],[4.9707062244,35.87124685],[4.9707062244,41.0402187131],[-
    11.9750976562,41.0402187131],[-11.9750976562,35.87124685]]]'
});

//Enlace para descargar la imagen
print(path);
```

Apéndice 2

A continuación se explican los pasos a seguir para introducir las imágenes de los índices en el modelo Maxent, así como el proceso de introducción de datos al programa y posterior procesamiento de los resultados a través del SIG QGIS.

Una vez hemos generado el código como por ejemplo con los ejemplos anteriores pinchamos en el enlace que nos proporciona Google Earth Engine y descargamos la imagen en formato TIF, repetimos este proceso 67 veces para la elevación y los 33 índices de agosto y abril, y posteriormente con ayuda de QGIS convertimos su formato de TIF a ASCII con el fin de poder introducir los datos en el Maxent.

Primero abrimos el programa QGIS, luego hacemos click en la barra de arriba Capa-> Añadir Capa-> Añadir Capa Ráster. Una vez tenemos la capa pasamos de TIF a ASCII haciendo click en la barra de arriba en Ráster-> Conversión-> Traducir (convertir formato) donde seleccionamos el nombre del archivo de salida en ASCII y seleccionamos la opción de que si hay ausencia de información coloque un 0. Todas las capas en ASCII hemos de guardarlas en una misma carpeta para usarlas con el Maxent.

En cuanto a las presencias del sapo hemos de ponerlas en un fichero csv separado por comas con tres columnas: 'species','longitude','latitude'. Las ocurrencias que hemos utilizado se pueden encontrar en la referencia [32].

El siguiente paso es ejecutar el Maxent, para ello abrimos el programa e introducimos los datos en las casillas que nos piden, en la figura 22 se muestra un ejemplo ilustrativo.

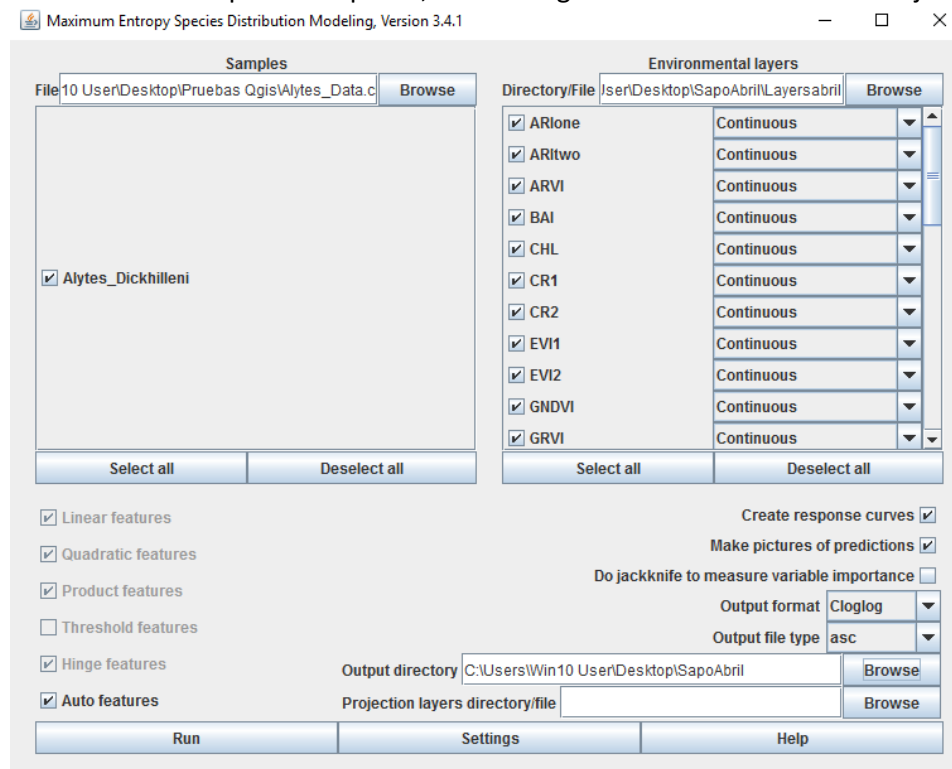


Figura 22: Introducción de datos en el modelo Maxent, en la ventana de arriba a la izquierda introducimos las ocurrencias de las especies, a la derecha las capas ambientales, seleccionamos las casillas de curvas de respuesta y una imagen con un mapa de predicción y finalmente seleccionamos una carpeta donde ver los resultados.

Para visualizar bien los resultados abrimos el fichero ASCII obtenido de la ejecución del Maxent como capa ráster y cambiamos en la escala de colores Capa-> Propiedades -> Estilo y seleccionamos unibanda pseudocolor clasificando los colores de rojo a verde en nuestro caso dando valores de 0 a 1 de probabilidad. Finalmente, para ver un mapa como el de los resultados de los casos 1, 2 y 3 añadimos la capa de las casillas 10x10km del SIARE seleccionando Capa -> Añadir Capa Vectorial y finalmente los puntos de las ocurrencias de los sapos haciendo click en Añadir capa de texto delimitado.