

5. METODOLOGÍA



Los datos básicos descritos en el apartado anterior deben ser procesados para generar información adaptada a los requerimientos del trabajo. Por ejemplo, la información climática asignada inicialmente a estaciones meteorológicas, debe ser transformada en mapas que cubran la totalidad del territorio analizado. En este capítulo se especifican los métodos que han sido utilizados para este tipo de procesos. También se explican los fundamentos del método de modelización y la interpretación de los resultados que genera.

5.1. Generación de los mapas de clima reciente

Para elaborar los mapas climáticos de base, referidos al periodo 1961-1990, se generaron en primer lugar mapas de elementos puntuales (estaciones), cada uno de los cuales contiene todas las estaciones con datos, aunque sean parciales, en un año determinado. Cada estación en cada mapa tiene asociados los valores de temperaturas medias de las máximas, de las mínimas y de precipitaciones para cada mes de ese año.

Los mapas de precipitaciones y temperaturas se construyeron a partir de los de estaciones mediante un proceso de interpolación y, en el caso de las temperaturas, una modificación por gradiente altitudinal. Se ha utilizado el *kriging* como algoritmo de interpolación ya que tras ensayar múltiples opciones fue el método que ofrecía consistentemente errores menores en los contrastes por validación cruzada.

Los mapas resultantes del *kriging* son satisfactorios para zonas sin excesivo relieve pero en España las estaciones meteorológicas están generalmente ubicadas en cotas bajas y casi ausentes en las zonas de montaña. Esto significa que las interpolaciones, al establecerse con el único apoyo de los datos de las estaciones, no tienen en cuenta los efectos altitudinales de las zonas más elevadas. El efecto es importante porque en España la superficie de territorio con elevaciones superiores a las más altas estaciones meteorológicas locales es de más de 40% del territorio.

Para reducir este problema y mejorar las estimaciones en ese 40% del territorio se estimaron los gradientes térmicos altitudinales para cada variable climática y cada mes a par-

tir de 1970 y se aplicaron sobre las zonas que están por encima de las estaciones meteorológicas locales más elevadas. Se obtiene así una nueva serie de mapas donde las zonas montañosas ven decrecer sus valores de temperaturas en función de los gradientes empíricos.

Finalmente, todo el conjunto de los mapas mensuales se sintetizó haciendo la media aritmética de los mapas por meses para el periodo 1961-1990.

5.2. Generación de los mapas de clima futuro

La información original de la AEMET para el clima futuro se ha procesado cartográficamente de forma similar a la descrita para el clima reciente.

Los valores absolutos de las variables climáticas estimados para el futuro en los distintos modelos regionales no pueden ser utilizados directamente, debido a la existencia de un error sistemático en cada proyección, sino que debe ser corregido. Por tanto, los datos se sometieron a un proceso de corrección del error sistemático, que se lleva a cabo teniendo en cuenta el incremento positivo o negativo de cada variable en las proyecciones respecto de los valores obtenidos en el periodo de control en las mismas variables.

5.3. Modelos de distribución potencial

El área geográfica donde una especie animal o vegetal aparece es normalmente una fracción del área que potencialmente podría ocupar. La reducción del área de distribución actual respecto al área de distribución potencial se

debe a un conjunto complejo de causas, tanto naturales como antropogénicas.

Entre las primeras figuran factores tanto abióticos (topográficos, geológicos y climáticos) como bióticos (competencia interespecífica, capacidad de dispersión). En zonas como España, densamente pobladas desde hace milenios, el hombre ha intervenido intensamente en esa reducción y tanto los hábitats como las especies tratadas individualmente ocupan áreas reducidas respecto a su distribución potencial.

5.3.1. Modelos de distribución potencial actuales

A través de los mapas y de los inventarios es posible conocer el área de distribución actual de una especie. El fundamento de los modelos de distribución potencial (MDP) es utilizar el área de distribución actual como muestra para estimar el área de distribución potencial usando un conjunto de variables que puedan explicar dichas distribuciones al menos parcialmente.

El procedimiento genérico para construir el MDP de un taxón se organiza en una serie de pasos:

1. Localizar geográficamente las presencias del taxón y, si es posible, establecer igualmente puntos de ausencia. En el caso frecuente de que no existan registros de ausencias éstas se generan mediante muestreo aleatorio sobre el territorio no ocupado.
2. Definir un conjunto de variables descriptivas que se utilizarán como predictores para definir un nicho ambiental para cada especie a partir de los datos de presencias y ausencias disponibles. En este trabajo se han usado las variables climáticas.
3. Extraer para cada punto de presencia o ausencia los valores de las variables independientes que le corresponden en esa localización geográfica. El conjunto de registros presencia/ausencia, coordenadas geográficas, valores de variables descriptivas forma lo que se llama muestra de entrenamiento.

4. Establecer una relación estadística entre las variables descriptivas y la variable dependiente (presencia/ausencia). Este proceso consiste en generar un algoritmo que relacione cada combinación de variables independientes con la presencia o ausencia de la especie analizada. Esta relación se denomina modelo estadístico, y expresa la probabilidad de que una especie esté presente en un lugar en función de los valores de las variables descriptivas.
5. Valorar la bondad del modelo estadístico, es decir, hasta qué punto dicho modelo ha podido describir correctamente la relación entre los datos de presencia y ausencia que se le han suministrado.
6. Construir el modelo cartográfico o modelo de distribución potencial (MDP) a partir del modelo estadístico. Este procedimiento se realiza etiquetando cada punto del área de estudio con el valor de probabilidad que le corresponda en función de los valores de las variables independientes en ese punto.

El MDP de un taxón es un mapa que representa lo adecuado o inadecuado del territorio para la presencia de la especie en una escala continua que suele ajustarse al rango 0-1 (0: incompatible, 1: idóneo). Que un punto del terreno tenga un valor próximo a 1 significa que las variables descriptivas en ese punto son muy similares a las que existen en las zonas de presencia actual de la especie por lo que, en ausencia de otros factores, ese lugar puede considerarse compatible para el taxón.

Un modelo estadístico puede construirse con una amplia variedad de métodos. Posiblemente el más usado ha sido hasta hace pocos años la regresión logística multivariante, aunque recientemente los investigadores han comenzado a explorar otros métodos buscando superar las limitaciones inherentes a los métodos paramétricos clásicos.

En este trabajo se ha usado un algoritmo denominado MAXENT para generar los modelos. El motivo es que trabajos anteriores y pruebas realizadas por este grupo de investigación han

mostrado que MAXENT tiene cuatro propiedades que aconsejan su uso: genera resultados coherentes espacialmente, siempre muestra valores de ajuste situados entre los máximos comparado con otros métodos, se adapta bien a las muestras de tamaño reducido y puede ser automatizado para la producción de grandes cantidades de modelos.

5.3.2. Modelos de distribución potencial futuros

La posible influencia del cambio climático en la distribución de una especie se ha evaluado de acuerdo con los siguientes pasos:

- se construye el MDP actual usando como variables descriptivas las variables climáticas medidas en el periodo de base 1961-1990.
- se estiman los valores de variables climáticas para un periodo futuro de acuerdo con los procedimientos explicados en otras secciones.
- se aplica el modelo estadístico generado para 1961-1990 usando los valores proyectados de las variables climáticas.

5.3.3. Segmentación de los modelos en clases discretas

Los modelos cartográficos muestran valores continuos en el rango 0-1, donde 0 indica incompatibilidad y 1 idoneidad. Para realizar algunas estadísticas de superficie y comparar entre periodos temporales es conveniente segmentarlos en dos únicas clases (adecuado/inadecuado) para lo cual es necesario elegir un punto de corte o umbral.

En el caso de los taxones del Mapa Forestal, se ha elegido el punto de corte que deja fuera del área adecuada un 0,025% de las presencias. Este pequeño porcentaje tolerado de errores dejará fuera a los casos erráticos si es que existen y no supondrá modificaciones sustanciales del área total si no existen. En el caso de las especies de flora amenazada, de presencia mucho más escasa, se ha elegido el umbral mínimo que acoge todas las presencias. Sólo en

el caso de que una de ellas se separe claramente del conjunto se ha fijado el umbral descartándola.

Los umbrales se han calculado para cada taxón y se han aplicado a todos los modelos de distribución potencial actuales y futuros obteniendo nuevos juegos de mapas que son útiles para realizar las estadísticas derivadas de combinaciones de mapas y del análisis de solapamientos e intersecciones entre ellos.

5.4. El método MAXENT

MAXENT es el acrónimo de máxima entropía, un algoritmo que ha sido adaptado para la construcción de modelos de distribución potencial por Steven J. Phillips y colaboradores (Phillips et al., 2004, 2006, 2008). Los resultados que nos ofrece MAXENT incluyen no sólo el MDP sino mucha información que permite a los especialistas analizar las posibles relaciones funcionales que el modelo puede revelar entre la presencia del taxón y las variables descriptivas. Entre ellos están los gráficos y tablas de errores de omisión, la curva ROC (*receiver operating characteristic*) y estadístico AUC (área bajo la curva), la importancia de cada variable en la construcción del modelo y un conjunto de curvas donde se muestra cómo varía la presencia del taxón ante los diversos valores que toma cada variable.

La bondad de los modelos estadísticos se ha estimado mediante el estadístico AUC, cuyos valores pueden estar entre 0,5 y 1. Un valor de 0,5 significa que el modelo no tiene valor discriminante (es equivalente a una clasificación al azar) y, en el otro extremo, un valor de 1 indica que el modelo ha separado presencias de ausencias con un ajuste perfecto, sin errores.

Convencionalmente se suele aplicar una escala de interpretación de los AUC como la siguiente:

- $AUC > 0,95$ La distribución actual se explica muy bien a partir de las variables climáticas, el modelo es excelente.
- $0,85 < AUC < 0,95$ La distribución actual se explica bien a partir de las variables climáticas, el modelo es bueno.

- $0,75 < AUC < 0,85$ La distribución actual se explica moderadamente bien a partir de las variables climáticas, el modelo es aceptable.
- $AUC < 0,75$ La distribución actual se explica sólo parcialmente a partir de las variables climáticas, el modelo es pobre.

Estos límites no deben interpretarse literalmente pero dan una idea aproximada del significado del AUC en este tipo de modelos. Normalmente, los modelos de especies ubicuas muestran valores de AUC más bajos que los de las especialistas o exigentes, es decir, es más fácil modelizar especies ligadas a entornos muy concretos (por ejemplo, *Abies alba*) que especies resistentes a las condiciones climáticas y distribuidas por la casi totalidad del área de estudio (por ejemplo, *Quercus ilex* subsp. *ballota*).

5.5. Categorías de vulnerabilidad

No existe consenso sobre un indicador que represente adecuadamente la vulnerabilidad futura de una especie. En Settele (2008) se usa el porcentaje de pérdida de superficie potencial. Los sujetos de ese estudio son lepidópteros por lo que su capacidad de dispersión puede ser mayor que la de muchas especies incluidas en el presente análisis. Por ese motivo se ha considerado adecuado completar este porcentaje con un indicador sobre el posible desplazamiento del área potencial futura respecto al área actual, de manera que se representen los cambios espaciales absolutos y no sólo de superficies.

El indicador **IV** (índice de vulnerabilidad) que hemos utilizado se define de la forma siguiente:

$$IV = 1 - ((APF \cap AOA) \cdot (APF \cap APA))$$

donde

- $(APF \cap AOA)$ es la intersección entre el área potencial futura y el área ocupada actual (en tanto por uno).
- $(APF \cap APA)$ es la intersección entre el área potencial futura y el área potencial actual (en tanto por uno).

El primer componente es un estimador de la persistencia del área potencial ante el cambio climático y penaliza su cambio espacial (aunque el área potencial futura sea amplia). De esta manera, si el área potencial actual se mantiene en gran medida en el futuro (aunque no esté ocupada realmente a día de hoy), el índice de vulnerabilidad disminuye, pues se considera que en esta situación cabe el diseño de planes y actuaciones de conservación con más posibilidades reales de éxito.

El segundo componente es indicador de la posibilidad de que las poblaciones existentes hoy se mantengan en su área de distribución actual: si el área potencial futura no se superpone con el área de ocupación real, las poblaciones actuales desaparecerán y el futuro se verá mucho más comprometido.

La multiplicación de ambos componentes se realiza porque se supone un efecto sinérgico. Consecuentemente, la escala resultante no es lineal por lo que se han elegido intervalos de clases diferentes, estrechos en la vulnerabilidades más altas y más anchos en las más bajas. Se ha establecido una escala de vulnerabilidad por cambio climático similar a la del estudio mencionado anteriormente (Settele, 2008), tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Criterios y categorías de vulnerabilidad.

Categoría	Vulnerabilidad	IV
A	Crítica	$IV \geq 0,95$
B	Muy alta	$0,85 \leq IV < 0,95$
C	Alta	$0,70 \leq IV < 0,85$
D	Media	$0,40 \leq IV < 0,70$
E	Leve	$0,00 \leq IV < 0,40$
F	Inexistente	$IV < 0,00$

5.6. Riqueza específica potencial

Como se comentó anteriormente, los modelos de distribución potencial se reclasifican en dos clases (adecuado/inadecuado) mediante la elección objetiva de un valor de corte. Esta simplificación permite no sólo operar con superficies para obtener los estadísticos que aparecen en las fichas sino tam-

bién superponer los mapas de todos los taxones en un mapa sintético donde aparece en cada lugar el valor correspondiente al número de especies potencial de la muestra considerada.

Los mapas de riqueza específica potencial elaborados en este trabajo no son mapas de biodiversidad sino sólo indicadores de cuántas de las especies modelizadas tienen un valor de idoneidad alto en cada punto del territorio y, lógicamente, dependen estrechamente de los grupos taxonómicos modelizados. Representan una forma de sintetizar los modelos de distribución potencial y por su valor han sido utilizados ampliamente en la bibliografía para diversos grupos taxonómi-

cos y en un enfoque global tal como puede verse Cumming (2000), Hortal et al. (2004) o Wohlgemuth et al. (2008).

Con esta interpretación se usarán los mapas de riqueza específica potencial como síntesis de las tendencias en el tiempo tanto a nivel general como en las estadísticas por Comunidades Autónomas y Espacios Protegidos. Los mapas de riqueza específica se han construido sumando todos los mapas de los taxones del Mapa Forestal de España con la intención de representar los elementos que conforman la estructura básica de las formaciones vegetales por lo que no debe perderse de vista que se elaboran con un conjunto limitado de especies.

