

## EVALUACIÓN DEL EFECTO BARRERA DE LAS VÍAS DE TRANSPORTE ANDALUZAS AL DESPLAZAMIENTO DE LA FAUNA COMO RESPUESTA AL CAMBIO CLIMÁTICO

Real R. (1) y Márquez A. L. (1)

(1) Universidad de Málaga, Grupo de Biogeografía, Diversidad y Conservación, Dpto. Biología Animal, Fac. Ciencias, Campus de Teatinos s/n, 29071 Malaga. rrgimenez@uma.es.

**Resumen:** Se evaluó el posible efecto barrera de las infraestructuras viarias de Andalucía al desplazamiento de las distribuciones futuras que previsiblemente tendrán que efectuar 20 especies amenazadas de tetrápodos no voladores para responder al cambio climático. Para elaborar los modelos ambientales se usó la función de favorabilidad y se consideraron dos modelos de circulación (CGCM2 y ECHAM4) y dos escenarios de emisiones (A2 y B2). Solo se ha predicho un desplazamiento de las áreas favorables en el futuro para *Salamandra salamandra*. La favorabilidad ambiental de *S. salamandra* se verá reducida en la mitad occidental, mientras que en el cuadrante nororiental se incrementará. El posible efecto barrera de las infraestructuras viarias para esta especie se evaluó teniendo en cuenta el posible flujo entre áreas separadas por ellas. *Salamandra salamandra morenica* tendrá que superar las barreras de la línea férrea Córdoba–Almorchón y del Ave Sevilla–Córdoba–Madrid para alcanzar las zonas más favorables situadas en el cuadrante nororiental.

**Palabras clave:** Biogeografía predictiva, conectividad, función de favorabilidad, modelación espacial, salamandra

**Abstract (Assessment of the barrier effect of Andalusian transport infrastructures to movement of wildlife in response to climate change):** We evaluated the transport infrastructures' potential barrier effect in Andalucía to future distribution shifts of 20 threatened flightless tetrapod species in response to climate change. To develop environmental models for each species we used the favorability function and we considered two circulation models (CGCM2 and ECHAM4) and two emission scenarios (A2 and B2). We only detected a shift in favorable areas in the future for *Salamandra salamandra*. The environmental favorability of *S. salamandra* was predicted to be reduced in the western half of Andalucía, while in the northeast quadrant it will be increased. The possible barrier effect of transport infrastructures for this species was evaluated considering the flow between areas separated by them. *Salamandra salamandra morenica* will have to overcome the barriers of the railroad Córdoba–Almorchón and Ave Sevilla–Córdoba–Madrid to reach the most favorable areas in the northeast quadrant.

**Key words:** Connectivity, favourability function, predictive biogeography, salamander, spatial modeling

### INTRODUCCIÓN

Andalucía participa de una de las regiones de más alta biodiversidad de la Tierra (Myers and Giller, 1988). La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza mantiene que los ecosistemas andaluces suelen ser pobres en nutrientes y sometidos a estrés estacional, pero ricos en especies. La mayoría de los taxones presentan altos niveles de diversidad, tanto a nivel de especie como de subespecie.

Andalucía, como la mayoría de las regiones europeas, presenta un elevado desarrollo económico, de forma que, en general, los ecosistemas naturales han sido alterados o destruidos por los usos del suelo dominantes, como son los relacionados con la agricultura o el desarrollo urbano. Por esta causa, uno de los grandes desafíos del siglo XXI se refiere al esfuerzo concertado para desarrollar y aplicar estrategias diseñadas para evitar la pérdida de biodiversidad. Esta tarea se hace cada vez más crucial debido al crecimiento de la población humana, los elevados niveles de uso de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas, que pueden afectar al clima general de la Tierra. A esto hay que añadir que el aumento de la demanda de suelo por parte del ser humano y la construcción de estructuras viarias se traduce en altas tasas de pérdida y fragmentación de hábitat para otras especies. La asociación entre cambio climático y fragmentación de hábitat de origen humano amenaza, por tanto, a un buen número de poblaciones (Gaston, 2000).

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC), en su informe del año 2007, ha puesto de manifiesto el consenso científico básico sobre la realidad de este cambio, aunque no faltan disidentes, así como la necesidad de implementar medidas mitigadoras de sus efectos. Como consecuencia, la comunidad científica y las administraciones con competencia en conservación muestran un interés creciente en predecir la respuesta espacial de las especies a los cambios previsibles en el clima, para anticipar la necesaria adaptación de las medidas de conservación a tomar (Araújo et al., 2004, Real et al., 2010). Evaluar las posibilidades de cambio de las distribuciones de las especies en función de los diferentes escenarios de cambio climático se hace, por tanto, necesario para, por ejemplo, conocer cómo cambiarán las áreas climáticamente favorables para las

especies en el futuro y cómo se pueden ver afectadas las posibles respuestas a tales cambios por el efecto barrera de las infraestructuras públicas.

Numerosas especies ibéricas de vertebrados se encuentran claramente amenazadas. Por ello, es previsible que las áreas favorables para estas especies se vean modificadas si el clima cambia como prevé el IPCC, por lo que las especies deberán distribuirse por áreas diferentes a las actuales para adaptarse a esas modificaciones.

Los estudios de modelación biogeográfica se están convirtiendo, cada vez más, en herramientas fundamentales para la gestión racional de la fauna y para la conservación del medio ambiente en este contexto de un mundo en permanente cambio. Los modelos espaciales permiten hacer inferencias sobre la distribución de las especies en función de las características ambientales, bióticas, espaciales y humanas del territorio estudiado, aún cuando no exista un conocimiento exhaustivo de la distribución de las especies.

Este tipo de modelos han sido utilizados en este estudio para pronosticar la evolución de las condiciones favorables para las especies de tetrápodos no voladores amenazados en distintos escenarios de cambio climático en Andalucía hasta el año 2040. Igualmente se ha analizado el posible efecto de barrera que las grandes infraestructuras viarias de Andalucía pueden ejercer sobre los desplazamientos de estas especies para responder a estos cambios climáticos en la región.

## METODOLOGÍA

Se elaboraron modelos de favorabilidad ambiental para 20 especies de tetrápodos no voladores con algún grado de amenaza en Andalucía (Franco y Rodríguez, 2001, Ley8/2003 de 28 de octubre, de la flora y la fauna silvestre, BOJA 128: 23790-23810) con las variables climáticas de los modelos de circulación CGCM2 y ECHAM4, y los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero A2 y B2, usando la regresión logística por pasos hacia delante y la función de favorabilidad (Real et al., 2006).

<i>Anfibios</i>	<i>Reptiles</i>	<i>Mamíferos</i>
<i>Salamandra salamandra</i> (VU)	<i>Emys orbicularis</i> (VU)	<i>Atelerix algirus</i> (EN)
<i>Alytes dickhilleni</i> (VU)	<i>Testudo graeca</i> (EN)	<i>Neomys anomalus</i> (EN)
<i>Triturus pygmaeus</i> (*)	<i>Lacerta schreiberi</i> (CR)	<i>Talpa occidentalis</i> (VU)
	<i>Algyroides marchi</i> (VU)	<i>Canis lupus</i> (CR)
	<i>Coronella austriaca</i> (EN)	<i>Lutra lutra</i> (VU)
	<i>Vipera latasti</i> (VU)	<i>Lynx pardinus</i> (EN)
		<i>Capreolus capreolus</i> (VU)
		<i>Sciurus vulgaris</i> (VU)
		<i>Arvicola sapidus</i> (VU)
		<i>Chionomys nivalis</i> (EN)
		<i>Microtus cabreræ</i> (CR)

Tabla1. Especies con algún grado de amenaza en Andalucía. (CR): en peligro crítico, (EN): en peligro, (VU): vulnerable, (\*): con interés de conservación.

Se evaluaron tres aproximaciones para elaborar los modelos. En primer lugar se usaron los modelos de las especies obtenidos para toda España proyectados solo en Andalucía (NAC). La segunda aproximación fue actualizar los modelos nacionales usando las mismas variables y recalibrándolos con los datos de las variables para Andalucía (ACT). La tercera opción fue elaborar un modelo para cada especie exclusivamente con los datos de Andalucía (REG).

Los criterios para evaluar los modelos resultantes de las diferentes aproximaciones han sido: Cohen's kappa con un umbral de favorabilidad de 0.5, AUC (Area Under the Curve) y AIC (Akaike Information Criterion) (Real et al., 2010, Márquez et al., 2011) para determinar su capacidad de clasificación, de discriminación y la parsimonia de los mismos, respectivamente. La calibración de los modelos se estimó usando RSME (Root Mean Square Error) de las presencias predichas y observadas en diez intervalos de igual rango de probabilidad. Se consideró como bien calibrados aquellos modelos con el menor RSME de las tres aproximaciones que cumplieran la condición de que en los 10 intervalos de igual rango de probabilidad considerados haya más de 15 cuadrículas y su probabilidad media \* n° cuad  $\geq 5$ .

Para los modelos bien calibrados se calculó la diferencia entre la favorabilidad futura y la presente. Las infraestructuras viarias que dificulten el desplazamiento de las distribuciones de las especies desde las zonas con pérdida futura de favorabilidad a las zonas donde se pronostica un incremento de la misma serán las que podrían ejercer un efecto barrera.

Para la evaluación del efecto barrera se estimó el posible flujo entre áreas separadas por una infraestructura viaria. En cada área se promedió la diferencia de favorabilidad futura y presente. Se considera que el flujo va a ir desde zonas con mayor pérdida de favorabilidad (valores negativos, que indican que esa zona será más desfavorable en el futuro de lo que es en el presente) hacia zonas con menor pérdida o con aumento de favorabilidad (valores positivos, que indican que esa zona será más favorable en el futuro de lo que es en el presente). La intensidad del flujo se establece como la diferencia entre los promedios de cambio de favorabilidad de cada zona separada por una infraestructura viaria.

**RESULTADOS**

Para los tres modelos de circulación, el mayor número de modelos de favorabilidad ambiental con la mejor evaluación se dio en aproximación del modelo actualizado (ACT). La aproximación regional (REG) también es aceptable para algunas especies. En ningún caso la aproximación nacional (NAC) fue la mejor. Solo algunos modelos actualizados cumplían los estrictos criterios de calibración. *S. salamandra* y *Lutra lutra* son las únicas especies con modelos de favorabilidad ambiental bien calibrados para todos los modelos de circulación y escenarios.

Los modelos obtenidos para todas las especies se proyectaron al año 2040 y para la mayoría de las especies se predijo que las áreas favorables experimentarán una contracción, por lo que no se prevén grandes desplazamientos de las áreas favorables. Solo se ha predicho un desplazamiento de las áreas favorables en el futuro para *S. salamandra*.

Los valores para los criterios de evaluación y calibración para todos los modelos de favorabilidad ambiental de *S. salamandra* para las tres aproximaciones se muestran en la Tabla 2. En ella se destaca que los modelos actualizados presentan la mejor evaluación con los valores más bajos de AIC y RMSE y más altos de AUC y kappa.

De los modelos actualizados para salamandra el mejor calibrado resultó ser el realizado con las variables climáticas del modelo de circulación ECHAM4-A2/B2 (Fig.1).

Solamente se evaluó para el futuro el modelo de la salamandra mejor calibrado (ECHAM4) en cada uno de los escenarios A2 y B2 (Fig. 2 y 3).

		Modelo-escenario		
		CGCM2-A2	CGCM2-B2	ECHAM4-A2/B2
NAT	AIC	903.15	896.59	847.75
	AUC	0.833	0.835	0.849
	kappa	0.46	0.461	0.498
	RMSE	0.0902	0.0904	0.0755
REG	AIC	710.63	724.92	719.4
	AUC	0.906	0.9	0.899
	kappa	0.658	0.652	0.658
	RMSE	0.1266		0.0881
ACT	AIC	605.7	587.4	648.3
	AUC	0.932	0.936	0.924
	kappa	0.702	0.714	0.662
	RMSE	0.083	0.0665	0.0626

Tabla2. Criterios de evaluación y calibración de los modelos ambientales de *S. salamandra* para cada modelo de circulación–escenario y cada aproximación. En gris se ha destacado la aproximación mejor valorada.

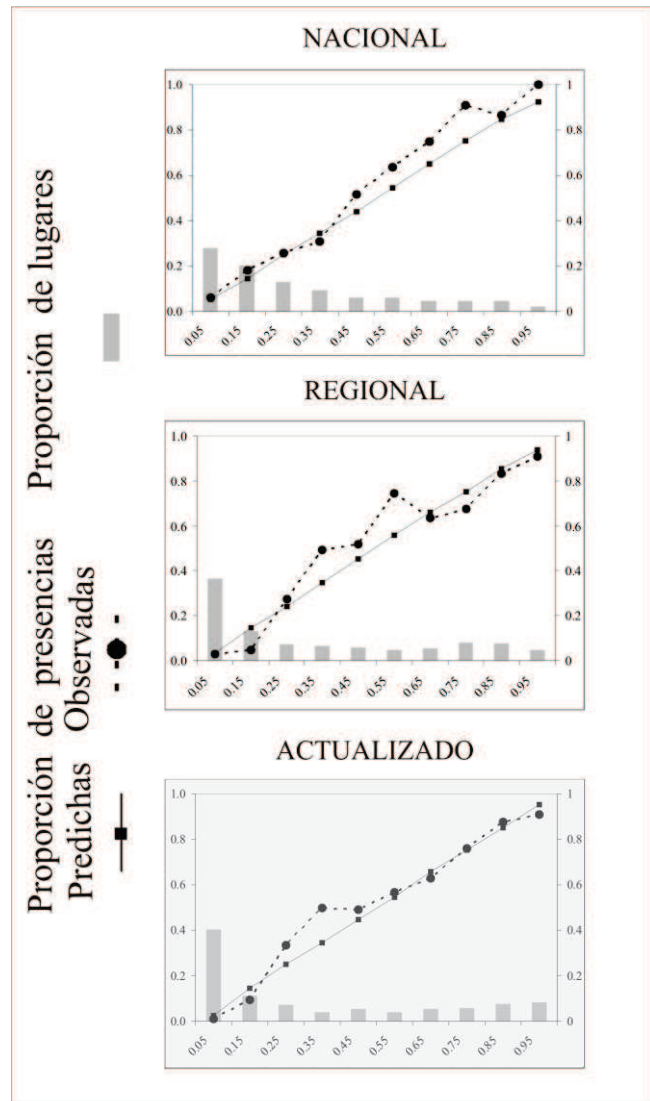


Fig. 1 Gráficas de calibración de los modelos para *S. Salamandra* en el escenario ECHAM4-A2/B2 para las tres aproximaciones. Se ha resaltado en gris el modelo mejor calibrado y que cumple estrictamente los criterios de calibración (todos los intervalos de probabilidad tienen más de 15 cuadrículas y n° cuad\*Probablilidad media ≥ 5).

En el escenario ECHAM4-A2 es donde se produce las mayores diferencias entre pérdidas y ganancias en el futuro (Tabla 3, Fig. 4). La favorabilidad ambiental de *S. salamandra*, de acuerdo con las predicciones climáticas del modelo de circulación ECHAM4-A2, se verá reducida en la mitad occidental, mientras que en el cuadrante nororiental se incrementará su favorabilidad ambiental (Fig. 4).

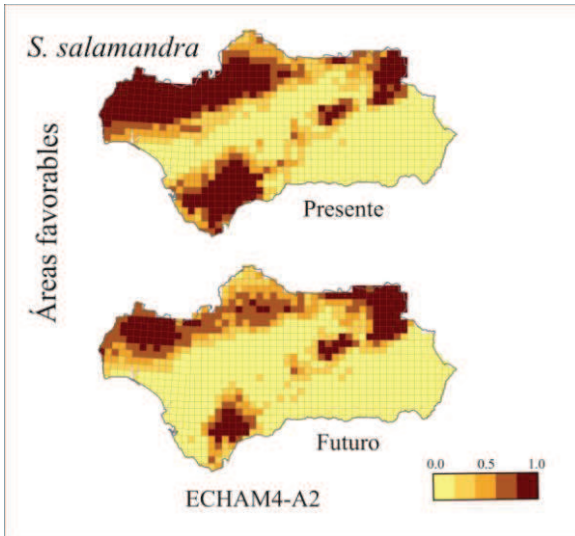


Fig. 2 Mapas de favorabilidad ambiental para *S. salamandra* en el escenario ECHAM4-A2.

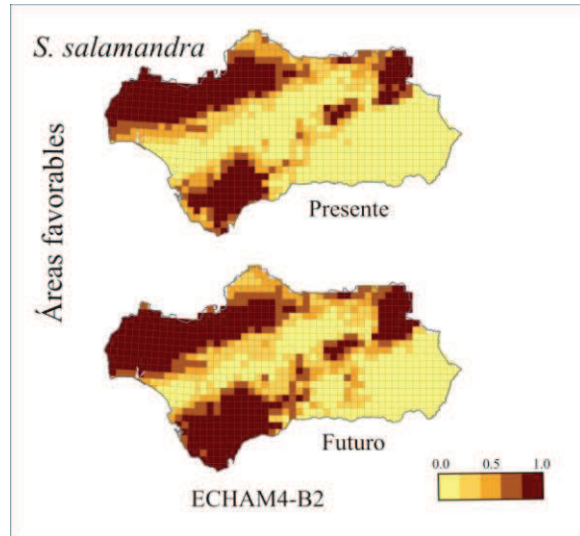


Fig. 3: Mapas de favorabilidad ambiental de *S. salamandra* para el escenario ECHAM4-B2.

Diferencias favorabilidad futuro-presente		
Escenarios	Mínimo	Máximo
ECHAM4-A2	-0.7181	0.4765
ECHAM4-B2	-0.1993	0.6566

Tabla 3. Diferencias mínimas y máximas entre las favorabilidades ambientales futuras (2040) y presentes de *S. salamandra*. Se destaca el caso con mayor diferencia entre pérdidas y ganancias futuras.

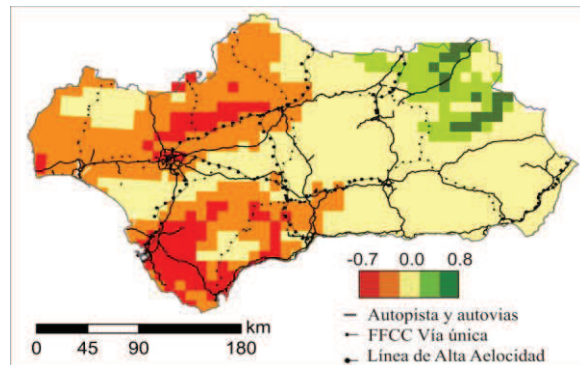


Fig. 4. Diferencias de favorabilidad ambiental entre el futuro (2040) y el presente para *S. salamandra* en el escenario ECHAM4-A2. Las zonas en tonos rojizos tendrán pérdidas de favorabilidad ambiental y las zonas en tonos verdes incrementarán la favorabilidad ambiental con respecto a la situación actual.

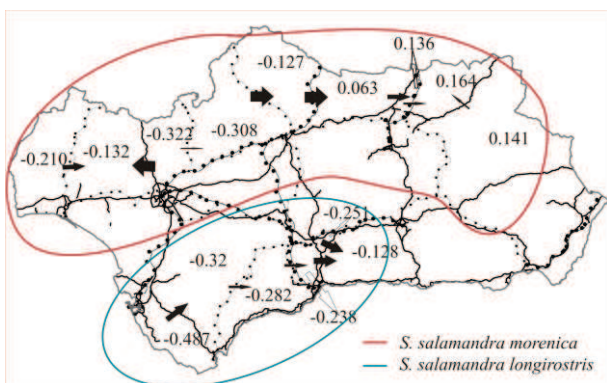


Fig. 5 Posible flujo de desplazamiento de los individuos en el 2040 desde zonas desfavorables a zonas más favorables para las dos subespecies de salamandra (*S. salamandra longirostris* y *S. salamandra morenica*). El grosor de las flechas es proporcional a la magnitud del efecto barrera de la infraestructura sobre la que se sitúa.

El efecto barrera de las infraestructuras viarias para esta especie se evaluó teniendo en cuenta el posible flujo entre áreas separadas por las mismas. En cada área se promedió la diferencia entre la favorabilidad futura y la presente. Se consideró que el flujo va desde zonas con mayor pérdida de favorabilidad hacia zonas con menor pérdida o con aumento de favorabilidad.

La intensidad del flujo se establece como la diferencia entre los promedios de cambio de favorabilidad de cada zona separada por una infraestructura viaria. La subespecie *Salamandra salamandra morenica*, que ocupa áreas montañosas al norte del río Guadalquivir

en Sierra Morena y Sierras de Cazorla, Segura y Alcaraz, tendrá que superar las barreras de la línea férrea Córdoba-Almorchón y la línea del Ave Sevilla-Córdoba-Madrid para alcanzar las zonas más favorables situadas en el cuadrante nororiental.

## **CONCLUSIONES**

Solo para la salamandra en el escenario ECHAM4-A2 se detectó un desplazamiento patente de la distribución de las áreas climáticamente favorables en el futuro con respecto a las áreas favorables del presente. Según este modelo, la favorabilidad ambiental para la salamandra en Andalucía se verá reducida en la mitad occidental y, por el contrario, se incrementará en el cuadrante nororiental.

La reducción de las áreas favorables va a afectar más a *S. salamandra longirostris* que a *S. salamandra morenica*, porque esta última podrá encontrar zonas favorables en el cuadrante nororiental. Sin embargo, *S. s. morenica* tendrá que superar la barreras de la línea férrea Córdoba–Almorchón y la línea férrea de alta velocidad Sevilla-Córdoba-Madrid en los tramos que van desde Córdoba capital hasta el límite septentrional de Andalucía.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen la financiación de los fondos FEDER y de la Agencia de Obra Pública-Consejería de Obras Públicas y Vivienda, Junta de Andalucía (proyecto G-GI3000/IDIG).

## **Referencias bibliográficas**

- Araújo, M.B., Cabezas, M., Thuiller, W. et al. (2004): “Would climate change drive species out of reserves? An assessment of existing reserve-selection methods”. *Glob. Change Biol.*, 10, pp. 1618-1626.
- Gaston, K.J. (2000): “Global patterns in biodiversity”. *Nature*, 40, pp. 220-227.
- Franco A. y Rodríguez M (2001): *Libro Rojo de los Vertebrados Amenazados de Andalucía*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- Márquez A.L., Real, R., Olivero, J., Estrada, A. (2011) Combining climate with other influential factors for modelling climate change impact on species distribution. *Climate Change*, 108, pp 135-157.
- Myers, A., Giller, P. S. (Eds.). (1988). *Analytical biogeography: An integrated approach to the study of animal and plant distributions*. London: Chapman and Hall.
- Real, R., Barbosa, A.M., Vargas, J.M. (2006): “Obtaining environmental favourability functions from logistic regression”. *Environ. Ecol. Stat.*, 13, pp. 237-245.
- Real, R., Márquez A.L., Olivero, J., Estrada, A. (2010): “Species distribution models in climate change scenarios are still not useful for informing policy planning: an uncertainty assessment using fuzzy logic”. *Ecography*, 33, pp. 304-314.