

Biodiversidad y cambio climático

Julián A. Velasco
Gabriela Mendoza-González
Leticia Margarita Ochoa-Ochoa
Rafael Alejandro Lara-Reséndiz



¿Qué sabemos del cambio climático en México?
Colección dirigida por Francisco Estrada Porrúa



PINCC
Programa de Investigación
en Cambio Climático

Biodiversidad y cambio climático

¿Qué sabemos del cambio climático en México?
Colección dirigida por Francisco Estrada Porrúa

Biodiversidad y cambio climático

Julián A. Velasco
Gabriela Mendoza-González
Leticia Margarita Ochoa-Ochoa
Rafael Alejandro Lara-Reséndiz

¿Qué sabemos del cambio climático en México?
Colección dirigida por Francisco Estrada Porrúa

Dewey
551.51
B615

LC
QC902.9
B615

Biodiversidad y cambio climático / colección dirigida Francisco Estrada Porrúa ; colaboradores Julián A. Velasco, Gabriela Mendoza-González, Leticia Margarita Ochoa-Ochoa, Rafael Alejandro Lara-Reséndiz ; coordinación editorial Rubén Darío Martínez Ramírez ; edición Gerardo Mendiola Patiño ; corrección y estilo Samy Zacarías Reyes García, Marisol García Romero ; maquetación y diseño Vanesa Gómez Vivas. -- 1ª. ed. -- Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Investigación en Cambio Climático, 2024.

1 recurso en línea (96 páginas) : il. -- (¿Qué sabemos del cambio climático en México? ; v. 1)

ISBN colección: 978-607-30-8709-4

ISBN volumen: 978-607-30-8710-0

1. CAMBIO CLIMÁTICO-MÉXICO. 2. BIODIVERSIDAD-MÉXICO. 3. COSTAS-ASPECTOS AMBIENTALES-MÉXICO. 4. ANFIBIOS-MÉXICO. 5. REPTILES-NOROESTE DE MÉXICO.

Primera edición 2024

D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, 04510 México, Ciudad de México

Programa de Investigación en Cambio Climático

Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio, sin la autorización escrita de su legítimo titular de derechos

ISBN colección: 978-607-30-8709-4

ISBN volumen: 978-607-30-8710-0

Impreso y hecho en México

Coordinación editorial: Rubén Darío Martínez Ramírez

Cuidado de edición: Gerardo Mendiola Patiño

Corrección de estilo: Samy Zacarías Reyes García y Marisol García Romero

Maquetación y diseño de portada: Vanesa Gómez Vivas



ÍNDICE

- 9** Presentación
- 11** ¿Qué sabemos del cambio climático en México?
- 25** Adaptación basada en ecosistemas: la importancia de la biodiversidad para la resiliencia del sistema costero ante el cambio climático
- 47** Obstáculos en el camino: anfibios y cambio climático (México)
- 73** Efectos del cambio climático en los reptiles del noroeste de México. Una visión ecofisiológica

Presentación

La generación, difusión y divulgación del conocimiento sobre los distintos aspectos del cambio climático son acciones fundamentales para mejorar nuestro entendimiento sobre el fenómeno, sus causas y consecuencias, así como para poder diseñar acciones de adaptación y mitigación adecuadas. Desde el 2021, el Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) de la UNAM inició el ciclo de conferencias y conversatorios “¿Qué sabemos del cambio climático en México?”. Este tipo de esfuerzos de largo aliento y enfocados son poco comunes en la difusión y divulgación del cambio climático en México, siendo que en cada mes del año se aborda a profundidad un tema en particular, con expertos con diversas trayectorias y provenientes de distintas disciplinas. Consideramos que la calidad de los ponentes y de la información presentada en cada uno de los módulos amerita la producción de la presente colección de fascículos temáticos que recoja, en palabras de los expertos participantes, las principales ideas y conclusiones presentadas en las exposiciones. Estos fascículos también tienen la función de vincular al lector de estos textos breves con las presentaciones completas en formato de video con las que se puede profundizar en los distintos temas. El objetivo principal del ciclo de conferencias y de estos volúmenes es dar a conocer la investigación en el tema que se desarrolla en la UNAM y en otras instituciones del país así como promover una visión multidisciplinaria e integral en cambio climático.

Este primer ejemplar reúne tres textos referentes a temas abordados en el Módulo 1, Biodiversidad y cambio climático:

1. Adaptación basada en ecosistemas: La importancia de la biodiversidad para la resiliencia del sistema costero ante el cambio climático presentado por la Dra. Gabriela Mendoza González
1. Obstáculos en el camino: anfibios y cambio climático (México) presentado por la Dra. Leticia Margarita Ochoa Ochoa
2. Efectos del cambio climático en los reptiles del noroeste de México. Una visión ecofisiológica presentado por el Dr. Rafael Alejandro Lara Reséndiz

Adicionalmente, este módulo contó con la presentación “El papel del cambio climático en la historia de la vegetación tropical de México” **presentado por el Dr. Alexander Correa Metrio** que puede consultarse en línea a través del sitio web del PINCC.

Este fascículo incluye una introducción del Dr. Julián A. Velasco quien fue el coordinador del módulo y que nos ofrece una visión general de biodiversidad y cambio climático en México, haciendo especial énfasis en los temas presentados en dicho módulo. La colección de textos se enriquece con un video del conversatorio final realizado con las y los panelistas participantes.

Este esfuerzo busca promover la generación de un mayor interés de la sociedad en la investigación que se realiza en México sobre cambio climático, y en particular la incorporación de las y los jóvenes en la discusión y generación de conocimiento en distintos aspectos del tema y desde la visión de distintas disciplinas.

Todos los módulos y publicaciones se pueden encontrar en la página del PINCC: <https://www.pincc.unam.mx/>

¿Qué sabemos del cambio climático en México?

Módulo 1. Biodiversidad y cambio climático

Julián A. Velasco¹

Introducción

El cambio climático, hoy en día, ya es reconocido como una de las principales amenazas a la existencia del ser humano y la naturaleza (IPCC, 2013). Al ser el clima un motor primario de diferentes procesos biológicos que van desde el nivel individual hasta el ecosistémico, el cambio climático tendrá, sin duda, un impacto potencialmente severo a nivel ecológico y social (Reilly & Schimmelpfennig, 2000; Mora *et al.*, 2013). El consenso científico ha logrado posicionar el hecho de que el cambio climático es inequívoco, y que ha sido principalmente ocasionado por un aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera desde 1750 (IPCC, 2013). El clima es un fenómeno natural muy complejo que depende de múltiples factores, y específicamente hace referencia a las condiciones atmosféricas de un determinado lugar en el tiempo (Rohli & Vega, 2018). En términos generales hay varias propiedades del clima que deben considerarse al momento de hablar de cambio climático: normales, extremos y frecuencias. Los normales se refieren a las condiciones climáticas en promedio para un lugar, y que usualmente son calculadas en períodos de 30 años, por ello dan

¹ Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Correo: javelasco@atmosfera.unam.mx

un panorama de las condiciones climáticas de un sitio a lo largo del año. Los extremos son usados para describir las mediciones máximas y mínimas de las variables atmosféricas que pueden ocurrir en un determinado sitio y tiempo (Mora *et al.*, 2013; 2017; Rohli & Vega, 2018). Estas mediciones extremas también se calculan en un período largo de tiempo, puesto que es con base en los cambios en los máximos y mínimos que se pueden detectar anomalías climáticas en determinadas regiones (Horton, 1995; Sinervo *et al.*, 2010). Finalmente, las frecuencias hacen referencia a la tasa de incidencia de un fenómeno, en particular, por un período de tiempo largo (e.g., frecuencia de inundaciones, tormentas eléctricas o ciclones; Knutson *et al.*, 2010).

Aunque existe mucha evidencia en la que se documentan los impactos del cambio climático en la biodiversidad (Parmesan, 2006; Scheffers *et al.*, 2016; Pecl *et al.*, 2017), la mayoría de estudios se han concentrado en especies y ecosistemas de regiones templadas, particularmente en países como Estados Unidos y en el continente europeo (Lenoir *et al.*, 2020; Antão *et al.*, 2020). Los impactos documentados no solo se han enfocado en evaluar el riesgo de extinción y el colapso poblacional (Wiens, 2016; Román-Palacios & Wiens, 2020), sino que hay evidencia de disturbios en procesos ecológicos (e.g., fenología, reproducción, demografía) y a diferentes escalas desde el nivel genético hasta el nivel de ecosistema (Parmesan, 2006; Scheffers *et al.*, 2016), por ello se esclarece que el cambio climático exacerbará el efecto de otros factores antrópicos (e.g., cambios en el uso de suelo), en el riesgo de extinción de las especies (Brook *et al.*, 2008; Pacifici *et al.*, 2015; Urban, 2015).

Los ecosistemas y especies tropicales se consideran los más susceptibles al cambio climático (Pepin & Lundquist, 2008; Williams *et al.*, 2008; La Sorte & Jetz, 2010a, 2010b), puesto que las especies tropicales se consideran como especialistas térmicos que han evolucionado

en estos ambientes donde hay poca variabilidad climática estacional (Janzen, 1967; Huey *et al.*, 2009). Estas especies tienen preferencias térmicas relativamente más estrechas que las especies de zonas templadas (Addo-Bediako *et al.*, 2000; Deutsch *et al.*, 2008), por lo tanto, tendrán muy poca capacidad para sobrevivir a eventos extremos (e.g., olas de calor; Jiguet *et al.*, 2006). Algunos estudios han evaluado la tasa de extinción de especies en zonas tropicales montañosas usando gradientes altitudinales como sistema modelo (Colwell *et al.*, 2008; Raxworthy *et al.*, 2008; Feeley & Sliman, 2010; Laurance *et al.*, 2011). Si las especies son capaces de rastrear, a través de la geografía, sus preferencias térmicas, entonces es plausible considerar la migración hacia arriba como una respuesta al incremento de temperatura. En este escenario es posible que las especies especialistas de montañas (e.g., aquellas que son endémicas a los picos montañosos) y las especies de zonas bajas, sufrirán las mayores tasas de extinción. La fauna y flora de elevaciones intermedias y de los picos montañosos podrían ser reemplazadas por la migración de especies de zonas bajas y, de esta forma, reducir al mínimo la pérdida neta de biodiversidad en estas franjas altitudinales (Colwell *et al.*, 2008). El punto clave aquí que debe tenerse en cuenta es que la pérdida completa de biotas de zonas bajas, en un incremento eventual de temperatura, no podría ser reemplazada por otros taxones similares. Este fenómeno es conocido como “agotamiento biótico de zonas bajas” (Colwell *et al.*, 2008). Sin embargo, hasta la fecha, ningún estudio ha sido realizado para corroborar estos resultados, por ejemplo, utilizando herramientas de análisis más finas como la combinación de datos demográficos, nichos ecológicos y preferencias fisiológicas térmicas.

El registro fósil muestra que las especies tropicales se han desplazado hacia abajo en los sistemas montañosos durante el Último Máximo Glacial (hace aprox. 20,000 años) y de nuevo se han movido

...hay varias propiedades del clima que deben considerarse al momento de hablar de cambio climático: normales, extremas y frecuencias.



hacia arriba durante la época cálida del Holoceno (hace aprox. 10,000 años) (Flenley, 1998; Bush *et al.*, 2004). Toda esta evidencia sugiere que aún es necesario adoptar enfoques integrativos para la evaluación del impacto del cambio climático sobre especies y ecosistemas. Por lo general, la mayoría de los estudios asumen que las especies exhiben preferencias fisiológicas térmicas que están estrechamente relacionadas con su rango altitudinal, y por lo tanto, no habrá ninguna capacidad de respuesta, ya sea plástica o adaptativa, para afrontar el incremento en temperatura. Por otro lado, estos estudios consideran que todas las especies tienen la misma capacidad de dispersión, y por consiguiente, la respuesta en el movimiento altitudinal será coordinada. En conclusión, hacen falta más estudios que combinen información fisiológica (e.g., preferencias térmicas), demografía (e.g., densidad poblacional, dinámica fuente-sumidero) y de capacidad de dispersión de diferentes taxones, a fin de poder extraer conclusiones más sólidas con respecto a los impactos del cambio climático.

El cambio climático en México es considerado por la academia y el gobierno como un asunto prioritario de investigación, clave para el desarrollo e implementación de políticas públicas efectivas. México es uno de los países en Latinoamérica a la vanguardia en el desarrollo de infraestructura científica para la toma de datos, análisis y proyecciones a futuro del cambio climático (Samaniego, 2010; Delgado *et al.*, 2010; Gay-García *et al.*, 2015). Varios estudios coinciden en que México es un país altamente vulnerable al cambio climático en términos de pérdida de biodiversidad, crecimiento y desarrollo socioeconómico (Martínez y Fernández, 2004; Delgado *et al.*, 2010; IPCC, 2014; Gay-García *et al.*, 2015). La disponibilidad de diversos escenarios climáticos futuros (IPCC, 2014) y el desarrollo de métricas que permiten identificar sitios con anomalías climáticas locales y regionales (García *et al.*, 2014) y climas no-análogos (i.e., combinaciones climáticas no disponibles

actualmente; Williams & Jackson, 2007), facilitarán un análisis de la vulnerabilidad climática de sistemas biológicos y socioeconómicos más precisos. México también es reconocido mundialmente como un país megadiverso, debido a una combinación de factores climáticos, topográficos e históricos (Halffter *et al.*, 2008; Sarukhán, Halffter *et al.*, 2009; Sarukhán, Uquiza-Hass *et al.*, 2015). La complejidad topográfica y variabilidad ambiental en México parece estar asociada con un aumento en las tasas de diversificación de taxones endémicos, además esto favorece la colonización de faunas de origen Neártico y Neotropical (Escalante *et al.*, 2007). Por lo tanto, México es considerado como uno de los países con mayor prioridad de conservación a nivel global y los esfuerzos de conservación a escala global deberían verse reflejados en mayor inversión en gestión de la biodiversidad a nivel nacional.

En este volumen se presentan tres capítulos acerca del estado del conocimiento sobre el impacto del cambio climático en la biodiversidad en México. Se abarcan tres perspectivas de diferentes autores que incluyen impacto en sistemas costeros en términos de adaptación y vulnerabilidad (véase capítulo 1), impactos sobre grupos particularmente susceptibles como son los anfibios (véase capítulo 2) y los reptiles (véase capítulo 3).



Referencias

- Addo-Bediako, A., Chown, S. L., & Gaston, K. J. (2000). Thermal tolerance, climatic variability and latitude. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 267(1445), 739-745. <https://doi.org/10.1098/rspb.2000.1065>
- Antão, L. H., Bates, A. E., Blowes, S. A., Waldock, C., Supp, S. R., Magurran, A. E., Dornelas, M., & Schipper A. M. (2020). Temperature-related biodiversity change across temperate marine and terrestrial systems. *Nature Ecology and Evolution*, 4, 927-933. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1185-7>
- Brook, B. W., Sodhi, N. S., & Bradshaw, C. J. A. (2008). Synergies Among Extinction Drivers Under Global Change. *Trends in Ecology & Evolution*, 23(8), 453-460. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.03.011>
- Bush, M. B., Silman, M. R., & Urrego, D. H. (2004). 48,000 Years of Climate and Forest Change in a Biodiversity Hot Spot. *Science*, 303(5659), 827-829. DOI: 10.1126/science.1090795
- Colwell, R. K., Brehm, G., Cardelús, C. L., Gilman, A. C., & Longino, J. T. (2008). Global Warming, Elevational Range Shifts, and Lowland Biotic Attrition in the Wet Tropics. *Science*, 322(5899), 258-261. DOI: 10.1126/science.1162547
- Delgado, G. C., Gay, C., Imaz, M., y Martínez, M. A. (Coords.) (2010). *México frente al cambio climático. Retos y oportunidades*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Huey, R. B., Sheldon, K. S., Ghalambor, C. K., Haak, D. C., & Martin, P. R. (2008). Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(18), 6668-6672. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709472105>
- Escalante, T., Rodríguez, G., Ebach, M. C., & Morrone, J. J. (2007). Cladistic biogeographic analysis suggests an early Caribbean diversification in Mexico. *Naturwissenschaften*, 94(7), 561-565. <https://doi.org/10.1007/>

[s00114-007-0228-0](#)

- Feeley, K. J., & Silman, M. R. (2010). Land-use and climate change effects on population size and extinction risk of Andean plants. *Global Change Biology*, 16(12), 3215-3222. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02197.x>
- Flenley, J. R. (1998). Tropical forests under the climates of the last 30,000 years. *Climatic Change*, 39(2-3), 177-197. <https://doi.org/10.1023/A:1005367822750>
- García, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., & Araújo, M. B. (2014). Multiple Dimensions of Climate Change and Their Implications for Biodiversity. *Science*, 344(6183), 1247579. DOI: 10.1126/science.1247579
- Gay-García, C., Rueda-Abad, J.C., Ortiz-Espejel, B., Muñoz-Sevilla, N. P., & Le Bail, M. (Coords.) (2015). *Reporte Mexicano de Cambio Climático. Grupo II Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Halffter, G., Llorente-Bousquets, J., y Morrone, J. J. (2008). La perspectiva biogeográfica histórica. *Capital natural de México*, 1, 67-86.
- Horton, B. (1995) Geographical distribution of changes in maximum and minimum temperatures. *Atmospheric Research*, 37(103):101-117. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(94\)00083-P](https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)00083-P)
- Huey, R. B., Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Vitt, L. J., Hertz, P. E., Álvarez Pérez, H. J., & Garland, T. (2009). Why tropical forest lizards are vulnerable to climate warming. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1664), 1939-1948. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1957>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Stocker, T.F., D. Qin, G-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E.

- Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)). Organización Meteorológica Mundial.
- Janzen, D. H. (1967). Why mountain passes are higher in the tropics. *The American Naturalist*, 101(919), 233-249. <https://www.jstor.org/stable/2458977>
- Jiguet, F., Julliard, R., Thomas, C.D., Dehorter, O., Newson, S., & Couvet, D. (2006). Thermal range predicts bird population resilience to extreme high temperatures. *Ecology Letters*, 9(12), 1321–1330. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2006.00986.x>
- Knutson, T. R., McBride, J. L., Chan, J., Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J. P., Srivastava, A. K., & Sugi, M. (2010). Tropical cyclones and climate change. *Nature Geoscience*, 3(3), 157-163. <https://doi.org/10.1038/ngeo779>
- La Sorte, F. A., & Jetz, W. (2010a). Projected range contractions of montane biodiversity under global warming. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 277(1699), 3401–3410. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.0612>
- La Sorte, F. A., & Jetz, W. (2010b). Avian distributions under climate change: towards improved projections. *Journal of Experimental Biology*, 213(6), 862-869. <https://doi.org/10.1242/jeb.038356>
- Laurance, W. F., Useche, D. C., Shoo, L. P., Herzog, S. K., Kessler, M., Escobar, F., Brehm, G., Axmacher, J. C., Chen, I-C., Arellano Gámez, L., Hietz, P., Fiedler, K., Pyrcz, T., Wolf, J., Merkord, C. L., Cardelus, C., Marshall, A. R., Ah-Peng, C., Aplet, G. H., ... & Thomas, C. D. (2011). Global warming, elevational ranges and the vulnerability of tropical biota. *Biological Conservation*, 144(1), 548-557. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.10.010>
- Lenoir, J., Bertrand, R., Comte, L., Bourgeaud, L., Hattab, T., Murienne, J., & Grenouillet, G. (2020) Species better track climate warming in the oceans than on land. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 1044–1059. <https://doi.org/10.1038/s43502-020-00000-0>

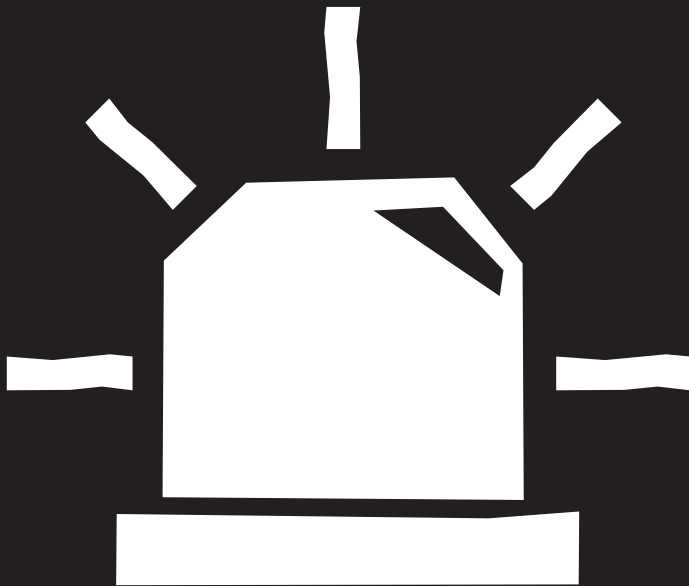
doi.org/10.1038/s41559-020-1198-2

- Martínez, J., y Fernández, A. (Comp.) (2004). *Cambio climático: Una visión desde México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Instituto Nacional de Ecología.
- Mora, C., Frazier, A. G., Longman, R. J., Dacks, R. S., Walton, M. M., Tong, E. J., Sanchez, J. J., Kaiser, L. R., Stender, Y. O., Anderson, J. M., Ambrosino, C. M., Fernandez-Silva, I., Giuseffi, L. M., & Giambelluca, T. W. (2013). The projected timing of climate departure from recent variability. *Nature*, 502(7470), 183-187. <https://doi.org/10.1038/nature12540>
- Mora, C., Dousset, B., Caldwell, I. R., Powell, F. E., Geronimo, R. C., Bielecki, C. R., Counsell, C. W. W., Dietrich, B. S., Johnston, E. T., Louis, L. V., Lucas, M. P., McKenzie, M. M., Shea, A. G., Tseng, H., Giambelluca, T. W., Leon, L. R., Hawkins, E., & Trauernicht, C. (2017). Global risk of deadly heat. *Nature Climate Change*, 7(7), 501-506. <https://doi.org/10.1038/nclimate3322>
- Pacifici, M., Foden, W. B., Visconti, P., Watson, J. E., Butchart, S. H., Kovacs, K. M., Scheffers, B. R., Hole, D. G., Martin, T. G., Resit Akçakaya, H., Corlett, R. T., Huntley, B., Bickford, D., Carr, J. A., Hoffmann, A. A., Midgley, G. F., Pearce-Kelly, P., Pearson, R. G., Williams, S. E., ... & Rondinini, C. (2015). Assessing species vulnerability to climate change. *Nature Climate Change*, 5(3), 215-224. <https://doi.org/10.1038/nclimate2448>
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37, 637-669.
- Pecl, G. T., Araújo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T.C., Chen I-C., Clark, T. D., Colwell, R. K., Danielsen, F., Evengård, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R. A., Griffis, R. B., Hobday, A. J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M. A., Jennings, S., ... & Williams, S. E. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355, eaai9214. DOI: 10.1126/science.aai921
- Pepin, N. C., & Lundquist, J. D. (2008). Temperature trends at high elevations:

- patterns across the globe. *Geophysical Research Letters*, 35(14). <https://doi.org/10.1029/2008GL034026>
- Raxworthy, C. J., Pearson, R. G., Rabibisoa, N., Rakotondrazafy, A. M., Ramanamanjio J. B., Raselimanana, A. P., & Stone, D. A. (2008). Extinction vulnerability of tropical montane endemism from warming and upslope displacement: a preliminary appraisal for the highest massif in Madagascar. *Global Change Biology*, 14(8), 1703-1720. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01596.x>
- Reilly, J., & Schimmelpfennig, D. (2000). Irreversibility, uncertainty, and learning: portraits of adaptation to long-term climate change. In *Societal Adaptation to Climate Variability and Change*, 253-278, Springer, Dordrecht.
- Rohli, R. V., & Vega, A. J. (2018). *Climatology*. 4 ed. Jones & Bartlett Learning
- Román-Palacios, C., & Wiens, J. J. (2020). Recent Responses to Climate Change Reveal the Drivers of Species Extinction and Survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(8), 4211-4217. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913007117>
- Samaniego, J. (Coord.) (2010). *Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Sarukhán, J., Halfter, G., Koleff, P., González, R., Carabias, J., March, I., Soberón, J., Mohar, A., Dirzo, R., Anta, S., Llorente-Bousquets, J., & De la Maza, J. (2009). *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Sarukhán, J., Uquiza-Hass, T., Koleff, P., Carabias, J., Dirzo, R., Ezcurra, E., Cerderira-Estrada, S., & Soberón, J. (2015). Strategic Actions to Value, Conserve, and Restore the Natural Capital of Megadiversity Countries: The Case of Mexico. *Bioscience*, 65(2), 164-173. doi: 10.1093/biosci/biu195

- Scheffers, B. R., De Meester, L., Bridge, T. C. L., Hoffmann, A. A., Pandolfi, J. M., Corlett, R. T., Butchart, S. H. M., Pearce-Kelly, P., Kovacs, K. M., Dudgeon, D., Pacifici, M., Rondinini, C., Foden, W. B., Martin, T. G., Mora, C., Bickford, D., ... & Watson, J. E. M. (2016) The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*, 354(6313), aaf7671. DOI: 10.1126/science.aaf7671
- Sinervo, B., Mendez-De-La-Cruz, F., Miles, D. B., Heulin, B., Bastiaans, E., Villagrán-Santa Cruz, M., ... & Sites Jr, J. W. (2010). Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science*, 328(5980), 894-899. DOI: 10.1126/science.1184695
- Urban, M. C. (2015). Accelerating extinction risk from climate change. *Science*, 348(6234), 571-573. DOI: 10.1126/science.aaa4984
- Wiens, J. J. (2016). Climate-Related Local Extinctions Are Already Widespread among Plant and Animal Species. *PLOS Biology*, 14(12), 1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2001104>
- Williams, J. W., & Jackson, S. T. (2007). Novel climates, no-analog communities, and ecological surprises. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(9), 475-482. <https://doi.org/10.1890/070037>
- Williams, S. E., Shoo, L. P., Isaac, J. L., Hoffmann, A. A., & Langham, G. (2008). Towards an Integrated Framework for Assessing the Vulnerability of Species to Climate Change. *PLOS biology*, 6(12), 2621-2626. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060325>





Es necesario un manejo adecuado con acciones urgentes y toma de decisiones que permitan responder a los impactos que incrementan la vulnerabilidad costera.

01.

Adaptación basada en ecosistemas: la importancia de la biodiversidad para la resiliencia del sistema costero ante el cambio climático

Gabriela Mendoza-González¹

Introducción

Las zonas costeras están altamente expuestas a los efectos de la variabilidad climática e impactos de cambio climático. Entre tales efectos, el aumento del nivel del mar, ciclones, oleaje y vientos fuertes, escorrentía de aguas superficiales y subterráneas, así como los cambios en la temperatura de los océanos (Hanak, & Moreno, 2008). Por ello, la zona costera está considerada como un ambiente altamente dinámico en distintas escalas espaciales y temporales (Silva *et al.*, 2019). Estos impactos pueden ser significativos tanto en los ecosistemas naturales como en los sistemas humanos, y más aun considerando que las costas están densamente pobladas y desarrolladas en todo el mundo (Hale *et al.*, 2009). En México, la población que habita los 100 km de

¹ Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS), Instituto de Ecología, ENES-Mérida, Yucatán, Universidad Nacional Autónoma de México. Correo: gabriela.mendoza@iecologia.unam.mx

línea de costa es de aproximadamente 50 millones de habitantes, y se proyecta que para 2050 podría llegar a tener cerca de 56 millones (Azuz-Adeath y Rivera Arriaga, 2007, 2009). Debido a esto es necesario un manejo adecuado con acciones urgentes y toma de decisiones que permitan responder a los impactos que incrementan la vulnerabilidad costera a la que está y estaría expuesta la población que habita esta zona. Algunos ejemplos sobre los impactos son la llegada masiva de sargazo (en el Caribe, por ejemplo), las inundaciones costeras, la erosión del litoral y el estrechamiento costero que afecta a gran parte del territorio nacional (Chávez *et al.*, 2021). El estrechamiento costero ocurre por la combinación de fenómenos que presionan los ecosistemas costeros desde el océano y el continente. Desde el océano pueden incidir fenómenos como el incremento del nivel del mar y la erosión del litoral, y desde el interior del continente la presencia de barreras físicas como la construcción de infraestructura humana: desarrollos turísticos, carreteras, presas, etc. (Martínez *et al.*, 2014a). Este estrechamiento impide la migración de ecosistemas y especies en una dirección u otra, lo que eventualmente puede causar extinciones locales (Martínez *et al.*, 2014a).

El sistema costero está compuesto por una diversa gama de ecosistemas que ocurren tanto en la zona terrestre como en la marina, que interactúan entre sí a distintas escalas. Entre la diversidad de ecosistemas se presentan flujos de materia y energía que mantienen su productividad a través de los procesos y funciones naturales del paisaje marino-costero que brindan servicios (MEA, 2005) o contribuciones de la naturaleza (IPBES, 2019) en favor del bienestar humano (Nagelkerken, 2009). El detrimento de esta conectividad, debido a la fragmentación y pérdida de ecosistemas generadas por la urbanización, tiene consecuencias negativas en la integridad de los ecosistemas, y por tanto, en los servicios que proveen (Aguilera *et al.*, 2020). Las

playas, las dunas costeras, los manglares, los pastos marinos y los arrecifes, son algunos de los ecosistemas costeros más valorados por su protección ante inundaciones y erosión a consecuencia de eventos climatológicos extremos e incremento de nivel del mar. Aunado a ello, la falta de gobernanza genera una alta vulnerabilidad a la expansión de urbanización e instalación de infraestructura.

La “Adaptación basada en Ecosistemas” (AbE en español y EbA por sus siglas en inglés) es una estrategia de Soluciones basadas en Naturaleza, utilizada como alternativa para enfrentar problemáticas derivadas por fenómenos ambientales, tales como las inundaciones y la erosión costera. A través de la aplicación de diferentes estrategias de manejo costero que integren el uso de la biodiversidad y de sus servicios ecosistémicos o contribuciones de la naturaleza, se plantea la mitigación de la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático y defensa costera (CBD, 2009). Su propósito es mantener y aumentar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad de los ecosistemas y las personas (Lhumeau y Cordero, 2012).

En este documento y en la presentación realizada para el *Módulo 1. Biodiversidad y cambio climático del ciclo de seminarios. ¿Qué sabemos del cambio climático en México?*, se comparten algunos de los trabajos que abordan la capacidad de los ecosistemas para adaptarse a los cambios globales, las tolerancias climáticas de algunas especies en el litoral, la percepción y participación ciudadana en los programas de conservación y manejo sustentable de la costa y las alternativas para aplicar estrategias de adaptación basada en ecosistemas. Estos trabajos están enfocados, particularmente, en playas y dunas, ya que son ecosistemas presentes en el litoral, que funcionan como hábitat para la vida silvestre, y son ampliamente reconocidos por brindar importantes servicios ecosistémicos para el bienestar humano, sobre todo de regulación (Martínez *et al.*, 2014b). Protegen de inundaciones

y reducen la vulnerabilidad ante el cambio climático, siendo denominados *zonas protectoras* que mitigan la energía del oleaje, reducen el impacto de mareas de tormenta tierra dentro y protegen las playas de la erosión (Mendoza-González *et al.*, 2016).

Efecto del cambio climático en la distribución de especies de plantas de playas y dunas costeras

La vegetación de las playas y dunas costeras funciona como elemento de estabilización sedimentaria de las costas dentro de su propio equilibrio dinámico (Maun, 2009). La cobertura vegetal intercepta los granos de arena en movimiento y los detiene, formando montículos mientras crece la planta, proporcionando así la generación de espacios con fuentes de arena almacenada en la zona terrestre (Ley *et al.*, 2007). A través de la acción del viento y de las brisas marinas estos sedimentos almacenados quedan disponibles al interior en la zona de dunas para participar en el desarrollo de la morfología de playas y dunas costeras (Moreno-Casasola, & Vázquez, 2006). La vegetación costera conforme aumenta la distancia al mar crece a través de una transición zonal desde la línea de costa hacia el interior, de tal manera que la composición de especies, en el frente de playa, presenta etapas iniciales de colonización conocidas como *plantas pioneras*, las cuales son resilientes a la salinidad (halófitas facultativas), al movimiento de la arena, tolerantes al enterramiento (psamófilas), a la brisa marina y al agua de mar (Greaver, & Sternberg, 2007). Por el contrario, tierra adentro la influencia marina es menor, y por lo tanto, la salinidad disminuye, el suelo está más desarrollado, pues presenta mayor materia orgánica y el establecimiento de especies de talla más alta es más frecuente, lo que da lugar a la zona interdunaria o de matorral (Martínez *et al.*, 2001).

El cambio climático y el incremento del nivel del mar son fenómenos con impactos proyectados sobre la distribución de vegetación costera (Mendoza-González *et al.*, 2013). Para explorar el impacto que estos fenómenos tienen sobre la vegetación de las costas, se modeló la distribución potencial de especies de plantas de playas y dunas costeras del Golfo de México y el Caribe, bajo distintos escenarios de cambio climático e incremento de nivel del mar con un horizonte temporal al 2050 y 2080. Los resultados revelaron que las especies de amplia distribución presentaron un intervalo ambiental y nicho ecológico con variaciones climáticas mayores que aquellas de distribución restringida (Mendoza-González *et al.*, 2013). No obstante, para ambos tipos de distribución, la idoneidad del clima para las especies modeladas podría encontrarse severamente limitada en el futuro y esto afectaría en mayor medida a las especies de distribución restringida o endémica (Mendoza-González *et al.*, 2013; Ovando-Hidalgo *et al.*, 2020).

Debido a que las especies de amplia distribución presentaron intervalos ambientales más amplios y diversos, se concluye que estas podrían ser las más resistentes al cambio climático, pudiendo presentar una aclimatación como respuesta fenotípica o fisiológica de los individuos, o procesos de adaptación como cambios genéticos en las poblaciones durante varias generaciones para sobrevivir a un clima cambiante. De no presentar ninguna de las dos anteriores, las especies necesitarían desplazarse o migrar geográficamente a otras áreas más adecuadas para rastrear su nicho climático. Sin embargo, en un escenario de estrechamiento costero, los impactos podrían ser mayores, ya que las especies no tendrían oportunidad de migrar al interior del continente. Mendoza-González *et al.* (2013) y Ovando-Hidalgo *et al.* (2020) encontraron áreas geográficas con climas análogos entre el presente y futuro, los cuales podrían significar refugios potenciales para la distribución de las poblaciones de la vegetación analizada.

Por otro lado, para analizar la tolerancia a un probable incremento de la temperatura y al estrés salino como un proxy de calentamiento global e incremento del nivel del mar en este tipo de vegetación, se analizaron condiciones controladas, el efecto de distintos tratamientos de temperatura y salinidad en los patrones de germinación de tres especies de plantas pioneras de duna costera, (Mendoza-González y Álvarez-Espino, en preparación). Se utilizó un diseño experimental que incluyó temperaturas constantes de 25 °C y temperaturas oscilantes de 30/40 °C, a fin de simular incremento de temperatura, así como diferentes concentraciones de salinidad con NaCl (0, 100, 200, 300, 400 y 500 mM) para simular el estrés hídrico y salino. Aunque las especies de plantas con las que se realizó el experimento son halófitas facultativas (presentan un rango amplio de tolerancia a la salinidad, pudiendo colonizar áreas de baja o nula salinidad), nuestros resultados indicaron que, en términos generales, el incremento constante de temperatura y salinidad afecta, como consecuencia añadida, la germinación de algunas especies de manera muy importante (a mayor temperatura y salinidad, menor germinación). En todos los casos se encontró que el tratamiento con temperatura oscilante 30/40 °C, la germinación fue menor que lo registrado contra el experimento a 25 °C constante. Con respecto a los tratamientos a diferentes concentraciones de salinidad, también se registró que a mayor salinidad existió menor germinación, sin embargo, después del experimento, se sustituyó la solución salina con agua destilada y se registró que un alto porcentaje de las semillas que no habían germinado durante los experimentos, se recuperaron y lograron germinar. Otro resultado interesante, al terminar los experimentos, fue el análisis de viabilidad de las semillas que no germinaron, ya que se encontró que un alto porcentaje de ellas se mantuvieron viables para germinar. Esto podría sugerir que las semillas que no germinaron se encontraban en

latencia. Actualmente se están realizando nuevos experimentos para probar esta hipótesis.

La influencia humana desborda la influencia climática: El Antropoceno en la zona costera

A pesar de que el cambio climático es considerado uno de los conductores de cambio que afectan la biodiversidad del planeta, el cambio de hábitat, la contaminación, la sobreexplotación de los ecosistemas naturales y la invasión de especies, son conductores de cambio, principalmente de influencia humana, que inducen la fragmentación de la conectividad del paisaje costero (MEA, 2005). La época en la que la influencia humana y sus repercusiones en el clima y la biodiversidad son de gran impacto, ha sido llamada la era del “Antropoceno” (Crutzen, 2006).

En este sentido, se ha contabilizado que alrededor del 50 % de las dunas costeras de México han sufrido procesos importantes de transformación (Jiménez-Orocio *et al.*, 2014), siendo el Caribe la región con mayor pérdida de vegetación de duna (Seingier *et al.*, 2009). Las causas antrópicas de la erosión del litoral están relacionadas con *a)* la construcción de infraestructura sobre ecosistemas de regulación como manglares, playas y dunas costeras, *b)* el hundimiento de terreno por subsidencia y remoción de recursos (gas, petróleo, carbón, agua), *c)* el represamiento de ríos o modificación del litoral por construcción de escolleras y *d)* la salida de drenajes sobre el litoral (Carranza-Edwards, 2010). La destrucción de los ecosistemas costeros reguladores y amortiguadores de fenómenos climáticos, así como la pérdida de biodiversidad costero-marina son causas que afectan el equilibrio dinámico de la costa (Silva-Casarín *et al.*, 2021). La reducción de aportes sedimentarios por la construcción de estructuras ingenieriles rígidas

La destrucción de los ecosistemas costeros reguladores y amortiguadores de fenómenos climáticos, así como la pérdida de biodiversidad costero-marina son causas que afectan el equilibrio dinámico de la costa.





a lo largo de la línea de costa entorpece el transporte longitudinal y transversal de sedimentos en el litoral y no mitigan la erosión costera (Appendini *et al.*, 2012; Torres-Freyermuth *et al.*, 2019). El dragado de bocas o bahías también generan cambios en la variación natural del nivel medio del mar, lo cual tiene repercusiones en la altura del oleaje que impacta la línea de costa (Finkl & Walker, 2005).

Las actividades descritas anteriormente evidencian que la influencia humana, en la actualidad, representa un impacto dominante e inminente sobre la estabilidad de la costa como un sistema dinámico capaz de autorecuperarse. Dicha influencia, muy probablemente, desborde los impactos del cambio climático o genere un efecto añadido de grandes dimensiones, puesto que las actividades antropogénicas transforman rápidamente al sistema, perdiendo así su resiliencia. Debido a esto, la era del Antropoceno debe ser vista como una oportunidad para que las actividades humanas sean orientadas hacia alternativas sustentables, que conserven y manejen responsablemente los socioecosistemas en los que la humanidad está inmersa.

Alternativas de desarrollo costero

Actualmente, el cambio climático impacta a millones de personas, particularmente a las comunidades más vulnerables que dependen de la integridad de los ecosistemas marinos y costeros. Por tal razón, es urgente diseñar estrategias de adaptación basadas en ecosistemas, con la finalidad de reducir la vulnerabilidad de estas comunidades a través de un mejor uso y manejo de ecosistemas costeros, para que estos sigan brindando servicios y contribuciones positivas al bienestar de las personas más vulnerables (Hale *et al.*, 2009). Las comunidades costeras locales deben ser integradas a estas estrategias para participar en algunas medidas para mitigar los procesos de degradación, y

reducir la vulnerabilidad costera. Estas podrían incluir: 1) programas de urbanización que limiten el crecimiento urbano y la expansión de infraestructura ingenieril gris (dura y tradicional) en áreas apropiadas en la zona costera; 2) mayor inversión en infraestructura verde costera (suave, basada en naturaleza) para la defensa costera; 3) restauración/rehabilitación de ecosistemas degradados e ingeniería ecológica, con el objetivo de restablecer la biodiversidad y la conectividad de paisaje para recuperar o mimetizar los servicios ecosistémicos de regulación perdidos (Aguilera *et al.*, 2020).

En ese sentido y de manera muy reciente, el modelo de desarrollo costero está transitando hacia un enfoque integrador de los componentes biofísicos, ecológicos y sociales que interactúan en los sistemas costeros, el desarrollo de intervenciones costeras flexibles (como la infraestructura costera verde) y la incertidumbre de su función asociada a la respuesta altamente dinámica del sistema costero (Silva *et al.*, 2019). Este enfoque considera el uso de la naturaleza como alternativa de solución para enfrentar problemáticas derivadas del cambio climático. Las estrategias de Adaptación basada en Ecosistemas (AbE) consideran la conservación de los ecosistemas naturales, la restauración o rehabilitación de los ecosistemas degradados para la recuperación de sus servicios ecosistémicos, como la protección natural que provee. Estos servicios son importantes para salvaguardar el bienestar y la calidad de vida de las poblaciones humanas costeras, así como las inversiones públicas y privadas para el desarrollo de infraestructura urbana construida para proveer bienes y servicios requeridos por los humanos (Hausner *et al.*, 2020). Conservar la biodiversidad y sus servicios hace al socioecosistema más resistente y resiliente para enfrentar el cambio climático (Hale *et al.*, 2009).

Las estrategias AbE requieren de la participación colectiva de gobiernos, comunidades, organizaciones de conservación, desarro-

La participación social local, en este tipo de proyectos, es crucial para el éxito de los proyectos de restauración y programas de manejo.



lladores inmobiliarios y actores sociales prioritarios interesados en planear y fortalecer acciones que mejoren el vínculo entre sociedad y naturaleza (Hale *et al.*, 2009). La participación social local, en este tipo de proyectos, es crucial para el éxito de los proyectos de restauración y programas de manejo, ya que las poblaciones locales deben formar parte de los mismos para apropiarse de ellos y participar en su implementación, desarrollo, monitoreo y proceso adaptativo.

En este sentido, la percepción de las comunidades costeras y la identificación de problemas prioritarios locales es importante para construir un sistema de gobernanza y de toma de decisiones consensuadas a nivel local. Al considerarlas, se permite rescatar el conocimiento tradicional local y los valores culturales, además de tener la oportunidad de integrarlos en la toma de decisiones para hacer un uso sustentable de la biodiversidad (Andrade, 2010).

Relacionado con lo anterior, Mendoza-González *et al.* (2021) analizaron, con un enfoque transdisciplinario, la percepción de la comunidad sobre los servicios ecosistémicos que proveen las playas y las dunas costeras de Yucatán y los problemas socioecológicos más importantes para la comunidad. A través de un enfoque mixto, se analizó cualitativa y cuantitativamente la percepción local respecto a los servicios ecosistémicos que se aprovechan en las playas y en las dunas costeras. Asimismo, a través de talleres participativos se identificaron y ponderaron los principales problemas que se desarrollan en estos ambientes a través de la participación de la población local, comerciantes y cooperativas locales, desarrolladores inmobiliarios y autoridades de los diferentes niveles de gobierno (Mendoza-González *et al.*, 2022). Como resultados se registró que los servicios de regulación fueron los más mencionados por la comunidad con el 28 %, seguido de los culturales con el 26 %, los de provisión con el 23 % y, finalmente, los de soporte con el 10 %. El 13 % restante de las respuestas se clasificaron como contribuciones negativas

de la naturaleza. Asimismo, se identificaron y discutieron dos de los más relevantes problemas socioecológicos que ocurren en tres puertos costeros de la costa del estado de Yucatán (Sisal, Chuburná y Telchac), los cuales preocupan y vulneran a la comunidad costera. El primero es la pérdida de playa en el litoral, debido a fenómenos naturales como el aumento del nivel del mar e incidencia de fenómenos meteorológicos y antropogénicos como la extracción de arena, interrupción del flujo de arena por la construcción de estructuras de protección y falta de coordinación entre autoridades y sociedad civil. El segundo problema es la construcción sobre las dunas costeras, principalmente causado por la prestación de servicios turísticos, abusos sobre espacios concesionados y falta de información o conocimiento del ecosistema. Ambos problemas presentan como consecuencias la pérdida de vegetación de duna costera, así como el deterioro del ecosistema entero, afectaciones a la fauna nativa y fuertes problemas de erosión, lo que hace sentir a las comunidades más vulnerables.

Se concluye que la capacidad crítica de los principales actores en las comunidades locales es el punto de partida para emprender y generar propuestas que aborden la problemática que ocurre en estos ambientes identificada por ellos mismos, además, la necesidad de interacción entre diferentes perspectivas que permitan generar recomendaciones para la atención de estos problemas socioecológicos, identificados por la comunidad local. Las percepciones de la población y la co-construcción de conocimiento a través de la interacción entre actores políticos, académicos y locales, brindan una oportunidad muy valiosa para diseñar las estrategias AbE, a fin de solucionar los problemas identificados a escala local (Andrade, 2010), en los que las recuperaciones de los servicios de regulación sean ampliamente valorados por las comunidades costeras abordadas (Mendoza-González *et al.*, 2021).

Agradecimientos

A todos los involucrados que participaron en las salidas al campo, realizaron entrevistas, participaron en talleres, realizaron trabajo de laboratorio, etc., en especial a mis estudiantes M. en C. Vanessa Hernández, Biól. Juan Carlos Aguirre, Biól. Tatiana Meza, y a la M. en C. Lizbeth Márquez. Al Laboratorio de Biología de la Conservación de la Facultad de Ciencias de la UNAM, campus Yucatán, en particular a la M. en C. Maribel Badillo y M. en C. Alfredo Gallardo. Al Laboratorio de Germoplasma del CICY, específicamente al Dr. Ricardo Álvarez Espino. A la ENES-Mérida, en especial al M. en C. Carlos Cruz y M. en C. Jesús Aragón.



Referencias

- Andrade Pérez, A., B. Herrera Fernández, B., & Cazzolla Gatti, R. (eds.) (2010). *Building Resilience to Climate Change: Ecosystem-Based Adaptation and Lessons from the Field*. Ecosystem Management Series No. 9. IUCN.
- Aguilera, M., Tapia, J., Gallardo, C., Núñez, P., & Varas-Belemmi, K. (2020). Loss of coastal ecosystem spatial connectivity and services by urbanization: Natural-to-urban integration for bay management. *Journal of Environmental Management*, 276(111297), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111297>
- Appendini, C. M., Salles, P., Mendoza, E. T., López, J., & Torres-Freyermuth, A. (2012). Longshore Sediment Transport on the Northern Coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1404-1417. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-11-00162.1>
- Azuz-Adeath, I., y Rivera Arriaga, E. (2007). Estimación del crecimiento poblacional para los estados costeros de México. *Papeles de Población*, 13(51), 187-211. <https://www.scielo.org.mx/pdf/pp/v13n51/v13n51a7.pdf>
- Azuz-Adeath, I., y Rivera-Arriaga, E. (2009). Descripción de la dinámica poblacional en la zona costera mexicana durante el periodo 2000-2005. *Papeles de Población*, 15(62), 75-107. <https://www.scielo.org.mx/pdf/pp/v15n62/v15n62a3.pdf>
- Carranza-Edwards, A. (2010). Causas y consecuencias en la erosión de playas. En: A. Yáñez-Arancibia (Ed.). (2010). *Impactos del cambio climático sobre la zona costera*. Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- CBD (2009). *Connecting biodiversity and climate change mitigation and adaptation: Report of the Second Ad Hoc Technical Expert Group on Biodiversity and Climate Change*. Technical Series No. 41.
- Chávez, V., Lithgow, D., Losada, M., & Silva-Casarin, R. (2021). *Coastal green infrastructure to mitigate coastal squeeze*. *Journal of Infrastructure Pre-*

- ervation and Resilience*, 2(7), 1-12. <https://doi.org/10.1186/s43065-021-00026-1>
- Crutzen, P. J. (2006). The “Anthropocene”. In: Ehlers, E., Krafft, T. (eds) *Earth System Science in the Anthropocene*. Springer.
- Finkl, C. W., & Walker, H. J. (2005). Beach nourishment en M. L. Schwartz (ed.), *Encyclopedia of Coastal Sciences. Encyclopedia of Earth Science Series* (pp. 147–161). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-3880-1_35
- Greaver, T. L., & Sternberg, L. S. L. (2007). Fluctuating deposition of ocean water drives plant function on coastal sand dunes. *Global Change Biology*, 13, 216–223. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01287.x>
- Hale, L. A., Meliane, I., Davidson, S., Sandwith, T., Hoekstra, J., Murawski, S., Cyr, N., Osgood, N., Hatziolos, M., Van Eijk, P., Davidson, N., & Eichbaum, W. (2009). Ecosystem-based Adaptation in Marine and Coastal Ecosystems. *Tenewable Resources Journal*, 25(4).
- Hanak, E., & Moreno, G. (2008). California Coastal Management with a Changing Climate. Public Policy Institute of California (PPIC). In: *Preparing California for a Changing Climate*, collection available at <http://www.ppic.org/main/publication.asp?i=755>
- Hausner, V. H., Engen, S., Brattland, C., & Fauchald, P. (2020). Sámi knowledge and ecosystem-based adaptation strategies for managing pastures under threat from multiple land uses. *Journal of Applied Ecology*, 57(9), 1656-1665. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13559>
- IPBES (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Díaz, et al. (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany.
- Jiménez-Orocio, O., Espejel, I., Martínez, M., Moreno-Casasola, P., Infante, D. y Rodríguez, N. (2014). Diagnóstico de las dunas costeras de México. Usos de las dunas y situación actual, En: Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Jiménez-Orocio, O., Infante Mata, D., y Rodríguez-Revelo, N.

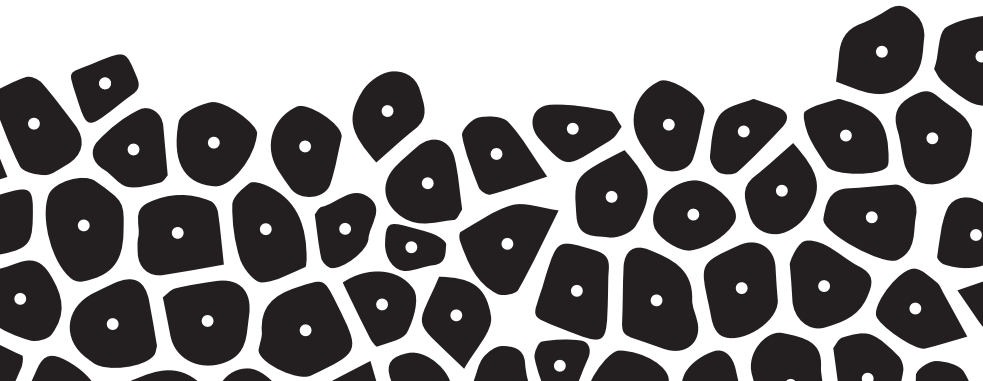
- (2014). Diagnóstico de las dunas costeras de México: CONAFOR.
- Ley, C., Gallego-Fernández, J. B., y Vidal, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino-Dirección General de Costas del Gobierno de España.
- Lhumeau, A., y Cordero, D. (2012). *Adaptación basada en Ecosistemas: Una respuesta al cambio climático*. UICN. <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2012-004.pdf>
- Maun, M. A. (2009). *The biology of coastal sand dunes*. Oxford University Press, USA. 265 p. ISBN-13 : 978-0198570363
- Martínez, M. L., Vázquez, G. y Sánchez Colón, S. (2001). Spatial and temporal dynamics during primary succession on tropical coastal sand dunes. *Journal of Vegetation Science*, 12, 361-372. <http://dx.doi.org/10.2307/3236850>
- Martínez, M. L., Mendoza-González, G., Silva-Casarín, R., & Mendoza-Baldwin, E. (2014a). Land use changes and sea level rise may induce a coastal squeeze on the coasts of Veracruz, Mexico. *Global Environmental Change*, 29, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.09.009>
- Martínez, M. L., Moreno-Casasola, P., Espejel, I., Jiménez-Oroco, O., Infante-Mata, D. y Rodríguez-Revelo, N. (2014b). *Diagnóstico de las dunas costeras de México*. México: Conafor. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2018/CD002912.pdf>
- MEA, Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Mendoza-González G., y Álvarez-Espino R. (s.f.) Efecto del cambio climático en la germinación de semillas y sobrevivencia de plántulas de vegetación de duna costera. En preparación.
- Mendoza-González, G., Márquez L., Paredes-Chi A., y de Yta, D. (2022). Análisis transdisciplinario de los problemas prioritarios en un sistema socioeco-

- lógico de playas y dunas costeras en Yucatán. VIII Congreso Mexicano de Ecología 2022. Oaxaca de Juárez.
- Mendoza-González G., Méndez-Funes D., Paredes-Chi A., Giraldo M. E., Arancibia E., Rioja-Nieto R. (2021). Perceptions and social values regarding the ecosystem services of beaches and coastal dunes of Yucatan. *Sustainability*, 13(7): 3592. <https://doi.org/10.3390/su13073592>
- Mendoza-González G, Martínez, M.L., Rojas-Soto O, Téllez-Valdés O, Arias-Del Razo I. (2016). Priority areas for conservation of beach and dunes vegetation of the Mexican Atlantic coast. *Journal for Nature Conservation*, 33,25-34. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2016.04.007>
- Mendoza-González G., Martínez M.L, Rojas-Soto R., Vázquez G., Gallego-Fernández J.B. (2013). Ecological niche modeling of coastal dune plants and future potential distribution in response to climate change and sea level rise. *Global Change Biology*, 19, 2524-2535. <https://doi.org/10.1111/gcb.12236>
- Moreno-Casasola, P., y Vázquez, G. (2006). Las comunidades de las dunas. En: Moreno Casasola, P. *Entornos veracruzanos: la costa de La Mancha* (pp. 285-310). Instituto de Ecología A.C.
- Ovando-Hidalgo, N., Tun-Garrido, J., Mendoza-González, G., y Parra-Tabla, V. (2020). Efecto del cambio climático en la distribución de cinco especies clave en la vegetación de duna costera en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e912883. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.2883>
- Nagelkerken, I. (2009). Evaluation of Nursery function of Mangroves and Seagrass beds for Tropical Decapods and Reef fishes: Patterns and Underlying Mechanisms. In: Nagelkerken, I. (eds) *Ecological Connectivity among Tropical Coastal Ecosystems* (357-399 pp). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2406-0_10
- Seingier, G., Espejel, I., y Fermán Almada, J. L. (2009). Cobertura vegetal y marginación en la costa mexicana. *Investigación Ambiental*, 1(1), 54-69.

- Silva-Casarín, R., Oumeraci, H., Martínez, M. L., Chávez, V., Lithgow, D., van Tussenbroek, B. I., van Rijswijk, H. F. M. W., Bouma, T. J. (2021). Ten Commandments for Sustainable, Safe, and W/Healthy Sandy Coasts Facing Global Change. *Front Mar Sci* 8:616321. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.616321>
- Silva, R., Chávez, V., Bouma, T. J., van Tussenbroek, B. I., Arkema, K. K., Martínez, M.L., Oumeraci, H., Heymans, J. J., Osorio, A. F., Mendoza, E., Mancuso, M., Asmus, M., & Pereira, P. (2019). The incorporation of biophysical and social components in coastal management. *Estuaries and Coasts*, 42(7),1695–1708. <https://doi.org/10.1007/s12237-019-00559-5>
- Torres-Freyermuth, A., Medellín, G., Mendoza, E., Ojeda, E., & Salles, P. (2019). Morphodynamic response to low-crested detached breakwaters on a sea breeze-dominated coast. *Water*, 11(4), 635. <https://doi.org/10.3390/w11040635>



**Los anfibios,
en general
necesitan humedad en el
ambiente para respirar
adecuadamente,
lo cual los hace
particularmente
vulnerables
a los cambios en las
condiciones climáticas del
medio ambiente.**



02.

Obstáculos en el camino: anfibios y cambio climático (México)

Leticia Margarita Ochoa Ochoa¹

En el presente capítulo no les hablaré de cambio climático *per se*, de eso se encargarán los autores de otros capítulos dentro de esta compilación. En su lugar, me enfocaré en los anfibios. Trataré de abordar diversos temas, aunque por cuestiones de espacio será en forma resumida. Asimismo, los invito a que vean la presentación relacionada que está disponible en la página del Programa de Investigación en Cambio Climático de la UNAM (<https://www.pincc.unam.mx/>).

Los anfibios son animales tetrápodos terrestres. No obstante, son muy distintos del resto de los vertebrados terrestres (e.g., reptiles, aves y mamíferos). Por ejemplo, son los únicos que tienen la piel desnuda. Esto significa que no tienen plumas ni pelo ni escamas que los cubran o protejan. Se reproducen por medio de huevos *anamniotos*, lo cual significa que no tienen cubiertas de protección (ni membranas amnióticas ni cascarón) y son permeables tanto a gases como a compuestos químicos (Vitt, & Caldwell, 2013). Las características mencionadas los hace vulnerables a los cambios del medio ambiente. También, debido a que en general llevan gran parte de su respiración

¹ Museo de Zoología “Alfonso L. Herrera”, Departamento Biología Evolutiva, Facultad de Ciencias, UNAM. Correo: leticia.ochoa@ciencias.unam.mx

por la piel, necesitan cierta cantidad de humedad en el ambiente para respirar adecuadamente.

Los anfibios son, sin lugar a duda, el grupo de vertebrados más abundante en ambientes tropicales (Stebbins, & Cohen, 1997). Ellos juegan un papel integral en la conexión de los sistemas acuáticos y terrestres, lo cual, a su vez, influye en la producción primaria, y la transferencia de energía y de materia orgánica al interior de los ecosistemas, ya que fungen como herbívoros, depredadores secundarios y presas (Whiles *et al.*, 2006). Los anfibios son el grupo de vertebrados terrestres más antiguo sobre la faz de la tierra, con aproximadamente 360 millones de años, lo cual quiere decir que han resistido enormes cambios ambientales. Por ejemplo, sobrevivieron a los cambios ambientales del Cretácico al Triásico que causaron la extinción de los dinosaurios. Otro ejemplo más reciente de los cambios ambientales a los que han sobrevivido, son las glaciaciones del Pleistoceno, periodo que duró aproximadamente 2.5 millones de años. Se distribuyen en casi todos los ambientes de la Tierra, incluyendo lugares extremos tanto de humedad como de temperatura, lo cual implica adaptaciones fisiológicas espectaculares, como poder congelarse (literalmente) o sobrevivir en desiertos extremos al permanecer sin alimento y sin agua hasta por dos años. Aquí vale la pena hacer mención a que el número de especies que presentan estas adaptaciones es mucho menor comparado con la gran mayoría de las especies que requieren condiciones de alta humedad y temperaturas ambientales cálidas.

Los anfibios son animales ectotérmicos, como los reptiles. Es decir, su temperatura corporal depende de la temperatura ambiental, en otras palabras, no producen el calor suficiente; no tienen la capacidad total de regular el calor que producen para poder ser independientes de las temperaturas ambientales (Wells, 2007). No obstante, es importante mencionar que tienen otros mecanismos para regular la temperatura,

como asolearse cuando tienen frío o resguardarse del sol cuando tienen calor. También pueden tener otros mecanismos fisiológicos como aumentar la frecuencia cardíaca junto con la respiración, modificar la cantidad de desechos que excretan, quemar grasa almacenada y hasta pueden llegar a cambiar de color, oscurecerse o aclararse, con el fin de absorber o reflejar mayor radiación solar. Es importante hacer mención que la tasa de calentamiento y el control de la temperatura (termorregulación) dependerá del tamaño del animal. Hay incluso hipótesis que plantean que la capacidad de termorregulación está positivamente relacionada con el tamaño, es decir, entre más grandes los individuos, mayor control de la temperatura. Sin embargo, el hecho de depender de las temperaturas ambientales para obtener la energía básica para realizar sus actividades diarias ha hecho suponer a la mayoría de los estudiosos que el incremento de la temperatura ambiental puede tener un efecto negativo directo en la salud de las poblaciones (Alford *et al.*, 2007).

¿Qué sabemos de la tolerancia a los cambios de temperatura por parte de los anfibios?

En general, y como grupo, los anfibios tienen un amplio intervalo de tolerancia a las temperaturas ambientales. Hay ejemplos espectaculares de anfibios viviendo en las cimas de la cordillera de los Andes, en Sudamérica, que pueden soportar cambios de temperatura de casi 50 °C en un día (de -10 a 40 °C), aunque estos tienen adaptaciones corporales particulares (no solo en su conducta) para tolerar las variaciones de la temperatura (Navas, 1997). No obstante, es de crucial importancia enfatizar en que las poblaciones están adaptadas a las condiciones particulares donde viven. Para poner una analogía, las personas que viven en Villahermosa, Tabasco, toleran más el calor

que las personas de Creel, Chihuahua, y viceversa. Así sucede con los anfibios.

En términos fisiológicos la mayoría de los anfibios puede tolerar temperaturas inferiores a los 38 - 43 °C, porque estos límites representan el umbral en el que las proteínas empiezan a degradarse o desnaturalizarse. En este sentido, hay varios términos relevantes que mencionar: 1) preferenda térmica, es el intervalo de temperatura en la cual el organismo *prefiere* desarrollar sus actividades; 2) temperatura máxima crítica (CTMAX), esta representa el límite máximo de calor que puede tolerar un organismo, antes de que haya daños irreversibles: en los experimentos se determina como el punto térmico en el que un animal pierde su capacidad locomotora, para escapar de las condiciones que lo llevarán a la muerte; 3) temperatura mínima crítica (CTMIN), esta representa el límite mínimo de calor que puede tolerar un organismo antes de que haya daños irreversibles; la CTMIN es más complicada de determinar, debido a la alta tolerancia al frío por parte de las especies estudiadas; 4) 'aclimación' térmica, representa el estrés de temperatura diario al que puede ajustarse el organismo; 5) aclimatización representa el ajuste fisiológico a la temperatura a lo largo de temporadas; y finalmente, 6) la hipotermia voluntaria, esta se refiere al proceso mediante el cual el organismo desencadena una serie de eventos, para poder bajar la temperatura corporal sin que existan daños irreversibles —ni fisiológicos ni estructurales— al organismo mismo. En algunos casos esta baja de temperatura o hipotermia voluntaria puede llegar al congelamiento, tal es el caso de la rana *Lithobates sylvaticus* (que vive en Estados Unidos y Canadá), junto con otras ocho especies de anuros y tres salamandras que incluyen a la salamandra siberiana, que como su nombre lo menciona vive en Siberia, *Salamandrella keyserlingii*, y puede sobrevivir a temperaturas de hasta -35 °C (Storey, & Storey, 2017).

Además de las capacidades intrínsecas de una especie para termorregularse, conviene mencionar que hay factores ambientales que pueden cambiar los valores de las temperaturas preferidas y/o los límites de tolerancia térmicos por parte de los organismos y estos pueden afectar la supervivencia de los organismos. Estos son las bacterias *patógenas* y los agentes *pirogénicos*. Las primeras son bacterias que alteran la composición del microbioma —comunidad de microorganismos que incluyen hongos, bacterias y protozoarios que viven en la piel del organismo (Rebollar *et al.*, 2020)—, al alterar la composición del microbioma se pueden alterar los procesos fisiológicos que regulan la temperatura, como respiración cutánea o pérdida de agua por evaporación (Fontaine *et al.*, 2022). Los segundos, agentes pirogénicos, los cuales pueden provocar un aumento en la temperatura de los organismos, estos incluyen compuestos químicos como fertilizantes, pesticidas, detergentes, entre otros, así como elementos químicos como metales pesados, tales como plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), cromo (Cr) y hierro (Fe) (Bicego *et al.*, 2007; McCoy, & Peralta, 2018).

Efectos de los cambios globales

Es indudable que las actividades humanas han tenido efectos en la diversidad (Ellis *et al.*, 2021) y los continúan teniendo (Cowie *et al.*, 2022). Tales efectos representan cambios ambientales no solo a escalas locales sino globales (Turvey, & Crees, 2019). Estos cambios ambientales incluyen la fragmentación de la vegetación nativa —a través de diversos procesos como la agricultura, ganadería, deforestación y urbanización—, contaminación (que incluye compuestos químicos y desechos de todo tipo), introducción de especies exóticas invasoras, extracción de recursos y, finalmente, el cambio climático, que no

solamente representa un aumento en la temperatura ambiental, sino también cambios en los patrones de lluvias, que pueden significar largos periodos de sequías y/o lluvias torrenciales (Alford *et al.*, 2007).

¿Qué se sabe del cambio climático y los anfibios? ¿Y cómo es que se sabe?

Para los herpetólogos (estudiosos de los anfibios y reptiles), la gran llamada de atención hacia los anfibios —y por ende, los efectos que los cambios climáticos estaban teniendo sobre los mismos—, comenzó en el Congreso Mundial de Herpetología en 1989, donde muchos investigadores reunidos comenzaron a compartir sus experiencias en campo. La historia era la misma repetida en distintas locaciones del planeta: había menos anfibios. Posteriormente, con la desaparición de *Incilius [Bufo] periglenes* (llamado comúnmente sapo dorado) y *Atelopus varius* (sapo pintado), en Costa Rica, las cuales fueron asociadas a las sequías ocasionadas por *El Niño Oscilación del Sur* (ENOS) en 1986-7 (Pounds, & Crump, 1994), los efectos del cambio climático se volvieron *tangibles*. El sapo dorado (*Incilius [Bufo] periglenes*) se volvió la especie “bandera o insignia” del cambio climático, a pesar de que la evidencia obtenida hasta la fecha no es suficiente para asociar su extinción a un solo factor (como es el cambio climático), sino a una serie de factores que actuaron en conjunto (sequías, enfermedades, poblaciones reducidas), que de manera sinérgica ocasionaron su extinción. El detalle es que en la naturaleza es muy complicado “deslindar” factores.

A la fecha, existe evidencia suficiente para afirmar que hay un aumento en la temperatura global ambiental ocasionado por las actividades humanas (aunque se predice que será mucho menor de

lo originalmente planteado²). Existe también evidencia de que hay un cambio en los patrones de lluvia que se representan a través de modificaciones en la duración de las temporadas y modificaciones en las intensidades de lluvias; pero también se ha visto que cada vez son más frecuentes otros fenómenos meteorológicos como ondas de calor, huracanes, tornados, entre otros. Un ejemplo puede observarse en el monitor de la sequía en México (CONAGUA, y SMN 2023). En un paisaje, el decremento en la humedad del suelo no solo provoca cambios en las características físico-químicas de la tierra y del agua que pudiera acumularse, también ocasiona que los tiempos de permanencia de los cuerpos de agua temporales cambien. Las respuestas de los animales a los cambios ambientales —incluyendo el cambio climático—, abarcan cambios en las áreas de distribución (incluyendo patrones de migración tanto latitudinal como altitudinal, ver figura 1), modificaciones en los patrones de migración; abundancias poblacionales y proporciones de machos y hembras (Burger, & Zappalorti, 1988; Shine, 1999). Lo anterior tiene efectos directos en la fenología —distribución temporal de los eventos biológicos recurrentes en un año como la reproducción, metamorfosis y crecimiento—, morfología —tamaño y forma de los organismos—, y fisiología de los organismos (Bastos, & Abe, 1998; Frazer *et al.*, 1993; Gutzke, & Crews, 1988); que, a su vez, provocan cambios en la composición de comunidades, interacciones bióticas y conducta (Jiang, & Morin, 2004; Johnson *et al.*, 2011; Price *et al.*, 2014)

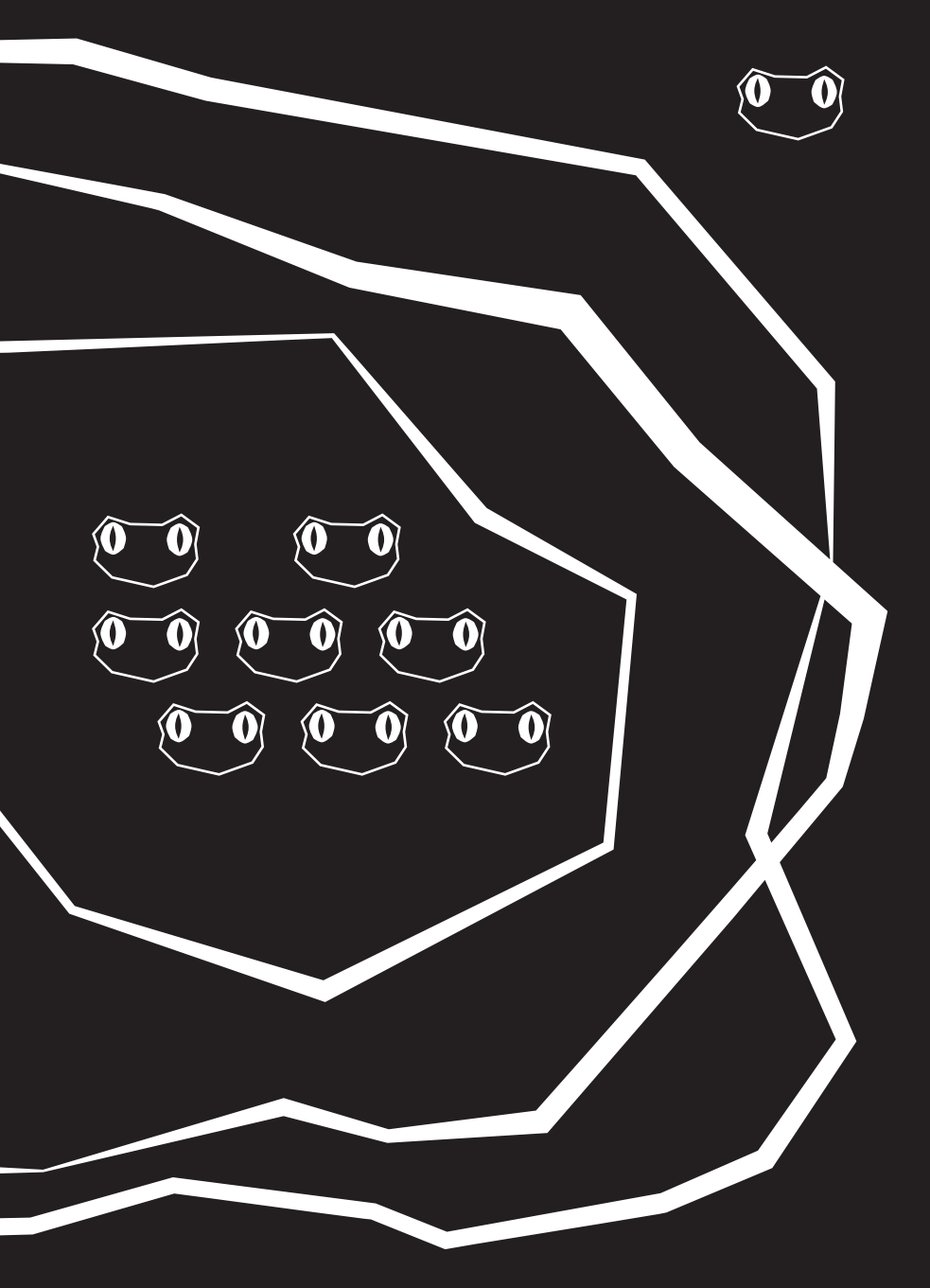
Lo común de la rareza

Una de las maravillas de la naturaleza es que la mayoría de las especies son raras. Esto quiere decir que tienen baja abundancia o tienen tama-

² Para más detalles, puede verse la página del IPCC: <https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/>

**Las respuestas de los
anfibios a los
cambios ambientales
provocan cambios en la
composición
de sus comunidades.**





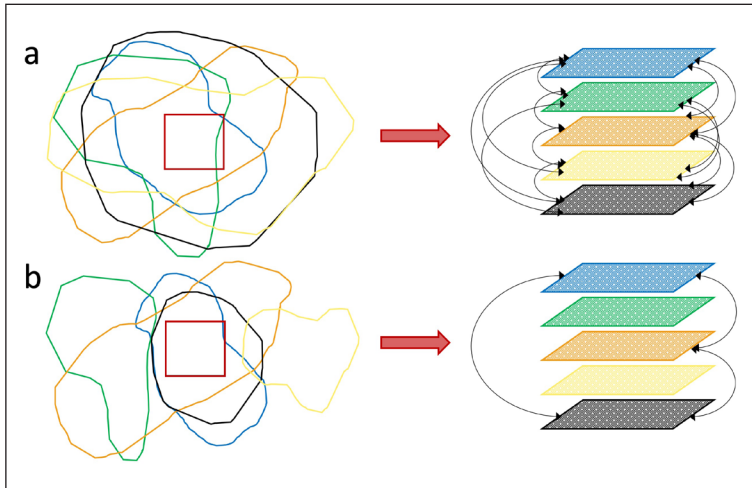


Figura 1. Representación esquemática de la dinámica de las comunidades.

Nota. Representación de la dinámica de las comunidades como resultado de la dinámica de las áreas de distribución donde las flechas negras indican la interacción entre las especies que conviven en ese tiempo y espacio, representadas por los romboides de colores; a) representa las distribuciones de 5 especies que pertenecen a una comunidad en el tiempo inicial; b) son las mismas 5 especies en el tiempo inicial, pero algunas de ellas cambiaron sus patrones fenológicos, por lo cual las interacciones de la comunidad cambian. Es importante enfatizar que este proceso es continuo. Las áreas de distribución son entes dinámicos como las especies que responderán de manera particular a los cambios ambientales (diseño propio).

ños de áreas de distribución pequeñas. En el caso de los anfibios, en general no sufren de lo primero (pueden juntarse miles de organismos a reproducirse en un mismo sitio), sino de lo segundo, ya que la gran mayoría de las especies tiene tamaños relativamente pequeños en sus áreas de distribución (Koleff *et al.*, 2008). Las especies, cuyas poblaciones han disminuido, tienen características ecológicas (llamados

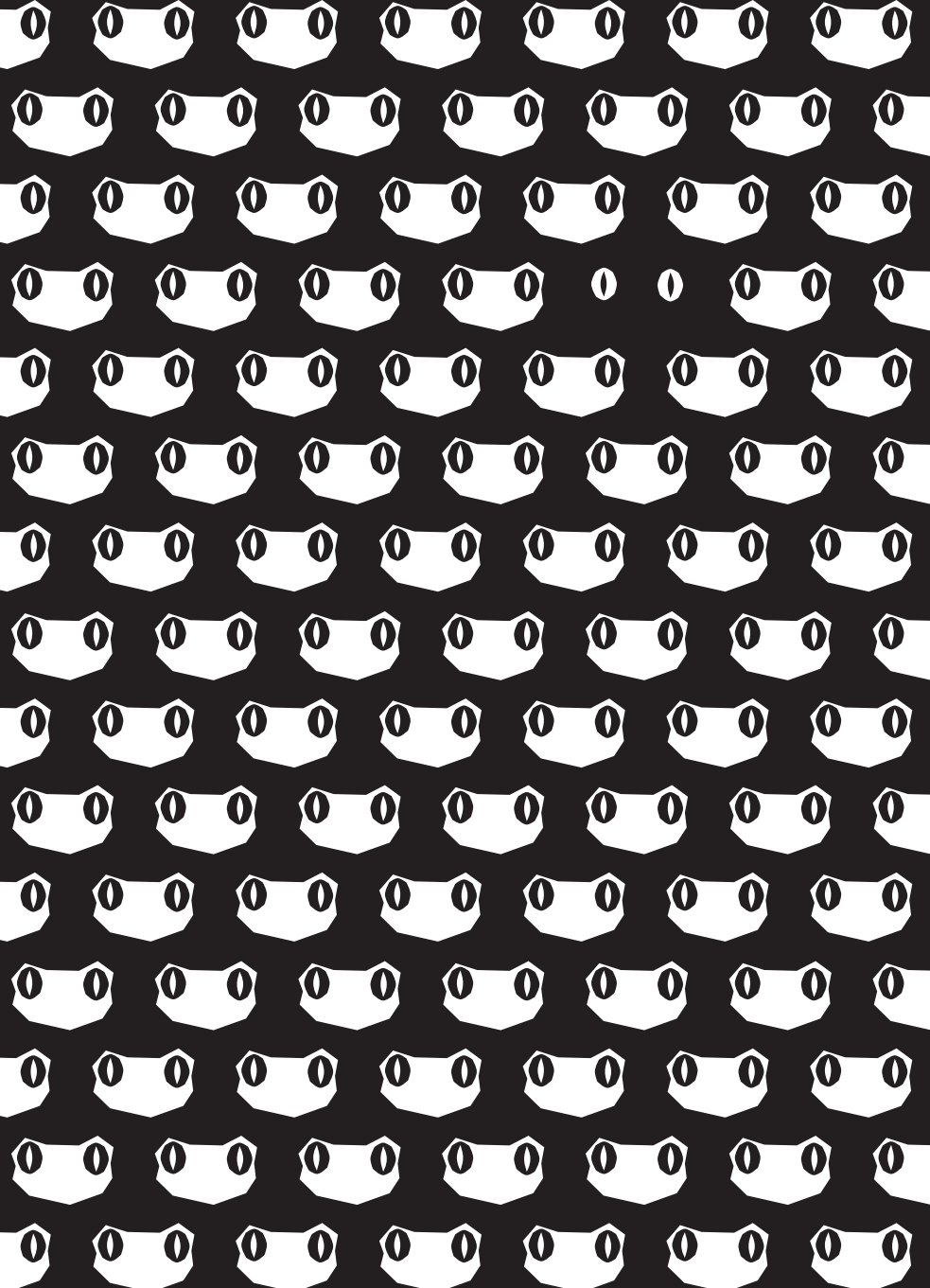
rasgos), historias de vida o parámetros demográficos, tales como 1) son especialistas o tienen un alto grado de especialización en el uso de los recursos (por ejemplo, hay especies de microhílicos *Microhylla nepenthicola* que pone sus huevos y las larvas se desarrollan en las copas de las plantas carnívoras del género *Nepenthes*) (Gururaja, 2010); 2) tamaño reducido de la población, es decir, pocos individuos reproductivos remanentes; 3) tiempos generacionales grandes, hay especies como la salamandra *Notophtalmus meridionalis* que puede tardar hasta 14 años en llegar a la madurez sexual; 4) abundancia muy fluctuante; 5) baja tasa de reproducción, y finalmente, 6) ciclos de vida complejos.

¿Qué se supone y/o se intuye?

Una gran parte de los estudios publicados con modelos de nicho ecológico y proyecciones futuras de cambio climático suponen cero tolerancia a nuevas condiciones ambientales, y no se sabe muy bien hasta qué punto la mayoría de las especies puedan tolerar los cambios en el clima, además de que en general los modelos son hechos a escala espacial gruesa con unidades de aproximadamente 1 km². Sin embargo, es de suma importancia enfatizar que cuando hay efectos sinérgicos sí se puede suponer que habrá poca tolerancia (Velasco *et al.*, 2021). Estos efectos sinérgicos podrían incluir enfermedades oportunistas, como el caso del hongo *Batrachochytrium dendrobatidis* que ataca cuando el sistema inmune y/o microbioma del organismo está alterado, debido a que hay otros factores estresantes que deprimen el sistema inmune o modifican la estructura de la comunidad del bioma, tales como contaminación, pesticidas, fertilizantes, entre otros (McCoy, & Peralta, 2018).

Ahora bien, también es esencial resaltar que hay adaptaciones

**En un escenario futuro
de homogeneización
precarizada solo
las especies tolerantes,
o que puedan adaptarse,
permanecerán en
los paisajes
y serán las mismas
en todos los paisajes.**



muy interesantes, relativamente recientes, como es el caso de la rana *Lithobates sylvaticus*. Esta rana vive en Estados Unidos y Canadá (es la misma rana que se congela). Algunas de sus poblaciones viven cerca de zonas de cultivo intensivo donde existe uso de agroquímicos (pesticidas, insecticidas, herbicidas) y se ha visto que han desarrollado tolerancia a ciertos insecticidas (Cothran *et al.*, 2013). No obstante, la tolerancia a ciertos compuestos no necesariamente implica que las poblaciones vayan a sobrevivir a largo plazo, pues no se han estudiado efectos a largo plazo como, por ejemplo, si esta tolerancia implica una reducción en la esperanza de vida de dichas poblaciones.

Otros aspectos que muchas veces se suponen como ciertos son los modelos de cambio climático y la certeza de la adecuabilidad modelada —existencia de condiciones ambientales propicias para una especie—. En este caso, ninguna de las dos cosas las podemos tomar como certeras. Por un lado, los modelos para generar proyecciones a futuro son sensibles a los datos y esto sucede con todos los modelos, no únicamente los de cambio climático. Es decir que los resultados dependerán de la cantidad y calidad de los datos utilizados. Son muy útiles porque nos pueden dar una idea de cómo sería en un futuro y nos pueden ayudar a planear estrategias para conservar la diversidad. El otro aspecto es pensar que la adecuabilidad que se modela es reflejo de lo que ocurre en la realidad. Los algoritmos con los que se generan los modelos, establecen la relación entre los atributos ambientales y las localidades por medio de valores de probabilidad, que son interpretados como la “adecuabilidad del hábitat” (*habitat suitability*) e indican la existencia de condiciones ambientales propicias o adecuadas para una especie (Elith *et al.*, 2011), pero es pertinente advertir que son las condiciones que se incluyeron en el modelo (que en general son solo aspectos climáticos), las que dejan fuera aspectos fundamentales que incluyen la definición de hábitat, así como las in-

teracciones biológicas, sitios de refugio y/o reproducción, entre otros. Pero, además, aquí entra un aspecto importante de escalas, ya que la mayoría de los modelos se hacen a escalas enormes para los anfibios, en píxeles de aproximadamente 1 km^2 , equivalente a 100 hectáreas. Es decir, se nulifica la variación que existe al interior de ese píxel. Sin embargo, en la realidad, si recorremos 100 ha, podremos ver —aún en paisajes homogéneos—, mucha variación en el terreno (cañadas, huecos, hondonadas, por mencionar algunos) y microclimas que los organismos pueden explotar.

En este sentido, junto con Mariana Munguía, Andrés Lira y Pilar Rodríguez, he desarrollado varios escenarios hipotéticos que nos pueden ayudar a imaginarnos cómo sería la diversidad si cambiaran las condiciones ambientales (véase **Figura 2**). En cada uno de ellos, empezando de izquierda a derecha, se representan: primero, los cambios en las áreas de distribución ilustrados con flechas (cambian, aumentan, se mueven, desaparecen); después una gráfica que representa los cambios en los aspectos más comúnmente medidos de las

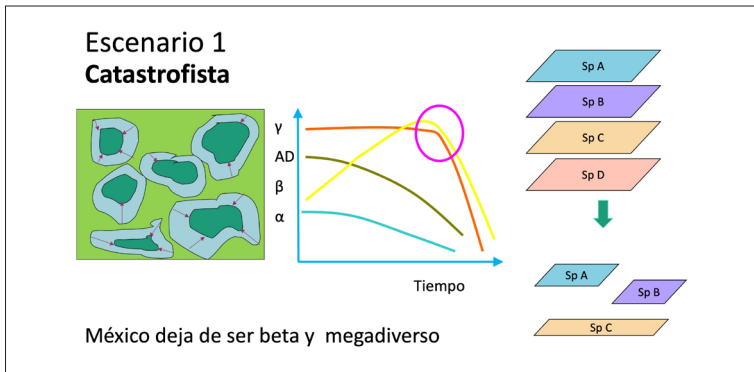


Figura 2. Escenarios hipotéticos de cambio en la diversidad enfocados desde el área de distribución (α).

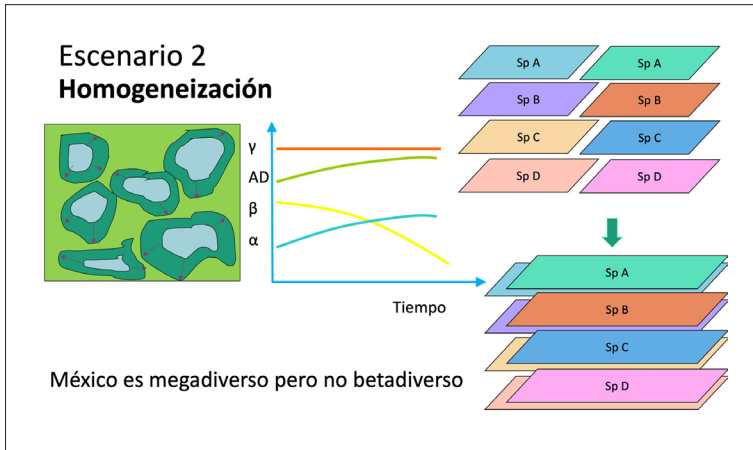


Figura 2. Escenarios hipotéticos de cambio en la diversidad enfocados desde el área de distribución (b).

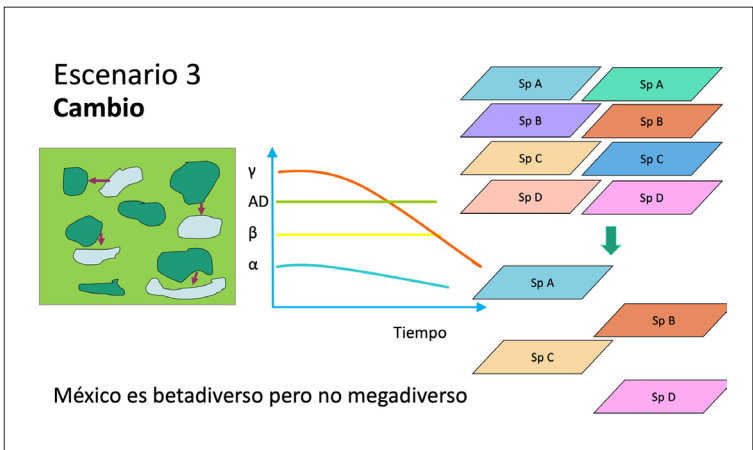


Figura 2. Escenarios hipotéticos de cambio en la diversidad enfocados desde el área de distribución (c).

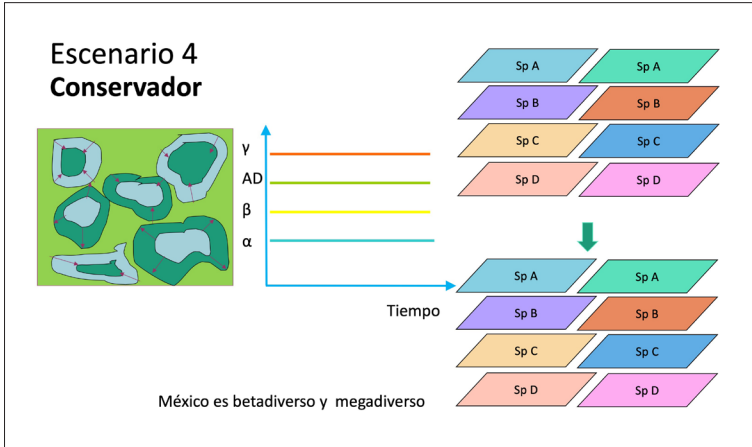


Figura 2. Escenarios hipotéticos de cambio en la diversidad enfocados desde el área de distribución (d).

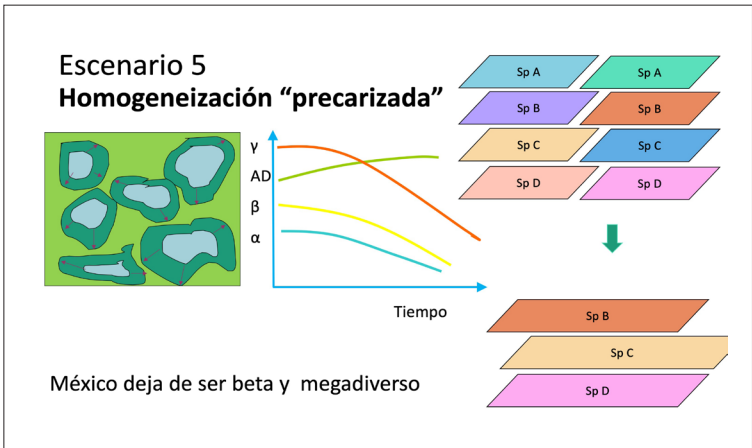


Figura 2. Escenarios hipotéticos de cambio en la diversidad enfocados desde el área de distribución (e).

comunidades, donde alfa (α) es la riqueza de especies a nivel local, beta (β) el recambio de especies entre comunidades, gama (γ) es la riqueza de especies a nivel regional; AD que nos dice el tamaño de área de distribución promedio; el círculo rosa representaría el punto en el tiempo en que hay un colapso de la diversidad; y finalmente, están representadas las comunidades, los romboides serían las especies, antes (arriba) y después (abajo).

Escenario 1. Catastrofista. Este es el escenario quizás más popular, donde se supone que todas las áreas de distribución de todas las especies están reduciéndose constantemente, por lo que aumenta el recambio (beta), se reduce la riqueza local (alfa), la riqueza regional (gama) se mantiene igual *per se* llegará un punto mínimo de tamaño (círculo rosa), donde posteriormente se extinguirán muchas especies causando un colapso de la diversidad. **Escenario 2. Homogeneización.** Es un escenario poco probable donde el aumento de temperatura es benéfico para las especies, las cuales en respuesta aumentan sus áreas de distribución, por lo que se reduce el recambio (beta), se aumenta la riqueza local (alfa) y la riqueza regional (gama) se mantiene igual. **Escenario 3. Cambio.** En este escenario se supone que al cambiar las condiciones ambientales hay emigrantes e inmigrantes en todas las zonas, pues las especies van siguiendo sus preferencias ambientales, no obstante, algunas especies no llegarán a los sitios ideales y se extinguirán baja alfa y gama, pero el resto quedará igual. **Escenario 4. Conservador.** En este escenario, aunque hay especies que aumentan su área de distribución, hay otras que la reducen, por lo que todas las medidas quedan igual. Finalmente, lo que yo supongo que va a pasar es el **Escenario 5. Homogeneización precarizada.** En este escenario, solo las especies tolerantes, o que puedan adaptarse, permanecerán en los paisajes y serán las mismas en todos los paisajes, muchas se

extinguirán por lo que alfa, beta y gamma se reducirán, y la única medida que aumentará será el área de distribución promedio.

¿Qué sí sabemos?

El cambio del uso del suelo, representado por modificaciones del paisaje, ha sido identificado como la principal amenaza para la pérdida de diversidad de anfibios (Alford, 2011; Alford *et al.*, 2007; Fischer, & Lindenmayer, 2007). También sabemos que los remanentes de vegetación conservada son cada vez menos, y existe una creciente urbanización de zonas rurales. Hay una recuperación de la vegetación en zonas abandonadas y, por otro lado, una gran pérdida de suelos.

No obstante, hay otros aspectos antropogénicos que afectan terriblemente a la diversidad. Por ejemplo, pesticidas/herbicidas como el glifosato causan mortalidades de hasta un 80 % en juveniles expuestos. Hay casos más extremos que en menos 24 hr causan la muerte (Berger *et al.*, 2018). Otro ejemplo, es la radiación (de moda en los 80 por obvias razones), o los actualmente en boga microplásticos, de los cuales apenas estamos empezando a entender un poco lo que ocasionan.

Obstáculos en el camino

Los anfibios son organismos relativamente inteligentes que van a buscar cumplir su ciclo de la mejor manera, por lo cual es de suponer que, si hay algo que los está afectando, tenderían a moverse en el paisaje, y aquí entran otros conceptos. Para que un organismo se pueda desplazar dentro del paisaje tiene que haber una *permeabilidad* adecuada. Esta está definida como el grado en que el paisaje facilita o impide el

movimiento entre parches de distintas características ambientales. La *fricción* es la probabilidad de que un individuo de determinada especie cruce un parche de determinadas características (Rayfield *et al.*, 2011; Suter *et al.*, 2007). Lo que resulta verdaderamente preocupante es que cada vez más existen estructuras de origen antrópico (carreteras, ciudades) que les van a impedir el paso, limitando la dispersión y provocando que no puedan “salvarse”.

Se han enumerado distintas causas que ocasionan la disminución, extirpación e incluso la extinción de anfibios. Sin embargo, es importante hacer hincapié en que hace falta más trabajo de campo y monitoreo en la mayoría de los casos, a fin de poder determinar la salud de las poblaciones y su estado de supervivencia. Se sabe que existen casos de fluctuaciones naturales de poblaciones. Los trabajos de monitoreo a largo plazo y de estudio de poblaciones no solo son necesarios para esclarecer cuáles especies están efectivamente extintas, sino para poder determinar los sitios prioritarios para la protección bajo distintos escenarios de cambios de uso de suelo, crecimiento poblacional y calentamiento global.

Agradecimientos

Este trabajo se llevó a cabo gracias al financiamiento parcial por parte de PAPIIT IN220321 (DGAPA-UNAM). Agradezco a Rafa De Villa Magallón por la revisión múltiple del manuscrito y a César Ríos-Muñoz por los comentarios.



Referencias

- Alford, R. A. (2011). Bleak future for amphibians. *Nature*, 480, 461–462. <https://doi.org/10.1038/480461a>
- Alford, R. A., Bradfield, K. S., & Richards, S. J. (2007). Ecology: Global warming and amphibian losses. *Nature*, 447(7144), 3–6. <https://doi.org/10.1038/nature05940>
- Bastos, R. P., & Abe, A. S. (1998). Dormancy in the Brazilian horned toad *Ceratophys aurita* (Anura, Lepidodactylidae). *Ciência e Cultura Journal of the Brazilian Association for the Advancement of Science*, 50(1), 67–70.
- Berger, G., Graef, F., Pallut, B., Hoffmann, J., Brühl, C. A., & Wagner, N. (2018). How Does Changing Pesticide Usage Over Time Affect Migrating Amphibians: A Case Study on the Use of Glyphosate-Based Herbicides in German agriculture over 20 Years. *Frontiers in Environmental Science*, , 1–10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00006>
- Bicego, K. C., Barros, R. C. H., & Branco, L. G. S. (2007). Physiology of temperature regulation: Comparative aspects. *Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology*, 147(3), 616–639. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2006.06.032>
- Burger, J., & Zappalorti, R. T. (1988). Effects of Incubation Temperature on Sex Ratios in Pine Snakes: Differential Vulnerability of Males and Females. *The American Naturalist*, 132(4), 492. <https://doi.org/10.1086/284867>
- CONAGUA y SMN. (2023). Monitor de sequía en México al 31 de marzo. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Cothran, R. D., Brown, J. M., & Relyea, R. A. (2013). Proximity to agriculture is correlated with pesticide tolerance: evidence for the evolution of amphibian resistance to modern pesticides. *Evolutionary Applications*, 6(5), 832–841. <https://doi.org/10.1111/eva.12069>
- Cowie, R. H., Bouchet, P., & Fontaine, B. (2022). The Sixth Mass Extinction:

- fact, fiction or speculation? *Biological Reviews*, 97(2), 640–663. <https://doi.org/10.1111/brv.12816>
- Elith, J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee, and C. J. Yates. 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17, 43–57. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Ellis, E. C., Gauthier, N., Goldewijk, K. K., Bird, R. B., Boivin, N., Díaz, S., Fuller, D. Q., Gill, J. L., Kaplan, J. O., Kingston, N., Locke, H., McMichael, C. N. H., Ranco, D., Rick, T. C., Shaw, M. R., Stephens, L., Svenning, J.-C., & Watson, J. E. M. (2021). People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(17), e2023483118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2023483118>
- Fischer, J., & Lindenmayer, D. B. (2007). Landscape modification and habitat fragmentation: A synthesis. *Global Ecology and Biogeography*, 16(3), 265–280. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00287.x>
- Fontaine, S. S., Mineo, P. M., & Kohl, K. D. (2022). Experimental manipulation of microbiota reduces host thermal tolerance and fitness under heat stress in a vertebrate ectotherm. *Nature Ecology and Evolution*, , 405–417. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01686-2>
- Frazer, N. B., Greene, J. L., & Gibbons, J. W. (1993). Temporal Variation in Growth Rate and Age at Maturity of Male Painted Turtles, *Chrysemys picta*. *American Midland Naturalist*, 130(2), 314–324. <https://doi.org/10.2307/2426130>
- Gururaja, K. (2010). Old World's smallest frog discovered residing in killer plants. *Current Science*, 99(8),1000.
- Gutzke, W. H., & Crews, D. (1988). Embryonic temperature determines adult sexuality in a reptile. *Nature*, 332, 832–834. <https://doi.org/10.1038/332832a0>
- Jiang, L., & Morin, P. J. (2004). Temperature-dependent interactions explain unexpected responses to environmental warming in communities of

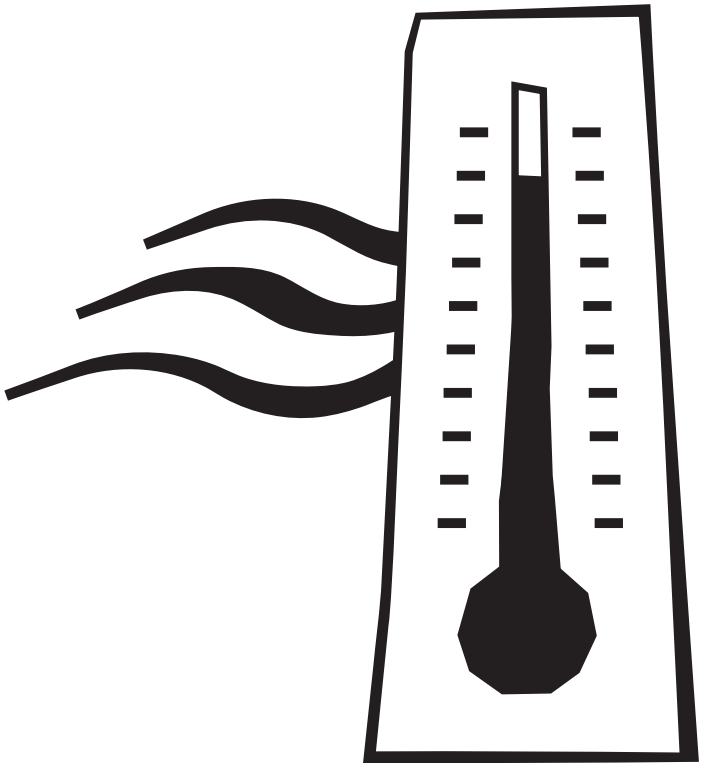
- competitors. *Journal of Animal Ecology*, 73(3), 569–576. <https://doi.org/10.1111/j.0021-8790.2004.00830.x>
- Johnson, P. T. J., McKenzie, V. J., Peterson, A. C., Kerby, J. L., Brown, J., Blaustein, A. R., & Jackson, T. (2011). Regional Decline of an Iconic Amphibian Associated with Elevation, Land-Use Change, and invasive Species. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 25(3), 556–566. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01645.x>
- Koleff, P., Soberón, J., Arita, H. T., Dávila, P., Flores-Villela, O, Golubov, J., Halffter, G., Lira-Noriega, A., Moreno, C. E., Moreno, E., Munguía, M. Murguía, M., Navarro-Sigüenza, A. G., Téllez, O., Ochoa-Ochoa, L., Peterson, A. T., & Rodríguez, P.(2008). Patrones de diversidad espacial en grupos selectos de especies. In J. Soberón, G. Halffter, & J. Llorente-Bousquets (Eds.), *Capital Natural de México Vol. I. Conocimiento de la Biodiversidad México*. (Vol. I, pp. 323–364). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2003.01638.x>
- McCoy, K. A., & Peralta, A. L. (2018). Pesticides Could Alter Amphibian Skin Microbiomes and the Effects of *Batrachochytrium dendrobatidis*. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1–5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00748>
- Navas, C. A. (1997). Thermal extremes at high elevations in the andes: Physiological ecology of frogs. *Journal of Thermal Biology*, 22(6), 467–477. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(97\)00065-X](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(97)00065-X)
- Pounds, J. A., & Crump, M. L. (1994). Amphibian Declines and Climate Disturbance: The Case of the Golden Toad and the Harlequin Frog. *Conservation Biology*, 8(1), 72–85. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1994.08010072.x>
- Price, S. J., Garner, T. W. J., Nichols, R. A., Balloux, F., Ayres, C., Mora-Cabello De Alba, A., & Bosch, J. (2014). Collapse of Amphibian Communities Due to an Introduced Ranavirus. *Current Biology*, 24(21), 2586–2591. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.09.028>
- Rayfield, B., Fortin, M., & Fall, A. (2011). Connectivity for conservation: a

- framework to classify network measures. *Ecology*, 92(4), 847–858. <http://dx.doi.org/10.1890/09-2190.1>
- Rebollar, E. A., Martínez-Ugalde, E., & Orta, A. H. (2020). The Amphibian Skin Microbiome and its Protective Role Against Chytridiomycosis. *Herpetologica*, 76(2), 167–177. <https://doi.org/10.1655/0018-0831-76.2.167>
- Shine, R. (1999). Why is sex determined by nest temperature in many reptiles? *Trends in Ecology and Evolution*, 14(5), 185–189. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01575-4](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01575-4)
- Stebbins, R. C., & Cohen, N. W. (1997). A natural history of amphibians. Princeton University Press.
- Storey, K. B., & Storey, J. M. (2017). Molecular Physiology of Freeze Tolerance in Vertebrates. *Physiological Reviews*, 97(2), 623–665. <https://doi.org/10.1152/physrev.00016.2016>
- Suter, W., Bollmann, K., & Holderegger, R. (2007). Landscape Permeability: From Individual Dispersal to Population Persistence. In: Kienast, F., Wildi, O., Ghosh, S. (Eds.), *A Changing World. Landscape Series, vol 8* (pp. 157–174). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4436-6_11
- Turvey, S. T., & Crees, J. J. (2019). Extinction in the Anthropocene. *Current Biology*, 29(19), R982–R986. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.07.040>
- Velasco, J. A., Estrada, F., Calderón-Bustamante, O., Swingedouw, D., Ureta, C., Gay, C., & Defrance, D. (2021). Synergistic impacts of global warming and thermohaline circulation collapse on amphibians. *Communications Biology*, 4(1), 141. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01665-6>
- Vitt, L. J., & Caldwell, J. P. (2013). *Herpetology: An Introductory Biology of Amphibians and Reptiles: Fourth Edition*. *Herpetology: An Introductory Biology of Amphibians and Reptiles* (Fourth Edition). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67152-5>
- Wells, K. D. (2007). *The Ecology and Behavior of Amphibians*. *The Ecology and Behavior of Amphibians*. University Chicago Press. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226893334.001.0001>

Whiles, M. R., Lips, K. R., Pringle, C. M., Kilham, S. S., Bixby, R. J., Brenes, R. Connelly, S., Colon-Gaud, J. C., Hunte-Brown, M., Huryrn, A. D., Montgomery, C., & Peterson, S. (2006). The effects of amphibian population declines on the structure and function of Neotropical stream ecosystems. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 4(1), 27–34. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2006\)004\[0027:teoapd\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2006)004[0027:teoapd]2.0.co;2)



**Una incremento de 2°C
en la temperatura del
aire reduce drásticamente
el tiempo de actividad de
los reptiles**



03.

Efectos del cambio climático en los reptiles del noroeste de México. Una visión ecofisiológica

Rafael Alejandro Lara-Reséndiz¹

El cambio climático global (CCG) es una de las principales amenazas para la biodiversidad en el siglo XXI (Ceballos *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2010). Los organismos pueden presentar tres respuestas ante los regímenes climáticos cambiantes. Primero, dado el tiempo suficiente y las capacidades de dispersión, la distribución de las especies puede cambiar hacia ambientes térmicos más favorables. Segundo, los organismos pueden adaptarse a los nuevos entornos locales ya sea por plasticidad conductual o fisiológica o por respuestas evolutivas adaptativas. La tercera y última respuesta, ante la falta de adaptación, es la extinción local de poblaciones o especies enteras, debido al colapso demográfico. A escala global, gradualmente se ha incrementado la evidencia de extinciones causadas por el CCG (Deutsch *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2010). Asimismo, los estudios a largo plazo, aunque en un conjunto limitado de taxones, han demostrado que el

¹ Departamento de Ciencias del Agua y Medio Ambiente, Instituto Tecnológico de Sonora, Ciudad Obregón 85000, Sonora, México.
Conservación de Fauna del Noroeste, A.C., Ensenada, C. P. 22785, Baja California, México. Correo: rafas.lara@gmail.com

ccg contemporáneo afecta el límite de la distribución de las especies, tanto en latitud como en elevación (Chen *et al.*, 2011; Maier *et al.*, 2022; Sillero, 2021).

Los animales ectotérmicos, como los reptiles no aviares, dependen de fuentes de calor externas para mantener su temperatura corporal (T_c) dentro de un intervalo específico para realizar sus actividades biológicas fundamentales (Huey & Slatkin, 1976). Por esta razón, los estudios de biología del cambio climático que incluyen esta característica fisiológica, sugieren que la alteración del nicho térmico puede afectar severamente a este grupo (Huey *et al.*, 2009; Tewksbury *et al.*, 2008). Cuando su T_c está dentro de un intervalo específico de temperatura seleccionada (también llamada “preferida”, T_{pref}) se maximiza la mayoría de las funciones biológicas, sin embargo, a medida que la T_c se acerca a los límites de tolerancia térmica (e.g., temperatura crítica máxima, CT_{max}), esas funciones disminuyen, lo que genera efectos perjudiciales, como trastornos en la digestión, locomoción y reproducción. Por mencionar un ejemplo, Dunham (1993) demostró que una variación de 2 °C en la temperatura del aire restringe severamente el tiempo de actividad de los reptiles, reduciendo la ganancia neta de energía disponible para la reproducción y la tasa de crecimiento poblacional, por lo tanto, puede acelerar su extinción (ver también Huey *et al.*, 2010; Sinervo *et al.*, 2010).

Los modelos de distribución de especies (MDE) son una herramienta que ha permitido a los ecólogos evaluar la vulnerabilidad de la biodiversidad ante el ccc (Peterson *et al.*, 2011; Wiens & Graham, 2005). Es claro que la vulnerabilidad de las especies puede variar, debido a las características intrínsecas de cada especie/población con respecto a sus adaptaciones, a los requerimientos y tolerancias térmicas, así como a la complejidad del ambiente y nicho térmico y de la dirección y magnitud del cambio climático (Deutsch *et al.*,

2008; Kearney & Porter, 2009; Sears *et al.*, 2011). Por lo anterior, se han generado MDE bajo enfoques mecanicistas, es decir, construidos a partir de la relación entre variables ambientales, biofísicas, fisiológicas y/o demográficas (Kearney & Porter, 2004; Sinervo *et al.*, 2010). Los MDE mecanicistas pueden brindar el máximo poder predictivo cuando se proyectan a través del paisaje en climas actuales o escenarios pasados o futuros (Buckley *et al.*, 2010; Jezkova *et al.*, 2016; Kearney & Porter, 2009).

Basado en este enfoque, un análisis global a nivel de familias y calibrado con extinciones actuales reveló que el 20 % de las especies de lagartijas a nivel mundial se podría extinguir para el año 2080, a causa del aumento de la temperatura ambiental (Sinervo *et al.*, 2010). Por un lado, algunas familias podrían tener un riesgo de extinción alto (*Helodermatidae*, 91 %), mientras que otras tendrían un riesgo nulo (*Annielliidae*, <1 %). A pesar de que las proyecciones generales del riesgo de extinción de las lagartijas por el incremento de la temperatura son alarmantes, estas podrían subestimar la probabilidad de extinción a nivel de especie o a escala regional (Altamirano-Benavides *et al.*, 2019). Además, la mayoría de las proyecciones de los modelos actuales no incluyen información fisiológica o demográfica para predecir los efectos ante el aumento de la temperatura ambiental (Diele-Viegas & Rocha, 2018; Winter *et al.*, 2016), lo cual debe ser tomado en cuenta para reducir la incertidumbre de los modelos y mejorar la precisión de las proyecciones al planificar estrategias de mitigación y adaptación al ccc. Por esto, los estudios que evalúan el riesgo de extinción de las especies, con modelos que incorporan el papel de las adaptaciones térmicas, deben ser considerados de alta prioridad sobre todo a nivel regional y para las especies que, por su sensibilidad térmica y su distribución geográfica, podrían ser altamente susceptibles al ccc (Aburto-Oropeza *et al.*, 2018). Así mismo

es importante evaluar y validar las proyecciones ya sea con enfoques retrospectivos, contrastando estudios poblacionales actuales con trabajos históricos o mediante trabajo de campo para analizar rasgos de la especie como la abundancia, adecuación, desempeño o calidad térmica en las áreas vulnerables. Para un ejemplo ver Sinervo *et al.* (2010), donde las proyecciones de extinción global de lagartijas se validaron con extinciones locales observadas entre 1975 y 2009 en los cinco continentes.

Este capítulo, resume la información obtenida durante 12 años de investigación derivada del proyecto “*Cambio climático y colapso de nichos térmicos de reptiles mexicanos*”, donde se ha generado información sobre ecofisiología de reptiles modelo (lagartijas y tortugas) con características de historia de vida únicas y que habitan el noroeste árido de México y suroeste de Estados Unidos. Algunos ejemplos de las características de historia de vida consideradas fueron: el modo de termorregulación (termorregulador / termoconformista), periodo de actividad (diurno / nocturno), distribución (microendémicas / amplia distribución), así como hábitos particulares (e.g., fosorial, saxícola, termofilia, etc.). Además, se revisaron los estudios sobre los efectos del cambio climático en poblaciones de reptiles del noroeste, con el objetivo de englobar y sintetizar cuáles son los efectos del ccc en esta región de México, e identificar a las especies con mayor riesgo. A continuación, se describen los métodos utilizados para realizar los MDE ecofisiológicos, sin embargo, hay una descripción detallada en Sinervo *et al.* (2024).

Primeramente, se recopiló información sobre la distribución geográfica de las especies modelo, a partir de una variedad de fuentes: Global Biodiversity Information Facility (GBIF; <https://www.gbif.org>), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO; <http://enciclovida.mx>), Colección Nacional de Anfibios y

Reptiles (CNAR), *Amphibian and Reptile Atlas of Peninsular California* (<http://herpatlas.sdnhm.org>), Madrean Discovery (www.madreadiscovery.org), trabajo previo de campo y literatura especializada. Se depuraron los datos con localidades inciertas o erróneas en identificación o descripción de la localidad. También se recopiló información sobre la ecología térmica, a fin de determinar los requerimientos térmicos de los reptiles tanto en campo como en laboratorio (e.g., Cardona-Botero *et al.*, 2020; Lara-Resendiz, *et al.*, 2015) y en diferentes poblaciones a lo largo de su distribución (e.g., Pérez-Delgadillo *et al.*, 2021). La figura 1 muestra un ejemplo de gradiente térmico para evaluar los requerimientos térmicos de las lagartijas phrynosomátidas bajo condiciones controladas de laboratorio. Simultáneamente, se monitoreó la temperatura operativa, es decir, la temperatura a nivel de microhábitat, usando modelos que imitan las propiedades biofísicas de los organismos durante periodos biológicamente significativos y en la mayor cantidad de hábitats posibles ocupados por las especies (Lara-Resendiz *et al.*, 2022a, 2022b). La figura 2 muestra un ejemplo de modelos operativos para tortugas del género *Gopherus*.

Posteriormente, se realizó una serie de superficies espaciales con variables ecofisiológicas, según el enfoque de Sinervo *et al.* (2010), basadas en las horas de restricción térmica (h_r), es decir, el número de horas por día cuando la temperatura operativa ambiental supera los requerimientos térmicos particulares (i.e., temperatura preferida o voluntaria [T_{pref} o T_{vol}]) y fuerza la inactividad de la especie. La figura 3 muestra las hr en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos, para cuatro grupos de reptiles modelo, según sus requerimientos térmicos ($T_c = <29, 29-32, 32-35$ y $35-38$ °C). También se consideró la capa de horas de actividad (h_a), estas son las horas cuando la temperatura operativa permanece dentro del intervalo de requerimientos térmicos y permite la actividad. Finalmente, con los insumos anteriores se realizaron MDE



**Los reptiles no aviares,
enfrentan desafíos
considerables cuando su
nicho térmico se altera,
amenazando sus funciones
biológicas fundamentales.**





Figura 1. Gradiente térmico artificial, donde los organismos seleccionan y mantienen su temperatura corporal dentro de un intervalo específico, a partir de una amplia gama de microclimas, igualmente accesibles y en ausencia de restricciones físicas y ecológicas para la termorregulación. Este intervalo refleja su preferencia o la temperatura corporal preferida (T_{pref}).

ecofisiológicos de las especies focales del noroeste de México basados en ensamblajes de modeladores estadísticos y de inteligencia artificial, para explorar los efectos potenciales del ccc (Caetano *et al.*, 2020). Se utilizaron dos períodos de tiempo (2050 y 2070) y dos trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés, 45 y 85). Estos escenarios RCP representan dos diferentes concentraciones de emisiones antropogénicas de CO_2 . Por un lado, el escenario 4.5 es más estable con respecto a las emisiones de CO_2 ; mientras que el escenario



Figura 2. Monitoreo de temperaturas operativas ambientales (T_o) mediante modelos de cobre calibrados, que simulan las características biofísicas de *Gopherus* en el microhábitat. El recuadro muestra a una tortuga *Gopherus* con dos registradores de temperatura *iButtons* para monitorear su temperatura corporal en semicautiverio (más detalles en Lara-Resendiz *et al.*, 2022b).

8.5 representa una trayectoria pesimista con las más altas emisiones de gases de efecto invernadero.

Según Garfin *et al.* (2013), los modelos climáticos para el suroeste de Estados Unidos y noroeste de México indican que, a finales de este siglo, las temperaturas extremas diarias, así como las temperaturas del verano, incrementarán de 3 a 6 °C. En esta región se proyecta que disminuirá la disponibilidad de agua (descarga de arroyos y frecuencia de lluvias), afectando la humedad relativa y la

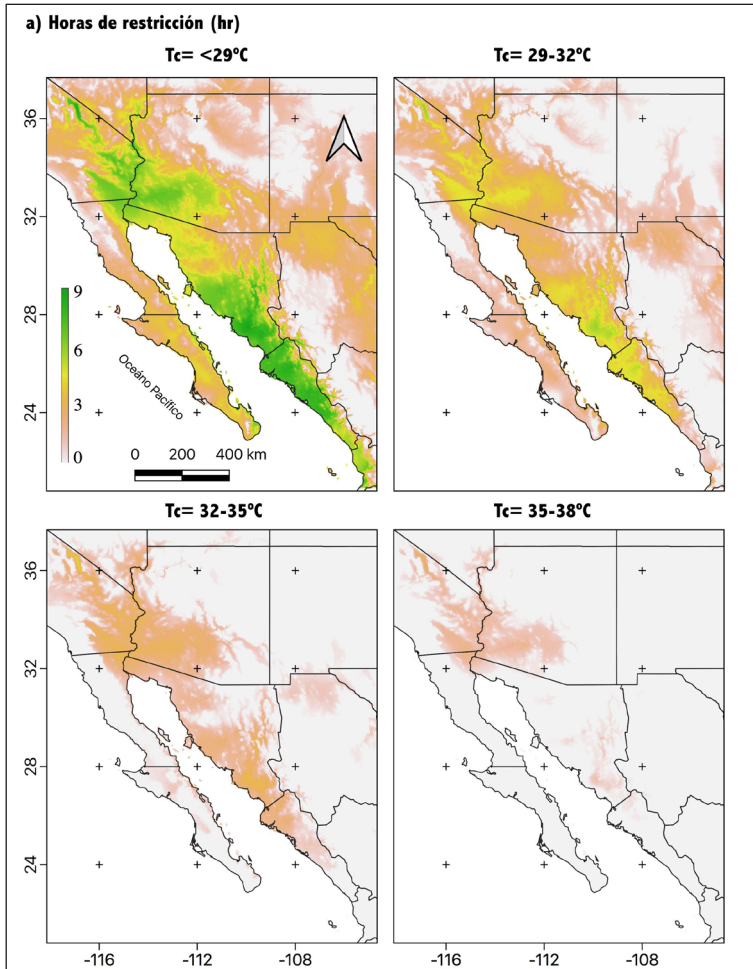


Figura 3. Capa ecofisiológica de horas de restricción (hr) en el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos, proyectada al presente, para cuatro reptiles modelo, según cuatro intervalos de temperaturas corporales ($T_c = <29$, $29-32$, $32-35$ y $35-38^\circ\text{C}$).

humedad del suelo con periodos prolongados de sequía, los cuales afectarán directamente a la cobertura vegetal. Por un lado, se incrementa el riesgo de sobrecalentamiento de los reptiles, por ejemplo, las tortugas volcadas o atrapadas en áreas soleadas durante los meses cálidos se sobrecalientan rápidamente (Lara-Reséndiz *et al.*, 2022). Por otro, el periodo de actividad en la superficie se acorta, debido a que la temperatura ambiental está por encima de los requerimientos térmicos (Sinervo *et al.*, 2010). En otras palabras, a mayor número de horas de restricción la ventana de actividad térmica óptima se confina, y es insuficiente para realizar sus actividades biológicas, a causa del estrés térmico y osmótico (Sinervo *et al.*, 2024). Por ejemplo, la temperatura crítica máxima de la tortuga *Gopherus agassizii* ronda los 39.5 °C y la temperatura letal los 43 °C, por esto, el aumento de la exposición a temperaturas extremas es un problema grave (Lara-Reséndiz *et al.*, 2022a).

Algunos reptiles son heliótermos, es decir que requieren la exposición a la radiación solar directa para alcanzar su temperatura corporal fisiológicamente activa; mientras que otros son termoconformistas, esto es que su temperatura corporal fluctúa junto con la temperatura ambiental. En ambas estrategias, la actividad durante la estación cálida podría provocar que la temperatura corporal exceda su máximo térmico crítico y producir la muerte por sobrecalentamiento. Los reptiles termoconformistas, generalmente, mantienen temperaturas corporales bajas y habitan en bosques tropicales, donde las oportunidades de termorregulación (e.g., asolearse) son limitadas (Tewksbury *et al.*, 2008). Aquí el modo de termorregulación plantea la hipótesis *a priori* de que los reptiles termoconformes estarían en mayor riesgo de extinción por el cccg, debido a que están más cerca de sus límites térmicos y están adaptados a los hábitats más “fríos”, por la cobertura vegetal de los bosques cerrados (Huey *et al.*, 2009). Los

resultados de los MDE ecofisiológicos de la tortuga *Gopherus evgoodei*, que habita principalmente los bosques tropicales secos en el sur de Sonora, Chihuahua y norte de Sinaloa, apoyan esta teoría, porque esta especie podría ser afectada mayormente por el incremento de la temperatura que sus especies hermanas del desierto de Sonora y Mojave (*G. morafkai* y *G. agassizii*), incluso en el escenario más estable (Lara-Resendiz *et al.*, 2022a; Sinervo *et al.*, 2024).

El mismo patrón con efectos negativos se ha registrado para lagartijas termoconformistas (i.e., cuya temperatura corporal fluctúa junto con la temperatura ambiental) y que presentan hábitos fosoriales como *Bipes biporus* y *Anniella geronimensis*, las cuales contraerán significativamente su distribución potencial (Lara-Reséndiz *et al.*, 2021). Otros estudios que han evaluado el efecto del cambio climático mediante MDE en reptiles del desierto chihuahuense, por ejemplo, *Uma exsul*, *U. paraphygas* (Ballesteros-Barrera *et al.*, 2007), *Sceloporus cyanostictus*, *Crotaphytus antiquus* (Gadsden *et al.*, 2012), *Urosaurus ornatus* (Gadsden *et al.*, 2020), *Phrynosoma cornutum*, *P. modestum* (Lara-Resendiz *et al.*, 2015) y *Gopherus flavomarginatus* (Becerra-López *et al.*, 2017), coinciden en una reducción importante de su distribución, debido al cCG y un alto grado de transformación antropogénica del hábitat.

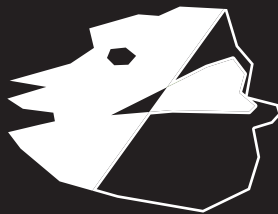
Por último, las especies termófilas (i.e., preferencias térmicas altas), termorreguladoras activas y de amplia distribución en el noroeste de México, tales como *Dipsosaurus dorsalis* y *Callisaurus draconoides*, que bajo escenarios de cCG mostraron un efecto positivo gracias a su alta tolerancia térmica, lo cual se refleja en expansión potencial de áreas térmicamente adecuadas, e incluso ampliación de su distribución potencial bajo todos los escenarios (Lara-Resendiz *et al.*, 2019; Pérez-Delgadillo *et al.*, 2021). Un patrón similar fue obtenido con lagartijas nocturnas del género *Xantusia* (*X. gilberti*, *X. henshawi*

y *X. sherbrookei*), a lo largo de la península de Baja California, que serán afectadas positivamente por el cambio climático, ya que el aumento de las temperaturas microambientales conducirá a una mayor calidad térmica del hábitat y menores costos de termorregulación (Arenas-Moreno *et al.*, 2021).

En cuanto a los diferentes escenarios y periodos de tiempo, la tendencia es que el escenario pesimista RCP 8.5, para el 2070, muestra la mayor pérdida del área idónea para las especies. Por ejemplo, para la lagartija de amplia distribución, *Sceloporus grammicus*, se perderá 61.6 % del hábitat térmicamente adecuado y su probabilidad de extirpación será de 51.4 %, además presenta una probabilidad desfavorable por mantener sus poblaciones al noroeste de su distribución (Sonora y Durango; Gómez-Campos, 2022). La literatura actual, apoya que las lagartijas vivíparas son más susceptibles al ccg en comparación con las lagartijas ovíparas, debido a que las primeras pasan más tiempo resguardadas, aminorando su periodo de actividad para forrajear, haciendo insuficiente la energía neta para la época reproductiva, lo que provoca una reducción en sus poblaciones (Huey *et al.*, 2010; Sinervo *et al.*, 2010).

En conclusión, los resultados indican que los efectos del ccg pueden variar según la termofisiología de los reptiles, y se encontraron cuatro patrones según los modelos de probabilidad de extinción: 1) Especies termófilas y con amplia distribución serán potencialmente afectadas de manera positiva, puesto que habrá un incremento en su distribución potencial (e.g., Lara-Resendiz *et al.*, 2019; Pérez-Delgadillo, 2020; Pérez-Delgadillo *et al.*, 2021). 2) Especies de distribución restringida, dentro de las zonas áridas serán fuertemente afectadas, acortando los sitios con hábitat adecuado (e.g., Lara-Resendiz *et al.*, 2021). 3) Especies de zonas templadas y tropicales, ubicadas en altas elevaciones y al sur de su distribución, tienen alta probabilidad de

Los efectos del CCG pueden variar según la termofisiología de los reptiles, y se encontraron cuatro patrones según los modelos de probabilidad de extinción.



extinción, dada la falta de movilidad, requerimientos térmicos bajos y la alteración de su nicho térmico (Gómez-Campos, 2022; Lara-Resendiz *et al.*, 2022a, 2022b; Sinervo *et al.*, 2024). 4) Algunas especies diurnas podrían evadir las altas temperaturas modificando o alternando diferentes estrategias conductuales, por ejemplo, especies consideradas exclusivamente diurnas pueden cambiar o alternar a una actividad crepuscular o nocturna (i.e., catemeralidad; Arenas-Moreno *et al.*, 2021; Lara-Resendiz, 2020).

Agradecimientos

Dedico este trabajo a la memoria de Barry Sinervo (1960-2021), quien impactó al mundo de la biología y fue clave en este y otros proyectos sobre el cambio climático en México. Parte de este trabajo fue financiado por el CONACYT (PDCPN 2015-1319). Agradezco las becas posdoctorales de UC-MEXUS-CONACYT (FE-14-2), CONICET-Argentina (2019-2022) y el apoyo del programa de repatriación CONACYT-ITSON (2022-2023; 165066) y al financiamiento PROFAPI (2023-033-RALR) para realizar el trabajo de campo y la escritura del manuscrito. Finalmente, agradezco especialmente a Patricia Galina y Fausto Méndez por su apoyo logístico y a Jorge Valdez, Diego Arenas, Saúl Domínguez, Daniel Pinto, Isaí Valle, Yaredh Ramírez y Ana Pérez por su ayuda durante el trabajo de campo.



Referencias

- Aburto-Oropeza, O., Johnson, A. F., Agha, M., Allen, E. B., Allen, M. F., González, J. A., Arenas Moreno, D. M., Beas-Luna, R., Butterfield, S., Caetano, G., Caselle, J. E., Gaytán, G. C., Castorani, M. C. N., Cat, L. A., Cavanaugh, K., Chambers, J. Q., Cooper, R. D., Arafeh-Dalmau, N., Dawson, T., ... Taylor, E. (2018). Harnessing cross-border resources to confront climate change. *Environmental Science & Policy*, 87, 128-132. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.001>
- Altamirano-Benavides, M. A., Domínguez-Guerrero, S. F., Muñoz-Nolasco, F. J., Arenas-Moreno, D. M., Santos-Bibiano, R., Gómez-Trejo Pérez, R., Lozano-Aguilar, L. E., Fierro-Estrada, N., Gandarilla-Aizpuro, F. J., Woolrich-Piña, G. A., Martínez-Méndez, N., Lara-Reséndiz, R. A., y Méndez-de la Cruz, F. R. (2019). Ecología térmica y riesgo de extinción ante el cambio climático de *Gonatodes concinnatus* (Squamata: Sphaerodactylidae), una lagartija endémica de la Amazonía occidental. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902824. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2824>
- Arenas-Moreno, D. M., Lara-Resendiz, R. A., Domínguez-Guerrero, S. F., Pérez-Delgadillo, A. G., Muñoz-Nolasco, F. J., Galina-Tessaro, P., & Méndez-de la Cruz, F. R. (2021). Thermoregulatory strategies of three reclusive lizards (genus *Xantusia*) from the Baja California peninsula, Mexico, under current and future microenvironmental temperatures. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 335(5), 499–511. <https://doi.org/10.1002/jez.2470>
- Ballesteros-Barrera, C., Martínez-Meyer, E., & Gadsden, H. (2007). Effects of Land-Cover Transformation and Climate Change on the Distribution of Two Microendemic Lizards, Genus *Uma*, of Northern Mexico. *Journal of Herpetology*, 41(4), 733-740. <https://doi.org/10.1670/06-276.1>
- Becerra-López, J. L., Ramírez-Bautista, A., Romero-Méndez, U., Pavón, N.

- P., & Sánchez-Rojas, G. (2017). Effect of climate change on halophytic grasslands loss and its impact in the viability of *Gopherus flavomarginatus*. *Nature Conservation*, 21, 39-55. <https://doi.org/10.3897/nature-reconservation.21.13614>
- Buckley, L. B., Urban, M. C., Angilletta, M. J., Crozier, L. G., Rissler, L. J., & Sears, M. W. (2010). Can mechanism inform species' distribution models? *Ecology Letters*, 13(8), 1041-1054. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01479.x>
- Caetano, G. H. O., Santos, J. C., Godinho, L. B., Cavalcante, V. H. G. L., Diele-Viegas, L. M., Campelo, P. H., Martins, L. F., Oliveira, A. F. S., Alvarenga, J. M., Wiederhecker, H. C., de Novaes e Silva, V., Werneck, F. P., Miles, D. B., Colli, G. R., & Sinervo, B. R. (2020). Time of activity is a better predictor of the distribution of a tropical lizard than pure environmental temperatures. *Oikos*, 129(7), 953-963. <https://doi.org/10.1111/oik.07123>
- Cardona-Botero, V. E., Lara-Resendiz, R. A., & Galina-Tessaro, P. (2020). Field and selected body temperatures of the San Lucan rock lizard (*Petrosaurus thalassinus*) in Baja California, Mexico. *Herpetology Notes*, 13, 485-486.
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M., & Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, 1(5), e1400253. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1400253>
- Chen, I. C., Hill, J. K., Ohlemüller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 333(6045), 1024-1026. <https://doi.org/10.1126/science.1206432>
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Huey, R. B., Sheldon, K. S., Ghalambor, C. K., Haak, D. C., & Martin, P. R. (2008). Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(18), 6668-6672. <https://doi.org/10.1073/pnas.0709472105>

- Diele-Viegas, L. M., & Rocha, C. F. D. (2018). Unraveling the influences of Climate Change in Lepidosauria (Reptilia). *Journal of Thermal Biology*, 78, 401-414. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.11.005>
- Dunham, A. E. (1993). Population responses to environmental change: physiologically structured models, operative environments, and population dynamics. En P. M. Kareiva, J. G. Kingsolver, y R. B. Huey (Eds.), *Biotic interactions and global change* (pp. 95-119). Sinauer.
- Gadsden, H., Ballesteros-Barrera, C., Hinojosa de la Garza, O., Castañeda, G., García-De la Peña, C., & Lemos-Espinal, J. A. (2012). Effects of land-cover transformation and climate change on the distribution of two endemic lizards, *Crotaphytus antiquus* and *Sceloporus cyanostictus*, of northern Mexico. *Journal of Arid Environments*, 83(0), 1-9. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.03.014>
- Gadsden, H., Lara-Reséndiz, R. A., Minjarrez-Flores, N. F., Gatica-Colima, A., & Smith, G. R. (2020). Thermoregulation in a saxicolous population of the lizard *Urosaurus ornatus* from the northern Chihuahuan Desert, Mexico. *Amphibia-Reptilia*, vol. 42, 1-14. <https://doi.org/10.1163/15685381-bja10037>
- Garfin, G., Jardin, A., Merideth, R., Black, M., & LeRoy, S. (2013). Assessment of climate change in the Southwestern United States. Island Press.
- Gómez-Campos, J. E. (2022). Vulnerabilidad de *Sceloporus grammicus* ante el cambio climático global [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Tlaxcala.
- Huey, R. B., Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Vitt, L. J., Hertz, P. E., Perez, H. J. A., & Garland, T. (2009). Why tropical forest lizards are vulnerable to climate warming? *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 276(1664), 1939-1948. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.1957>
- Huey, R. B., Losos, J. B., & Moritz, C. (2010). Are lizards toast? *Science*, 328(5980), 832-833. <https://doi.org/10.1126/science.1190374>
- Huey, R. B., & Slatkin, M. (1976). Cost and benefits of lizard thermore-

- gulation. *Quarterly Review of Biology*, 51(3), 363-384. <https://doi.org/10.1086/409470>
- Jezkova, T., Jaeger, J. R., Olah-Hemmings, V., Jones, K. B., Lara-Resendiz, R. A., Mulcahy, D. G., y Riddle, B. R. (2016). Range and niche shifts in response to past climate change in the desert horned lizard (*Phrynosoma platyrhinos*). *Ecography*, 39, 437-448. <https://doi.org/10.1111/ecog.01464>
- Kearney, M., y Porter, W. (2009). Mechanistic niche modelling: combining physiological and spatial data to predict species' ranges. *Ecology Letters*, 12(4), 334-350. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01277.x>
- Kearney, M., y Porter, W. P. (2004). Mapping the fundamental niche: Physiology, climate, and the distribution of a nocturnal lizard. *Ecology*, 85(11), 3119-3131. <https://doi.org/10.1890/03-0820>
- Lara-Resendiz, R. A. (2020). ¿Qué implicaciones ecofisiológicas tiene la actividad nocturna en reptiles “diurnos”? una revisión. *Acta Biológica Colombiana*, 25(2), 314-326. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n2.78511>
- Lara-Resendiz, R. A., Arenas-Moreno, D. M., Beltrán-Sánchez, E., Gramajo, W., Verdugo-Molina, J., Sherbrooke, W. C., & Méndez de la Cruz, F. R. (2015). Selected body temperature of nine species of Mexican horned lizards (*Phrynosoma*). *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 86(1), 275-278. <https://doi.org/10.7550/rmb.48028>
- Lara-Resendiz, R. A., Gadsden, H., Rosen, P. C., Sinervo, B., & Méndez-de la Cruz, F. R. (2015). Thermoregulation of two sympatric species of horned lizards in the Chihuahuan Desert and their local extinction risk. *Journal of Thermal Biology*, 48, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtherbio.2014.11.010>
- Lara-Resendiz, R. A., Galina-Tessaro, P., Pérez-Delgado, A. G., Valdez-Villavicencio, J. H., y Méndez-de La Cruz, F. R. (2019). Efectos del cambio climático en una especie de lagartija termófila de amplia distribución (*Dipsosaurus dorsalis*): un enfoque ecofisiológico. *Revista*

- Mexicana de Biodiversidad*, 90, e902888. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2888>
- Lara-Resendiz, R. A., Galina-Tessaro, P., Sinervo, B., Miles, D. B., Valdez-Villavecencio, J. H., Valle-Jiménez, F. I., & Méndez-De la Cruz, F. R. (2021). How will climate change impact fossorial lizard species? Two examples in the Baja California Peninsula. *Journal of Thermal Biology*, 95, 102811. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102811>
- Lara-Resendiz, R. A., Miles, D., Rosen, P., & Sinervo, B. (2022a). Micro and macroclimatic constraints on the activity of a vulnerable tortoise: a mechanistic approach under a thermal niche view. *Functional Ecology*, 36, 2227-2239. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14148>
- Lara-Resendiz, R. A., Rosen, P., Sinervo, B., Miles, D. B., & Méndez-De la Cruz, F. R. (2022). Habitat thermal quality for *Gopherus evgoodei* in tropical deciduous forest and consequences of habitat modification by buffelgrass. *Journal of Thermal Biology*, 104, 103192. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103192>
- Maier, A.-R.-M., Cupşa, D., Ferentî, S., & Cadar, A.-M. (2022). New records of *Darevskia praticola* at the northern limit of its distribution range in Romania. *Herpetozoa*, 35, 45-50. <https://doi.org/10.3897/herpetozoa.35.e79892>
- Pereira, H. M., Leadley, P. W., Proenca, V., Alkemade, R., Scharlemann, J. P. W., Fernandez-Manjarres, J. F., Araujo, M. B., Balvanera, P., Biggs, R., Cheung, W. W. L., Chini, L., Cooper, H. D., Gilman, E. L., Guenette, S., Hurtt, G. C., Huntington, H. P., Mace, G. M., Oberdorff, T., Revenga, C., ... Walpole, M. (2010). Scenarios for global biodiversity in the 21st century. *Science*, 330(6010), 1496-1501. <https://doi.org/10.1126/Science.1196624>
- Pérez-Delgado, A. G. (2020). Ecología térmica de *Callisaurus draconoides* y su vulnerabilidad al cambio climático en la Península de Baja California, México [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Pérez-Delgadillo, A. G., Lara-Resendiz, R. A., Valdez-Villavicencio, J. H., Arenas-Moreno, D. M., Domínguez-Guerrero, S. F., Galina-Tessaro, P., & Méndez-de la Cruz, F. R. (2021). Thermal ecology of a thermophilic lizard *Callisaurus draconoides* through a latitudinal gradient. *Journal of Arid Environments*, 195, 104634. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104634>
- Peterson, A. T., Soberon, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martinez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araujo, M. B. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. Princeton University Press.
- R Core Team. (2021). *R: a Language and environment for statistical computing*. In R Foundation for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>
- Sears, M. W., Raskin, E., y Angilletta, M. J., Jr. (2011). The world Is not flat: defining relevant thermal landscapes in the context of climate change. *Integrative and Comparative Biology*, 51(5), 666-675. <https://doi.org/10.1093/icb/icr111>
- Sillero, N. (2021). Climate change in action: local elevational shifts on Iberian amphibians and reptiles. *Regional Environmental Change*, 21(4), 101. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01831-w>
- Sinervo, B., Lara-Reséndiz, R.A., Miles, D.B., Lovich, J.E., Rosen, P.C., Gadsden, H., Gaytán, G.C., Tessaro, P.G., Luja, V.H., Huey, R.B., Whipple, A., Cordero, V.S., Rohr, J.B., Caetano, G., Santos, J.C., Sites, J.W., Méndez de la Cruz, F.R., 2024. Climate change and collapsing thermal niches of desert reptiles and amphibians: Assisted migration and acclimation rescue from extirpation. *Science of The Total Environment*, 908, 168431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168431>
- Sinervo, B., Méndez-de la Cruz, F., Miles, D. B., Heulin, B., Bastiaans, E., Villagrán-Santa Cruz, M., Lara-Resendiz, R., Martínez-Méndez, N., Calderón-Espinosa, M. L., Meza-Lázaro, R. N., Gadsden, H.,

- Avila, L. J., Morando, M., De la Riva, I. J., Sepulveda, P. V., Rocha, C. F. D., Ibargüengoytía, N., Puntriano, C. A., Massot, M., ... Sites, JR J. W. (2010). Erosion of lizard diversity by climate change and altered thermal niches. *Science*, 328(5980), 894-899. <https://doi.org/10.1126/science.1184695>
- Tewksbury, J. J., Huey, R. B., & Deutsch, C. A. (2008). Putting the Heat on Tropical Animals. *Science*, 320(5881), 1296-1297. <https://doi.org/10.1126/science.1159328>
- Wiens, J. J., & Graham, C. H. (2005). Niche Conservatism: Integrating Evolution, Ecology, and Conservation Biology. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 36, 519-539. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102803.095431>
- Winter, M., Fiedler, W., Hochachka, W. M., Koehncke, A., Meiri, S., & De la Riva, I. (2016). Patterns and biases in climate change research on amphibians and reptiles: a systematic review. *Royal Society Open Science*, 3(9), 160158. <https://doi.org/10.1098/rsos.160158>



Este libro *Biodiversidad y cambio climático* de la colección *¿Qué sabemos del cambio climático en México?* se terminó en enero de 2024 en la Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México.

¿Cómo afecta el cambio climático la biodiversidad de México?

Los artículos que forman parte de este volumen, ejemplifican el estado del conocimiento sobre el impacto en la biodiversidad de México del cambio climático. Se presentan tres perspectivas que abordan el impacto del cambio climático en sistemas costeros en términos de adaptación y vulnerabilidad; impactos sobre grupos particulares susceptibles en los anfibios e impactos en los reptiles del noroeste de México.

El Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) inició en 2021 el ciclo de conferencias y conversatorios ¿Qué sabemos del cambio climático en México? que han dado lugar a esta colección.

En ¿Qué sabemos del cambio climático en México? expertos de distintas disciplinas científicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y de otras instituciones académicas del país, abordan distintos aspectos del cambio climático con una visión multidisciplinaria e integral de este fenómeno global y de importancia para el país.

Colección dirigida por el Dr. Francisco Estrada Porrúa.

ISBN colección: 978-607-30-8709-4

ISBN volumen: 978-607-30-8710-0

<https://www.pincc.unam.mx>

