
EVALUACIÓN DE LA IMPORTANCIA DE LA PERSISTENCIA Y DIMÁMICA EN LAS PROYECCIONES DE LOS IMPACTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.

Informe Final

Responsable: Dr. Francisco Estrada Porrúa

Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM

Colaboradores (en orden alfabético): Óscar Calderón Bustamante; Enrique
Martínez Meyer; Julián Velasco Vinasco

Contenido

Introducción	3
Planteamiento, metodología y datos	5
Planteamiento.....	5
Metodología y datos	8
Resultados y discusión	12
Conclusiones	22
Referencias	23
Anexo	26

Introducción

A lo largo de las últimas décadas, se ha construido un acervo de evidencias observadas y estudios prospectivos sobre los efectos del cambio climático en México. En conjunto, este acervo muestra que el país ya ha experimentado efectos negativos en diversos sistemas humanos y naturales y apunta a que será particularmente vulnerable a los efectos de los cambios en el clima que se proyectan para este siglo (Estrada, 2018, 2016; Estrada et al., 2012; Gay, 2000; Gay et al., 2006; Ureta et al., 2018; Villers-Ruíz and Trejo-Vázquez, 2000).

Los impactos de cambio climático podrían ser particularmente significativos en los ecosistemas del país. Bajo un escenario de inacción (business-as-usual), incrementos de al menos 2°C en la temperatura anual se rebasarían durante las décadas de 2030 y 2040 en el norte y sur del país, respectivamente. El umbral de 4°C en la temperatura anual, que es considerado como un aumento al cual difícilmente gran parte de los ecosistemas pudieran adaptarse (Adger et al., 2007; IPCC, 2014a), podría alcanzarse tan pronto como el 2070 en algunas regiones del norte de México. Estudios recientes muestran que algunas especies ubicadas en islas mexicanas podrían perder hasta 88% en el caso de mamíferos, 64% en reptiles, mientras que los anfibios podrían tener pérdidas reducidas debido a la aparición de nuevas áreas climáticas favorables para su distribución (Ureta et al., 2018). Trejo et al. (2011) estudian los efectos de cambio climático sobre la biodiversidad en México y muestran que para el 2050 cerca de la mitad de las especies incluidas en el estudio perderán 50% de su área de distribución como resultado de los cambios proyectados en el clima. Resultados similares fueron obtenidos por Gómez et al. (2011) para un grupo de especies forestales seleccionadas que corresponden a zonas climáticas templadas, tropicales y semiáridas de México.

A grandes rasgos, las evaluaciones de impactos realizadas para México confirman los resultados de los primeros estudios realizados en el tema en el país (Gay et al., 2000). Esto se debe en parte a que, si bien las metodologías utilizadas se han ido perfeccionando, no

han sido modificadas de manera sustancial tanto para el caso de la generación de escenarios de cambio climático regionales como para la evaluación de impactos. La evaluación de dichos impactos en sistemas naturales y humanos comúnmente se realiza a través de comparaciones estáticas de uno o más estados futuros (e.g., 2050, 2100) con respecto a un escenario base actual o potencial. Una de las ventajas más importantes de este enfoque es su facilidad de aplicación ya que sólo requiere la estimación de un número reducido de estados de equilibrio del sistema que se está estudiando. Este enfoque se ha utilizado ampliamente en la literatura (e.g., IPCC, 2014; Gay et al., 2000; INE-SEMARNAT, 2009; Trejo et al., 2011; Gómez et al., 2011; Monterroso et al., 2011). Sin embargo, es importante notar que bajo este enfoque el tiempo en sí y las dinámicas temporales están ausentes en las estimaciones, a pesar de que los impactos y cambios que un sistema ha enfrentado en el pasado pueden influir fuertemente la capacidad que el sistema pueda tener para manejar los impactos actuales y futuros. La resiliencia, vulnerabilidad y capacidad de adaptación son función de la trayectoria histórica y del tiempo y esto puede modificar de forma importante la magnitud de los impactos asociados a un estresor particular (ver Estrada et al., 2015).

En este proyecto se exploró la importancia de incluir la persistencia temporal de los impactos del cambio climático en estudios de modelación de distribución de especies. Para esto se utilizó un modelo de nicho ecológico para estimar la distribución potencial bajo condiciones climáticas actuales y para dos escenarios futuros (2050, 2070), bajo el escenario de emisiones RCP4.5. La metodología propuesta se ilustra con los cambios en la distribución de la *Phrynosoma modesta* y un rango de posibles valores de persistencia. Los resultados muestran que la distribución potencial de especies depende fuertemente de los supuestos que se hagan con respecto a la persistencia de los impactos del cambio climático; actualmente, los modelos de distribución de especie asumen que dicha persistencia es cero. Una consecuencia del supuesto de que la persistencia es cero consiste en que la distribución de especies no depende de la tasa ni de la trayectoria de cambio en las variables climáticas relevantes. Si bien actualmente no es posible estimar la persistencia de los impactos del cambio climático en sistemas naturales debido a falta de información suficiente para

hacerlo, los resultados muestran que es deseable incorporarla como un parámetro incierto al evaluar los impactos del cambio climático en distribución de especies.

Planteamiento, metodología y datos

Planteamiento

Los impactos del cambio climático son persistentes en parte por la inercia del sistema climático producida por ejemplo por los tiempos de respuesta de sus componentes y los procesos de retroalimentación de los mismos, así como por los largos tiempos de residencia de muchos de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, y la inercia de los sistemas sociales y económicos. Sin embargo, la respuesta de los sistemas naturales y humanos a los efectos del cambio climático hacen que los impactos tengan su propia persistencia y dinámica. La persistencia y dinámica de dichos impactos está relacionada con la resiliencia y capacidades de adaptación intrínsecas al sistema (Estrada et al., 2015). Estas características determinan la capacidad y tiempo de recuperación del sistema, así como la posibilidad de que experimente cambios permanentes (Holling,1973; Denton et al., 2014; Gunderson, 2000; Tol,1996; Hallegatte, 2014; Fankhauser and Tol, 2005; Dell et al., 2012).

Como se mencionó en la introducción, la mayor parte de los modelos utilizados para evaluar los impactos potenciales del cambio climático se basan en comparaciones estáticas de uno o más estados futuros con respecto a un escenario base actual o potencial. Las estimaciones de impactos resultantes no representan un momento en el tiempo sino la respuesta a cambios en una combinación dada de estados promedio de variables climáticas. Esto es, cuando los resultados de una evaluación de impactos se obtienen utilizando un escenario climático centrado en 2050, los resultados obtenidos a partir del modelo de distribución de especies corresponden en realidad a un cierto cambio en la climatología, por ejemplo un aumento de 3°C, no a un momento en el tiempo en particular: los mismos resultados de cambios en distribución exactamente se hubieran obtenido si el aumento de 3°C en la temperatura hubiera ocurrido en el 2020, en el 2100 o en el 2200. Esta limitación en la

manera común de estimar los efectos del cambio climático es importante por dos razones principales que hacen que las estimaciones sean potencialmente inconsistentes y sesgadas: 1) la tasa de cambio en el clima resulta irrelevante ya que los mismos resultados se obtendrían sin importar en cuanto tiempo estos cambios en el clima ocurren (e.g., 1, 50, 150 años; panel superior de la Figura 1); 2) la trayectoria de las proyecciones de cambio en el clima son irrelevantes ya que los mismos resultados se obtendrían si el cambio de 3°C fuera precedido por un cambio de 5°C o de 1°C. Esto es particularmente en el caso de proyecciones de cambio climático con *overshoot* en las que los cambios en el clima sean mayores en algún momento del siglo que al final del mismo (panel inferior de la Figura 1). Los puntos anteriores ilustran que el ignorar la dinámica de los impactos del cambio climático puede afectar de manera importante los resultados de las evaluaciones que se realicen y la formulación de recomendaciones de política deseables.

Es importante notar que, en gran parte de los modelos de impacto actuales, incluyendo los enfocados a estimar los cambios en la distribución de especies, el uso de una persistencia igual a cero es un supuesto implícito. Uno de los objetivos de este proyecto es hacerlo explícito y de esta manera aumentar la transparencia dichos modelos. Si bien es difícil saber el nivel de persistencia de los impactos del cambio climático sobre sistemas naturales y humanos, investigaciones sobre la dinámica de la resiliencia en dichos sistemas (y de la adaptación en sistemas humanos) sugiere que los impactos del cambio climático estén caracterizados por persistencia y que los impactos actuales estén determinados en parte por los impactos previos (e.g., Denton et al., 2014; Holling, 1973; IPCC, 2014). La falta de persistencia en los modelos de impacto es una suposición extrema sobre la memoria de estos sistemas. Sin importar el tamaño del impacto, este supuesto implica que, en el siguiente paso de tiempo, el sistema se ha recuperado totalmente y que ya regresó a su estado original. Esto puede interpretarse como una resiliencia ilimitada a cualquier impacto del cambio climático y una recuperación inmediata; en el caso de sistemas humanos, implicaría además una capacidad de adaptación reactiva extremadamente grande y efectiva, autónoma, y sin costo (Estrada et al., 2015).

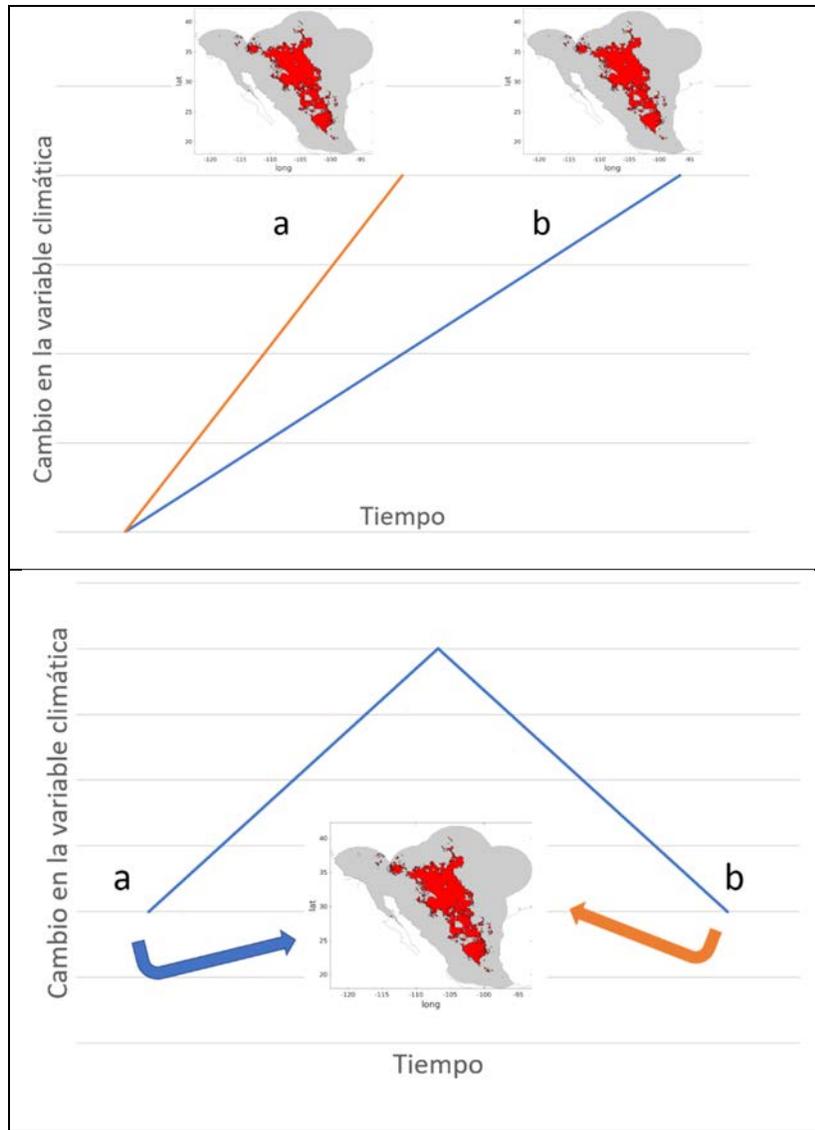


Figura 1. Representación esquemática de algunas de las implicaciones de modelos que no toman en cuenta la persistencia de los impactos. El panel superior ilustra que, en dichos modelos, tanto una trayectoria con una tasa de cambio alta (trayectoria a) como una pequeña (trayectoria b) en la variable climática determinante, los impactos proyectados serían idénticos. El panel b) ilustra que, debido a la falta de persistencia, los mismos resultados se obtendrían en el caso del punto inicial (a) de la variable climática determinante que en el punto (b), en el cual el sistema estuvo previamente expuesto a cambios mayores en el clima.

Metodología y datos

Para mostrar los efectos de incluir persistencia en los impactos del cambio climático en las evaluaciones de distribución de especies, en este proyecto se utilizó un modelo de nicho ecológico y una variación del enfoque propuesto por Estrada et al. (2015) para representar los efectos de distintos niveles de persistencia en los impactos del cambio climático.

El modelo de nicho utilizado fue el Maxent (Phillips et al., 2017, 2006) que es un modelo de distribución de especies basado en los registros de ocurrencia y en los datos de variables ambientales tales como temperatura y precipitación en la zona de estudio. Este modelo estima la distribución de una especie a través de encontrar la distribución que tiene máxima entropía, sujeto a un conjunto de restricciones dadas por las condiciones ambientales registradas en las zonas de ocurrencia (Phillips et al., 2017). Para los resultados de este estudio se modeló la distribución del *Phrynosoma modestum*, que es una lagartija cornuda, que se encuentra registrada en la Lista Roja de Especies Amenazadas del International Union for Conservation of Nature (IUCN) como especie de preocupación menor. El rango geográfico actual de esta lagartija se extiende desde Arizona, Nuevo México, y Dallas hasta San Luis Potosí y el Estado de México (Figura 2). Su rango de elevación se extiende desde los 210 hasta los 2,200 metros sobre el nivel medio del mar. Se considera que esta especie es muy abundante y que su área de distribución y tamaño de población son probablemente estables o que disminuyen a tasas muy pequeñas (IUCN, 2007)¹.

¹ <http://www.iucnredlist.org/details/64078/0>

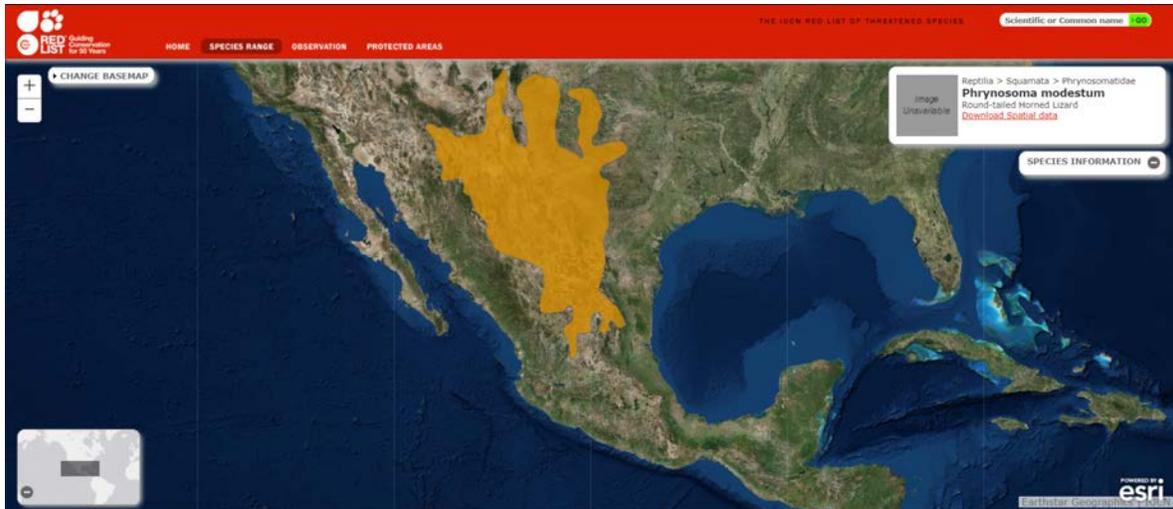


Figura 2. Rango de distribución geográfico de *Phrynosoma modestum*. Fuente: The IUCN Red List of Threatened Species 2007 (<http://maps.iucnredlist.org/map.html?id=64078>).

Los registros observados de dicha especie se obtuvieron del Global Biodiversity Information Facility (GBIF; <https://www.gbif.org/>). Se utilizaron las capas bioclimáticas de WorldClim (Hijmans et al., 2005)² que cuentan con una resolución espacial de 1 km². Para proyectar la distribución geográfica de la especie bajo condiciones de cambio climático se utilizó el modelo de clima CCSM4 y el escenario de emisiones RCP4.5 (disponibles en http://www.worldclim.org/cmip5_30s). El modelo Maxent se corrió para condiciones actuales (distribución potencial actual) y para dos horizontes de tiempo (2050 y 2070). Los resultados se interpolaron linealmente a una resolución anual que cubre el periodo 2001-2100.

Siguiendo lo propuesto en Estrada et al. (2015), se aproximó la persistencia de los impactos del cambio climático mediante una función de memoria de primer orden de la forma:

$$\omega_{i,j,t} = \phi\omega_{i,j,t-1} + \eta_{i,j,t}$$

en donde $\omega_{i,j,t}$ es la probabilidad de presencia de la especie en el punto i,j y el tiempo t , ϕ es un parámetro de memoria y $\eta_{i,j,t}$ es el cambio en la probabilidad de presencia proyectado con base en las condiciones climáticas existentes en el tiempo t y punto i,j . Dado

² <http://www.worldclim.org/>

que el valor de ϕ es desconocido y no se cuenta con información suficiente para estimarlo, el objetivo de este trabajo es ilustrar que si el supuesto injustificado de cero persistencia se relaja, las proyecciones pueden ser marcadamente diferentes. $\eta_{i,j,t}$ se obtiene restando las probabilidades correspondientes a la distribución potencial actual de las proyectadas bajo condiciones climáticas futuras. El umbral para determinar presencia de la especie se fijó en una probabilidad de 0.325: valores por encima de este valor indican presencia de la especie. Es importante notar que $\phi = 0$ representa el caso de las proyecciones originales del modelo de nicho ecológico en el que los impactos ocurridos en el tiempo t se disipan totalmente en el tiempo $t+1$ (resiliencia ilimitada), y $\phi = 1$ en el cual los impactos del cambio climático jamás se disipan y cada shock representa un cambio permanente en la probabilidad de presencia de la especie. La Figura 3 ilustra el tiempo que se tarda en disiparse un shock unitario dependiendo del valor del parámetro ϕ . Como se muestra en dicha figura, la dinámica de los efectos de un shock y el tiempo que tarda en disiparse son muy distintos dependiendo del valor de ϕ : para $\phi = 0$ el shock se disipa inmediatamente y sólo tiene efecto en el periodo en el que ocurrió, lo que implica que el sistema se encuentra totalmente recuperado en el siguiente periodo; para valores de ϕ mayores que cero, el tiempo en el que el sistema se recobra de los efectos del shock aumenta, siendo que por ejemplo para $\phi = 0.5$ al sistema le toma alrededor de 7 años para recuperarse totalmente, para $\phi = 0.8$ este tiempo aumenta a alrededor de 20 años y; en el caso de $\phi = 1$ el efecto del shock es permanente y el sistema nunca llega a recuperarse. El impacto acumulado (impacto de largo plazo) causado por un shock unitario está dado por $1/(1 - \phi)$, para valores menores que 1. Esto implica que, si la persistencia es distinta de cero, los impactos de largo plazo de un shock unitario pueden ser considerablemente mayores que aquellos que se registren de manera contemporánea. En el caso de $\phi = 0.5$ el impacto de largo plazo será dos veces aquel del shock original; en el caso de $\phi = 0.9$ el impacto de largo plazo es 10. De esta forma, la omisión de la persistencia puede sesgar la evaluación de impactos de manera importante, sobre todo en evaluaciones que consideren periodos largos de tiempo, como es el caso del cambio climático.

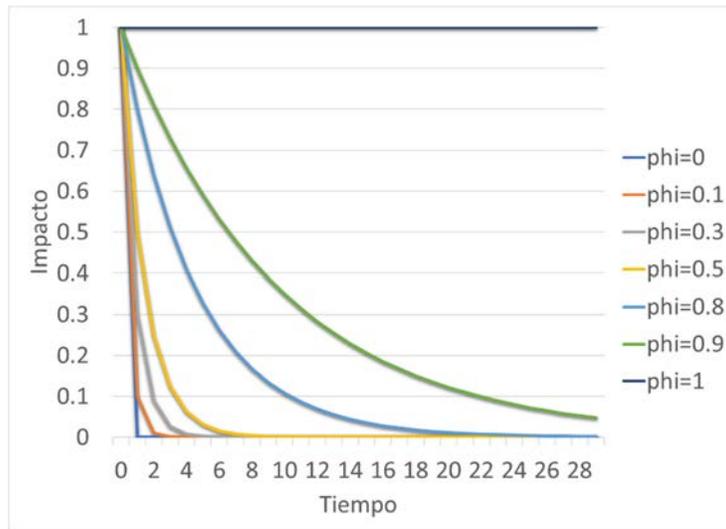
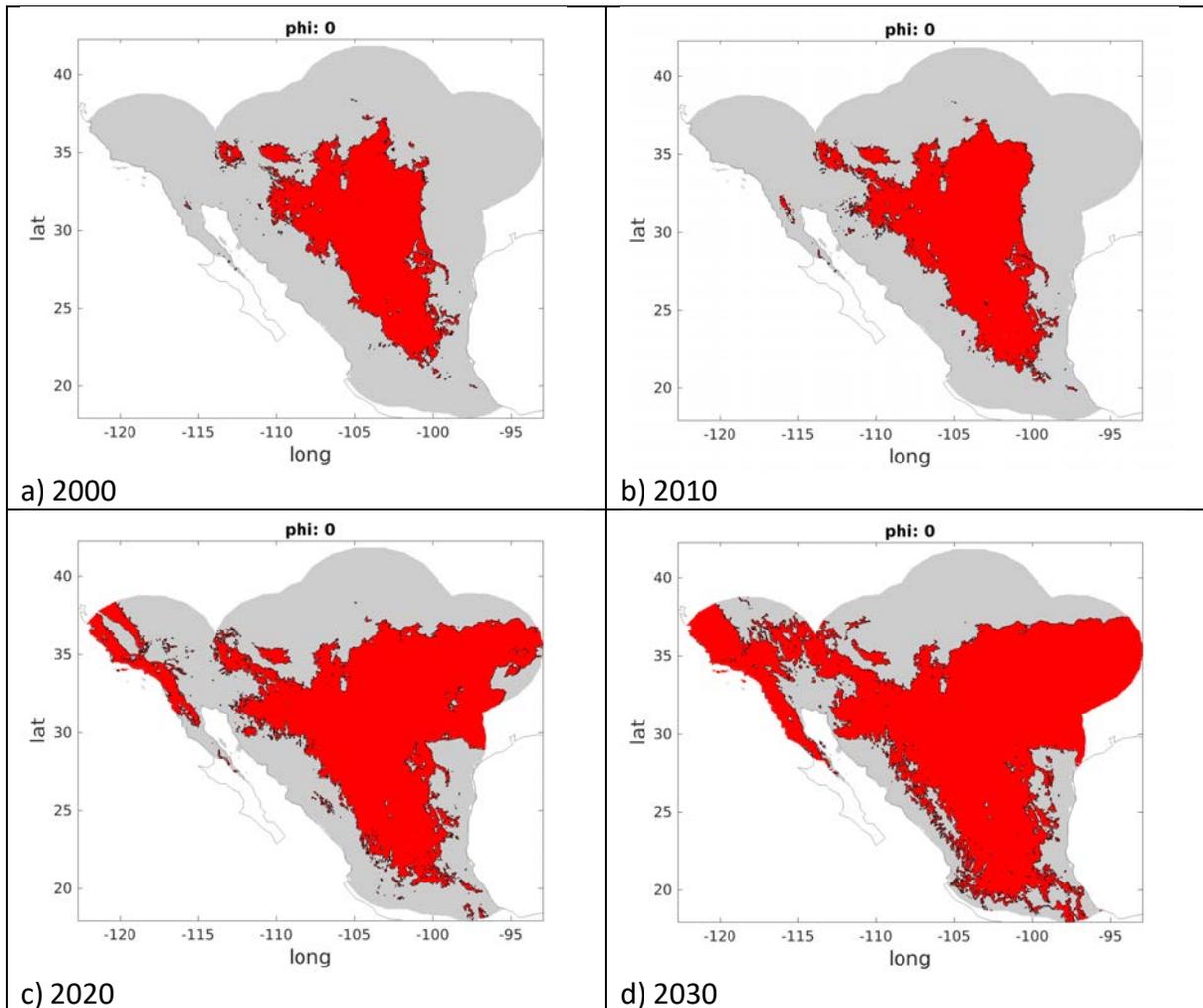
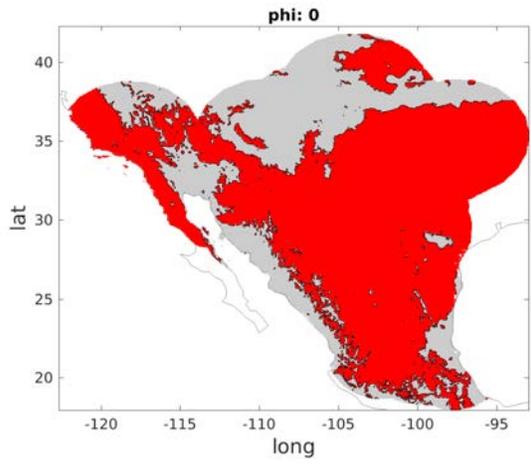


Figura 3. Impulso respuesta de un shock unitario para distintos valores del parámetro ϕ .

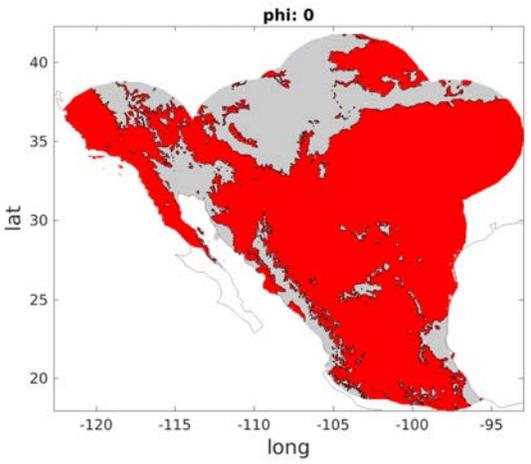
Resultados y discusión

La Figura 4 muestra la distribución potencial del *Phrynosoma modestum* por década durante el periodo 2000-2100, bajo el escenario de emisiones RCP4.5 y sin tomar en cuenta la persistencia ($\phi = 0$). Como se observa en la Figura 4b, el modelo utilizado logra reflejar cercanamente la distribución observada (Figura 2). Durante la primera mitad del presente siglo, los cambios en el clima producen una expansión sostenida en la distribución del *Phrynosoma modestum*, llegando a abarcar casi todo México y el suroeste de Estados Unidos. A partir de esta fecha, el nicho en el que la especie podría ubicarse se reduce rápidamente hasta que, para finales del siglo, el área predicha de ocupación es menor que la actual.

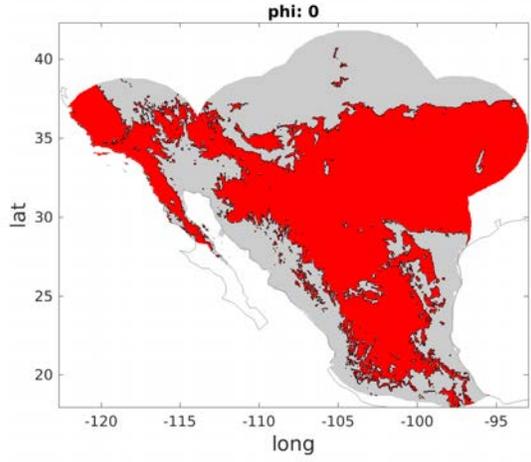




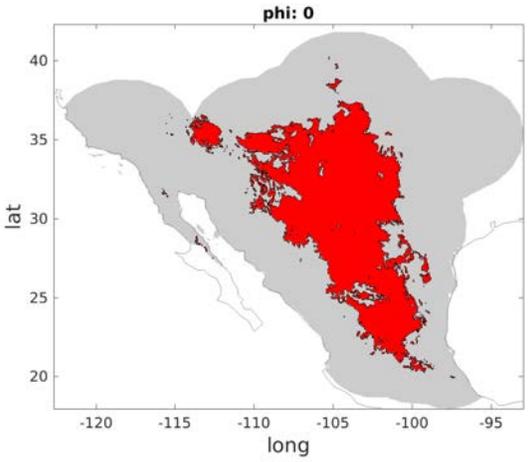
e) 2040



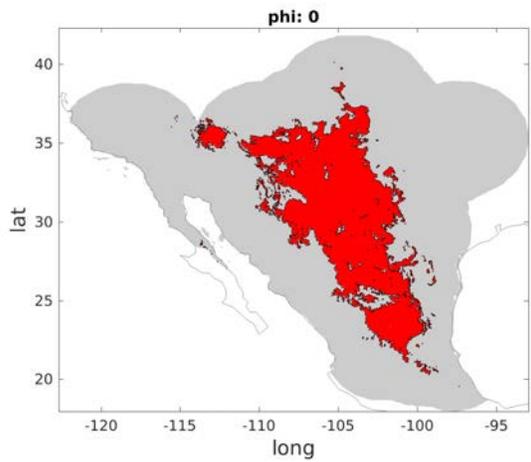
f) 2050



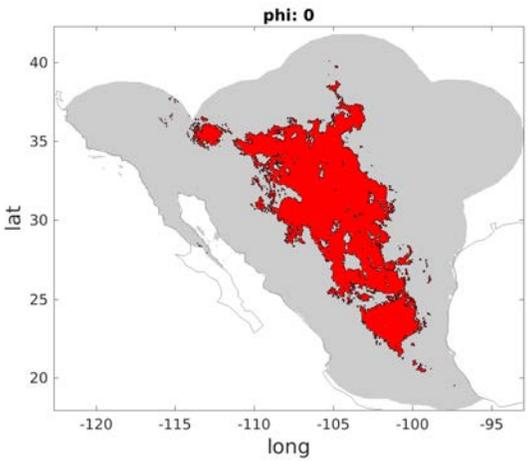
g) 2060



h) 2070



i) 2080



j) 2090

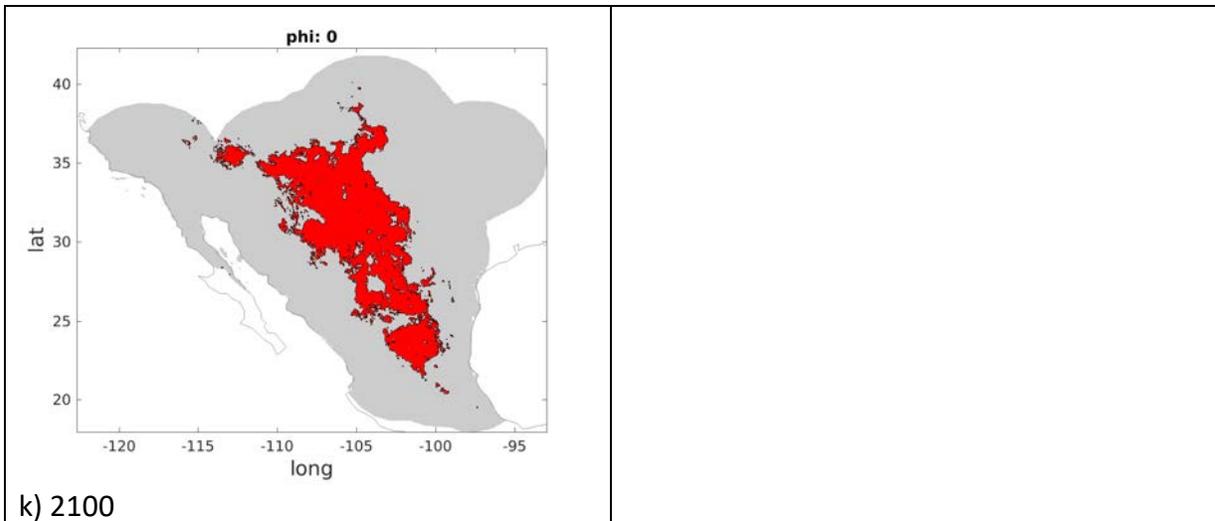
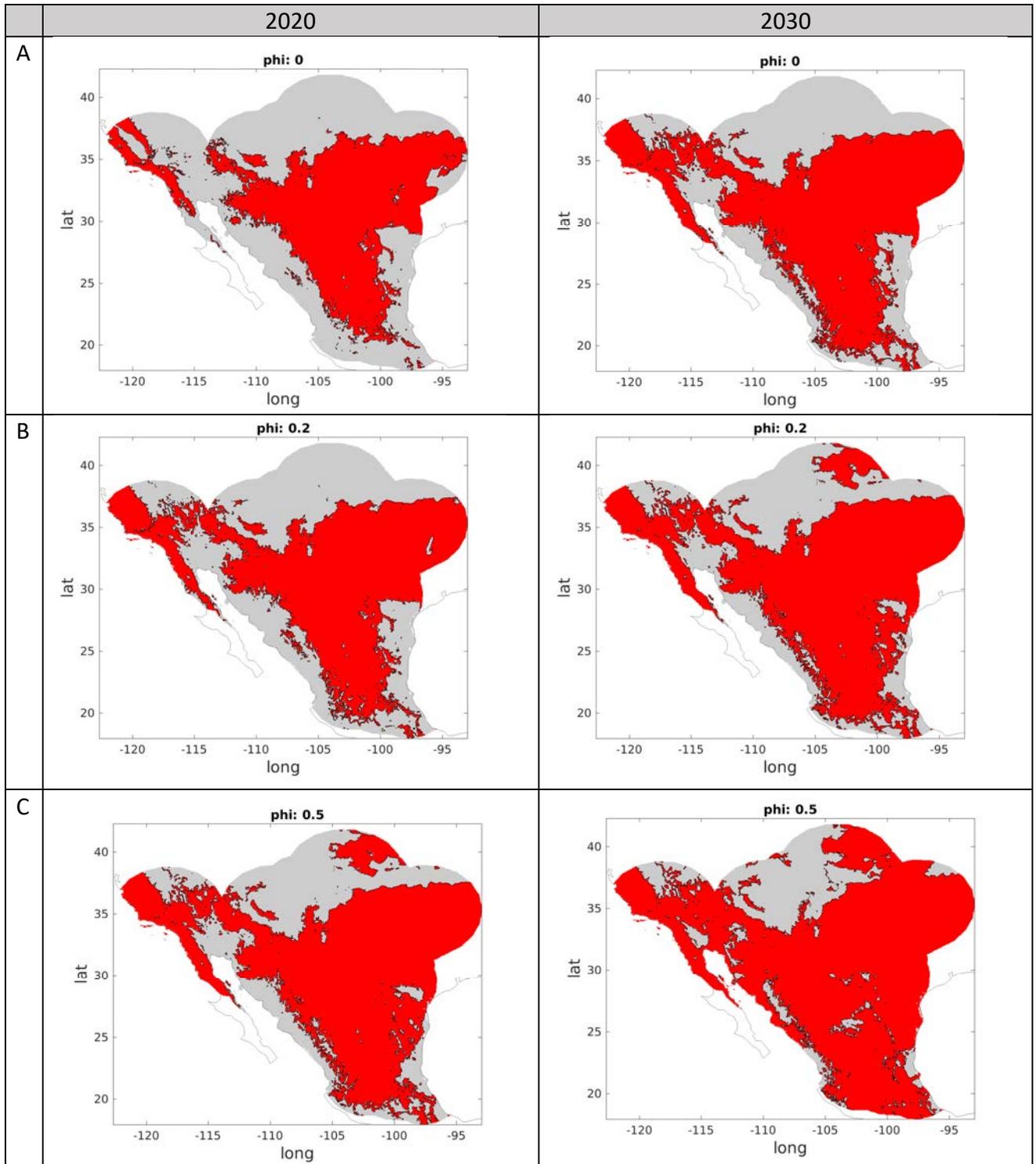


Figura 4. Distribución de *Phrynosoma modestum* por década durante el periodo 2000-2100 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y $\phi = 0$.

Los efectos de la persistencia se ilustran para tres horizontes de tiempo (corto 2020-2030, mediano 2050-2070 y largo 2090-2100 plazos) y cinco valores del parámetro ϕ (0.0, 0.2, 0.5, 0.8 y 0.9). El anexo de este reporte muestra los resultados por década para valores del parámetro ϕ en el intervalo [0, 0.9], con incrementos de 0.1. Este informe también incluye animaciones gif para valores de ϕ igual a 0, 0.1, 0.5 y 0.9.

Inclusive en horizontes temporales cortos (2020-2030), y aún para valores pequeños/moderados del parámetro ϕ , incluir los efectos de la persistencia en los impactos del cambio climático puede modificar de manera notable las predicciones de ocupación de una especie (Figura 5 renglones B y C). Un ejemplo es la parte centro-sur de Estados Unidos, así como partes de Tamaulipas y Veracruz, en donde con una persistencia pequeña (e.g., $\phi = 0.2$) para el 2030 las predicciones apuntarían a la presencia de la especie, contradiciendo las estimaciones originales (Figura 5 renglón B). Para valores más altos de ϕ , en el corto plazo (Figura 5 renglones C, D y E), en general el área que la especie podría ocupar aumenta. La interpretación de este resultado es que en lugares donde cambio climático lleva a condiciones más favorables para la especie en un periodo dado, se producen condiciones propicias para que en los periodos posteriores la especie tenga mayores posibilidades de permanecer o expandir su rango geográfico. En algunas celdas de los mapas proyectados se da el efecto contrario en el que cambio climático en un tiempo t

lleva a condiciones desfavorables y éstas, dado que la resiliencia no se asume perfecta ($\phi > 0$), influyen en pasos de tiempo posteriores la probabilidad de presencia de la especie sea menor.



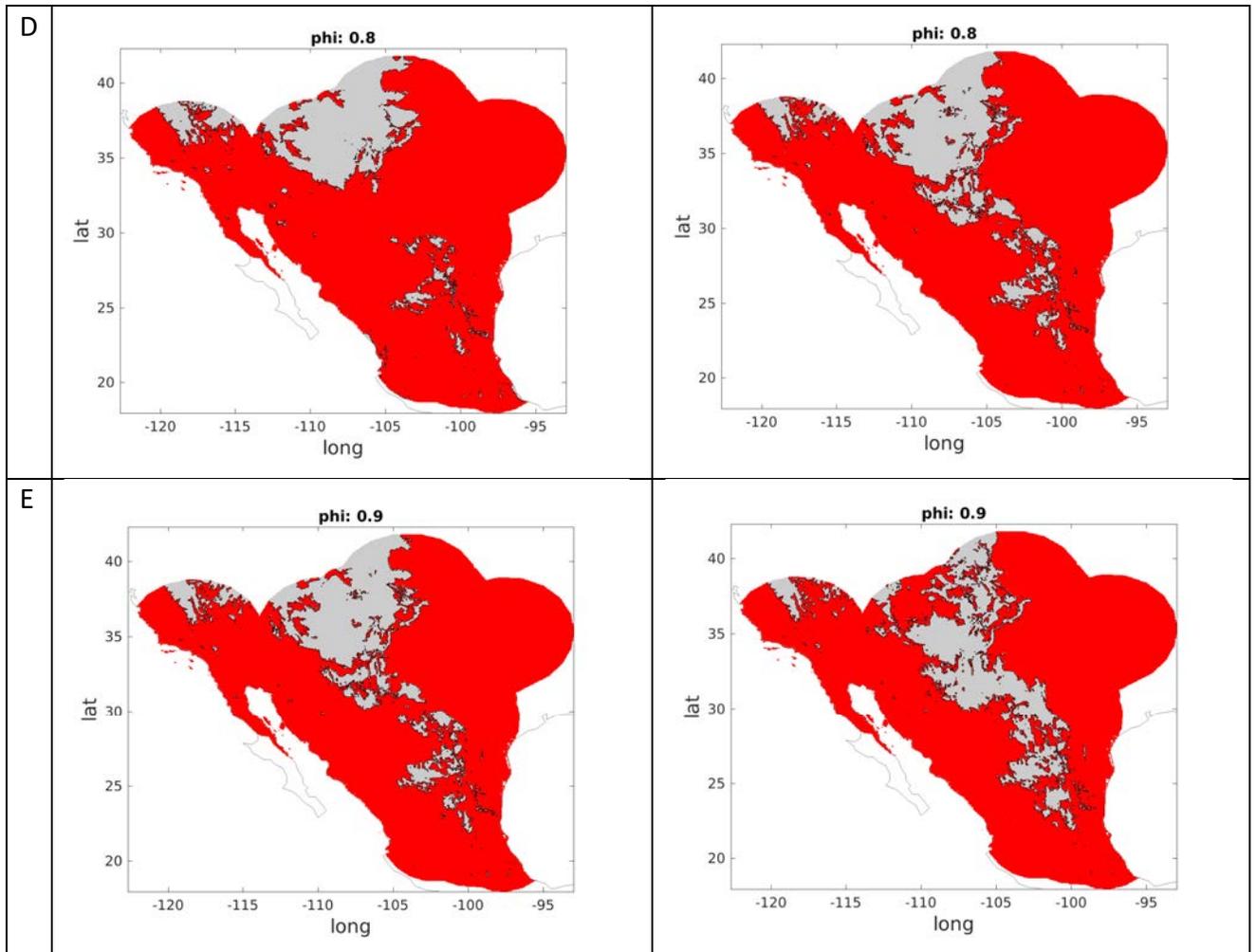
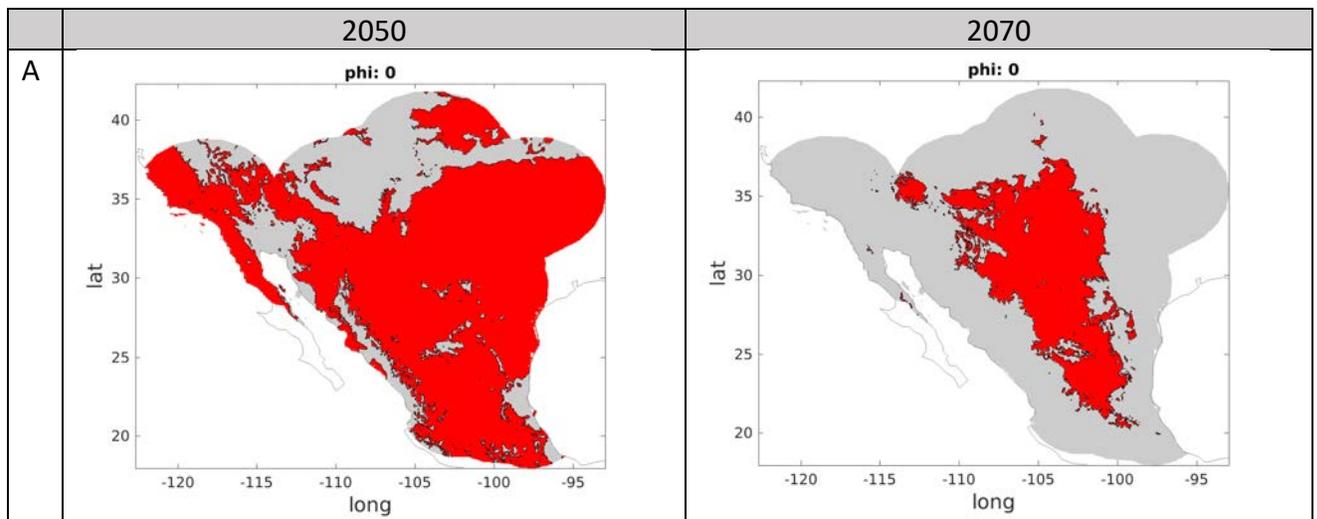


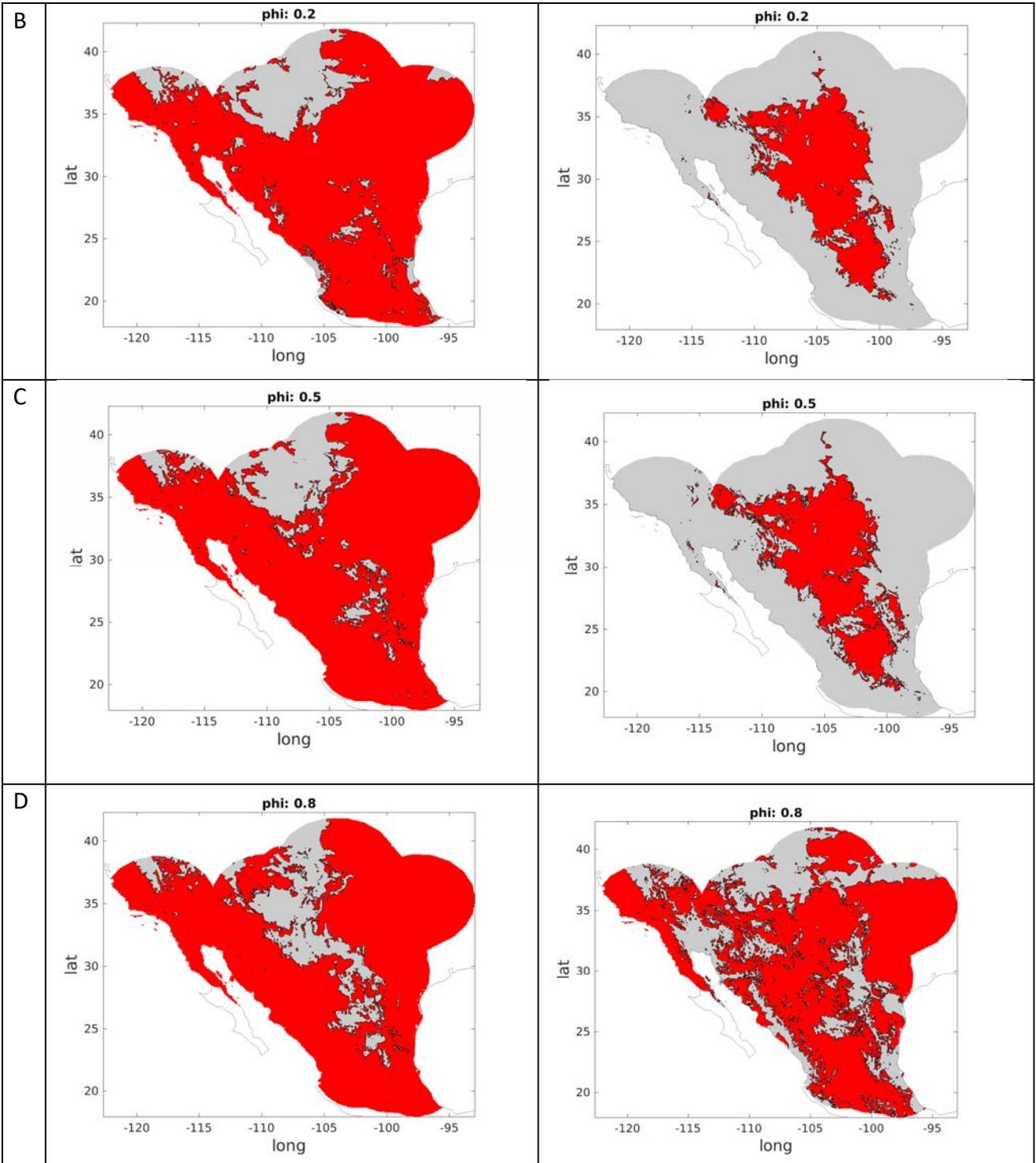
Figura 5. Distribución de *Phrynosoma modestum* para las décadas 2020 (izquierda) y 2030 (derecha), de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5 y el modelo de clima CCSM4. Los renglones A, B, C, D, E muestran la distribución de la especie para valores de ϕ iguales a 0, 0.2, 0.5, 0.8 y 0.9, respectivamente.

Estos efectos son más claramente observables para mediados y finales de siglo (figuras 6 y 7), así como para valores altos del parámetro ϕ (e.g., renglones D y E de las figuras 5, 6 y 7). Un resultado importante es que el relajar el supuesto de resiliencia perfecta muestra que no sólo las áreas de presencia/ausencia podrían estar sub- o sobreestimadas, sino que, debido a la diversidad geográfica en condiciones ambientales, la distribución de la especie podría ser mucho más fragmentada (e.g., Figura 6 izquierda). La subdivisión de un área de distribución previamente continua puede causar mayores problemas para la supervivencia de la especie y se ha identificado como un factor que promueve la extinción local,

particularmente para especies con alta especialización de hábitat y reptiles (Keinath et al., 2017; Turner, 1996). Claramente estas consecuencias de asumir persistencia mayor a cero (i.e., resiliencia limitada) no están presentes en los modelos actuales de distribución de especies y podrían resultar en subestimaciones del riesgo que los escenarios de cambio climático podrían implicar.

El cambio de un patrón general de incremento en el área de distribución proyectado hasta el 2050 a una abrupta reducción en la misma, proveen un ejemplo claro de lo comentado en párrafos anteriores. Para valores altos de persistencia ($\phi = 0.8$; $\phi = 0.9$), la mejora en condiciones climáticas para la distribución de la especie, debidas al cambio climático experimentado durante las décadas anteriores, hace que aun cuando las condiciones climáticas se vuelven desfavorables la especie tenga mayores posibilidades de permanecer por un mayor tiempo. Los renglones D y E de la Figura 6 muestran que, a diferencia de los demás paneles en dicha figura, el rango de distribución geográfica de la especie no disminuye tan abruptamente. Sin embargo, el incremento en la fragmentación del área de distribución potencial de la especie es notable.





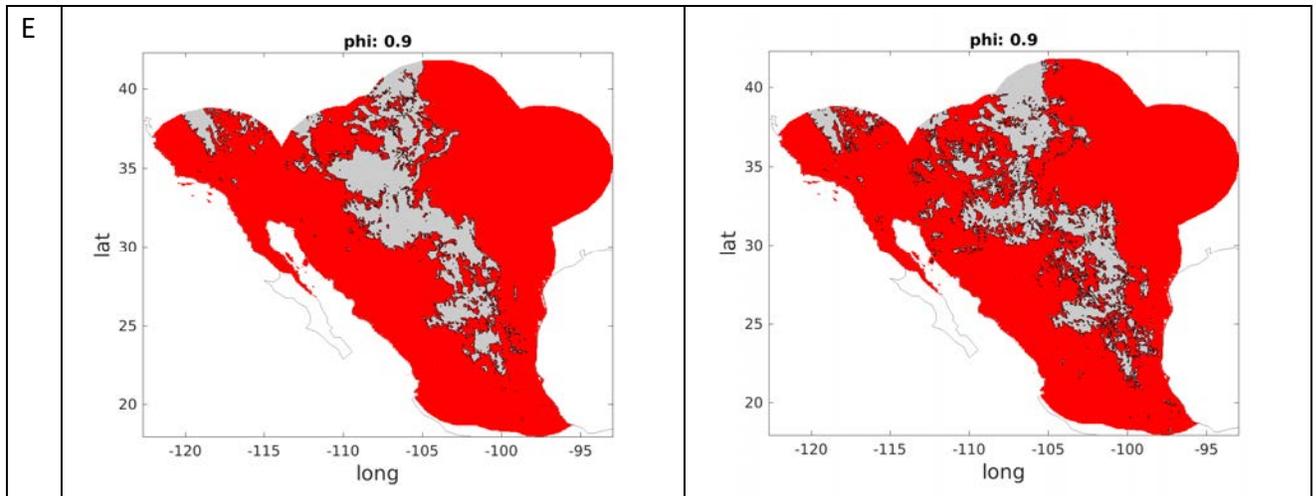
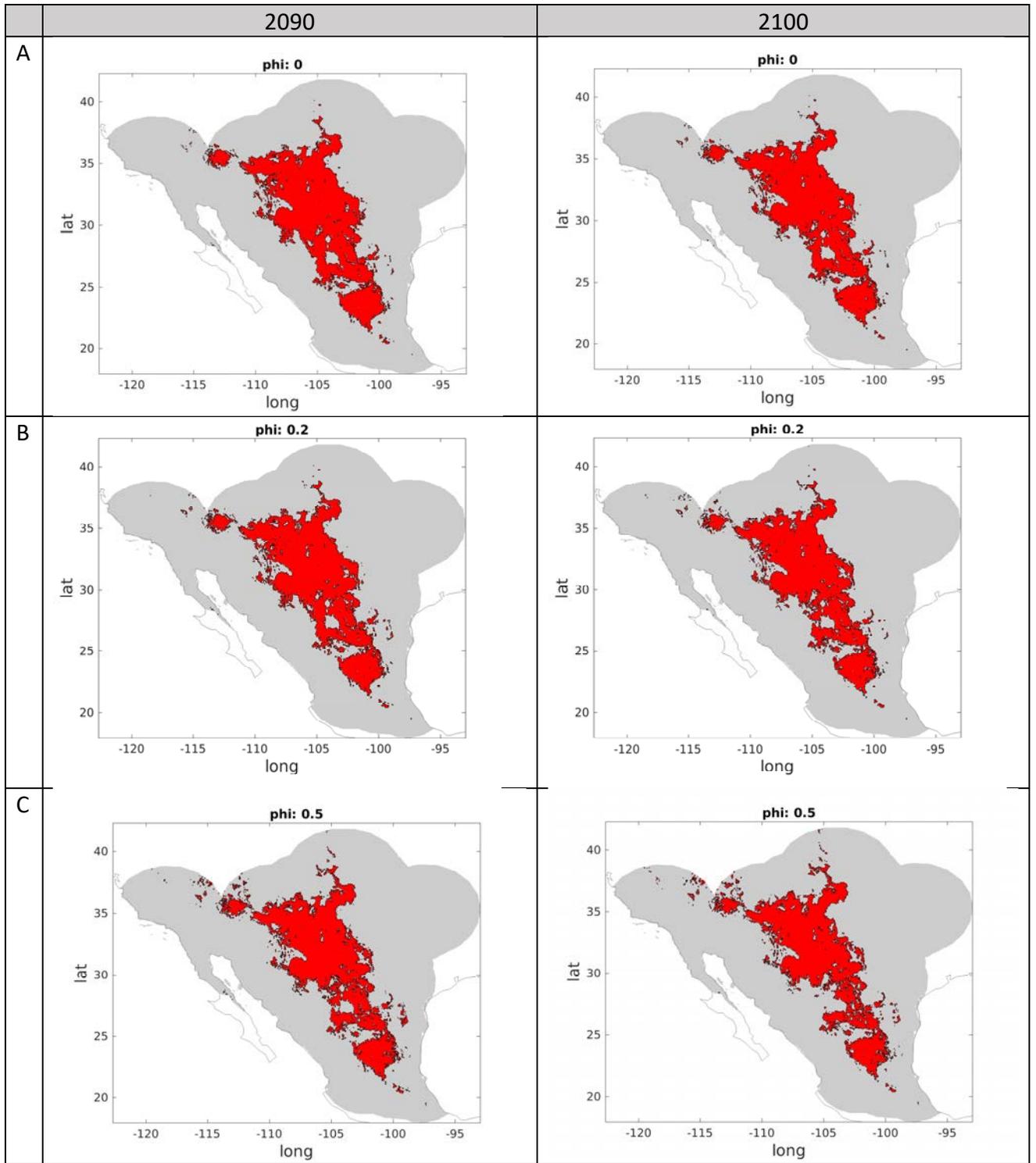


Figura 6. Distribución de *Phrynosoma modestum* para las décadas 2050 (izquierda) y 2070 (derecha), de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5 y el modelo de clima CCSM4. Los renglones A, B, C, D, E muestran la distribución de la especie para valores de ϕ iguales a 0, 0.2, 0.5, 0.8 y 0.9, respectivamente.

Finalmente, las extrapolaciones sugieren que para finales de siglo el área de distribución potencial de *Phrynosoma modestum* se reduciría de manera considerable, llegando a extensiones menores que la actual y con un nivel de fragmentación mucho mayor. Es importante notar que independientemente del nivel de persistencia que se asuma, los resultados para finales del siglo son, en general, similares. En el ejemplo utilizado en este reporte, los efectos de la persistencia de los impactos del cambio climático sobre la distribución potencial de dicha especie reducen ligeramente el área de distribución, pero el efecto más importante es que incrementa el nivel de fragmentación.



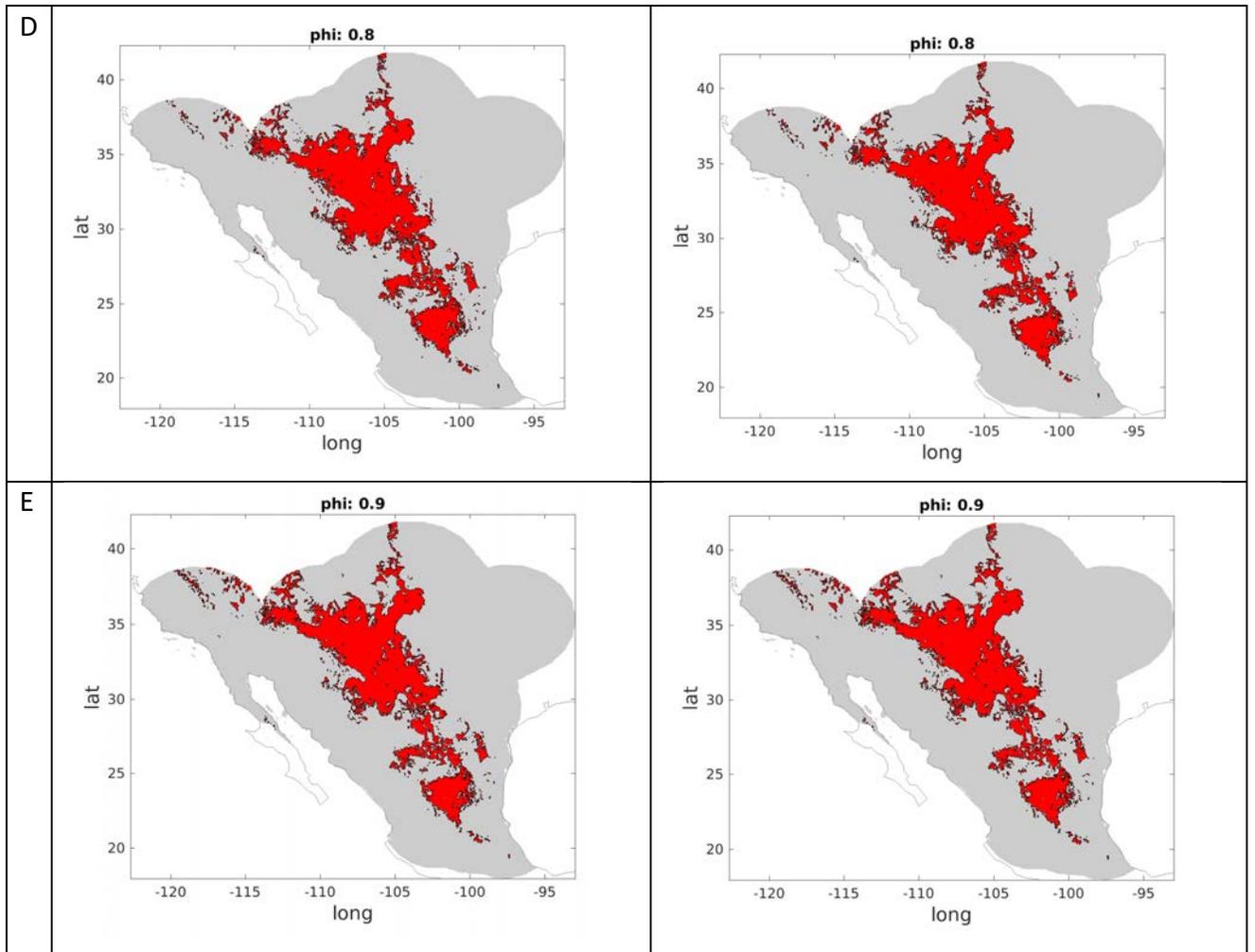


Figura 7. Distribución de *Phrynosoma modestum* para las décadas 2090 (izquierda) y 2100 (derecha), de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5 y el modelo de clima CCSM4. Los renglones A, B, C, D, E muestran la distribución de la especie para valores de ϕ iguales a 0, 0.2, 0.5, 0.8 y 0.9, respectivamente.

Conclusiones

En este proyecto se exploraron los efectos de relajar el supuesto de cero persistencia incluido implícitamente en los modelos utilizados para proyectar el área de distribución de especies bajo condiciones de cambio climático. Para esto se extendió la metodología en Estrada et al. (2015) para hacer el nivel de persistencia un supuesto explícito y de esta manera aumentar la transparencia en estos modelos. Se discute que el nivel de persistencia implica importantes supuestos sobre la capacidad de resiliencia del sistema en estudio: una persistencia de cero puede interpretarse como una resiliencia ilimitada a cualquier impacto del cambio climático. La literatura sobre la dinámica de la resiliencia en sistemas naturales y humanos sugiere que los impactos del cambio climático estén caracterizados por persistencia y en general se puede considerar el supuesto de una persistencia igual a cero como un caso extremo y con poco soporte en la teoría (Denton et al., 2015; Estrada et al., 2015; Holling, 1973; IPCC, 2014). Dado que el nivel de persistencia de los impactos del cambio climático sobre los distintos sistemas naturales y humanos es desconocido, en este reporte se realizaron estimaciones para un amplio rango de posibles valores de persistencia y se analizaron el tipo de consecuencias que este parámetro puede tener en la distribución del *Phrynosoma modestum*.

Las principales consecuencias de omitir propiedades tales como la dinámica que un sistema puede impartir a los impactos del cambio climático son: 1) el área de distribución potencial para un momento en el tiempo t puede estar sub- o sobreestimada, dependiendo de los impactos que ocurrieron en $t-n$ periodos de tiempo anteriores y; 2) los modelos comúnmente utilizados pueden proyectar una distribución potencial de ocupación espacialmente continua. Sin embargo, al relajar el supuesto de cero persistencia, la distribución puede estar caracterizada por altos niveles de fragmentación. Incluso si se asumen niveles bajos o moderados de persistencia, los resultados pueden ser contrastantes con aquellos obtenidos directamente de modelos tradicionales tales como el Maxent.

Este estudio apunta a la necesidad de extender los modelos de distribución de especies para incluir los efectos de la dinámica que los sistemas en estudio pueden impartir a los impactos del cambio climático. Resulta de particular importancia desarrollar modelos empíricos que

permitan estimar rangos de persistencia directamente de los patrones de distribución observados; estas estimaciones permitirán proyectar de mejor manera las consecuencias del cambio climático en sistemas naturales, reducir los rangos de incertidumbre y proveer mejor información para la toma de decisiones.

Referencias

- Denton, F., Wilbanks, T.J., Abeysinghe, A.C., Burton, I., Gao, Q., Lemos, M.C., Masui, T., O'Brien, K.L., Warner, K., Bhadwal, S., Leal, W., Van Ypersele, J.P., Wright, S.B., 2015. Climate-resilient pathways: Adaptation, mitigation, and sustainable development, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D. (Eds.), *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1101–1131. doi:10.1017/CBO9781107415379.025
- Estrada, F., 2018. Estimación de los costos económicos de cambio climático para México a nivel estatal y país bajo distintos escenarios de cambio climático, PNUD-México/INECC. Mexico City.
- Estrada, F., 2016. Análisis de metodologías, variables, requerimientos y justificación del enfoque y modelo para la estimación de los costos económicos del cambio climático. PNUD-México/INECC, Mexico City.
- Estrada, F., Gay, C., Conde, C., 2012. A methodology for the risk assessment of climate variability and change under uncertainty. A case study: Coffee production in Veracruz, Mexico. *Clim. Change* 113, 455–479. doi:10.1007/s10584-011-0353-9
- Estrada, F., Tol, R.S.J., Gay-García, C., 2015. The persistence of shocks in GDP and the estimation of the potential economic costs of climate change. *Environ. Model. Softw.* 69, 155–165. doi:10.1016/j.envsoft.2015.03.010
- Gay, C., 2000. México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Result. los Estud. la vulnerabilidad del país, Coord. por el INE, SEMARNAP, UNAM con el

apoyo del US Ctry. Stud. Program, México.

Gay, C., Estrada, F., Conde, C., Eakin, H., Villers, L., 2006. Potential impacts of climate change on agriculture: A case of study of coffee production in Veracruz, Mexico. *Clim. Change* 79. doi:10.1007/s10584-006-9066-x

Hammerson, G.A., Vazquez Díaz, J., Gadsden, H., Quintero Díaz, G.E., Ponce-Campos, P. & Lavin, P. 2007. *Phrynosoma modestum*. The IUCN Red List of Threatened Species 2007: e.T64078A12734244.

<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2007.RLTS.T64078A12734244.en>. Downloaded on 06 September 2018.

Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A., 2005. VERY HIGH RESOLUTION INTERPOLATED CLIMATE SURFACES FOR GLOBAL LAND AREAS. *Int. J. Climatol.* 25, 1965–1978. doi:10.1002/joc.1276

Holling, C.S., 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 4, 1–23. doi:10.1146/annurev.es.04.110173.000245

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policy Makers, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability - Contributions of the Working Group II to the Fifth Assessment Report.* doi:10.1016/j.renene.2009.11.012

IUCN, 2007. The IUCN Red List of Threatened Species 2007: e.T3746A10048689 [WWW Document]. IUCN Red List Threat. Species 2007 e.T3746A10048689. URL <http://www.iucnredlist.org/details/3746/1>

Keinath, D.A., Doak, D.F., Hodges, K.E., Prugh, L.R., Fagan, W., Sekercioglu, C.H., Buchart, S.H.M., Kauffman, M., 2017. A global analysis of traits predicting species sensitivity to habitat fragmentation. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 26, 115–127. doi:10.1111/geb.12509

Phillips, S.J., Anderson, R.P., Dudík, M., Schapire, R.E., Blair, M.E., 2017. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography (Cop.)*. 40, 887–893. doi:10.1111/ecog.03049

Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E., 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Modell.* 190, 231–259.

Turner, I.M., 1996. Species Loss in Fragments of Tropical Rain Forest: A Review of the Evidence. *J. Appl. Ecol.* 33, 200. doi:10.2307/2404743

Ureta, C., Cuervo-Robayo, A.P., Calixto-Pérez, E., González-Salazar, C., Fuentes-Conde, E., 2018. A first approach to evaluate the vulnerability of islands' vertebrates to climate change in Mexico. *Atmosfera* 31, 221–254. doi:10.20937/ATM.2018.31.03.03

Villers-Ruíz, L., Trejo-Vázquez, I., 2000. El cambio climático y la vegetación en México. *Inst. Geogr. UNAM Sin vol*, 57–68.

Hammerson, G.A., Vazquez Díaz, J., Gadsden, H., Quintero Díaz, G.E., Ponce-Campos, P. & Lavin, P. 2007. *Phrynosoma modestum*. The IUCN Red List of Threatened Species 2007: e.T64078A12734244.

<http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2007.RLTS.T64078A12734244.en>. Downloaded on 06 September 2018.

Anexo

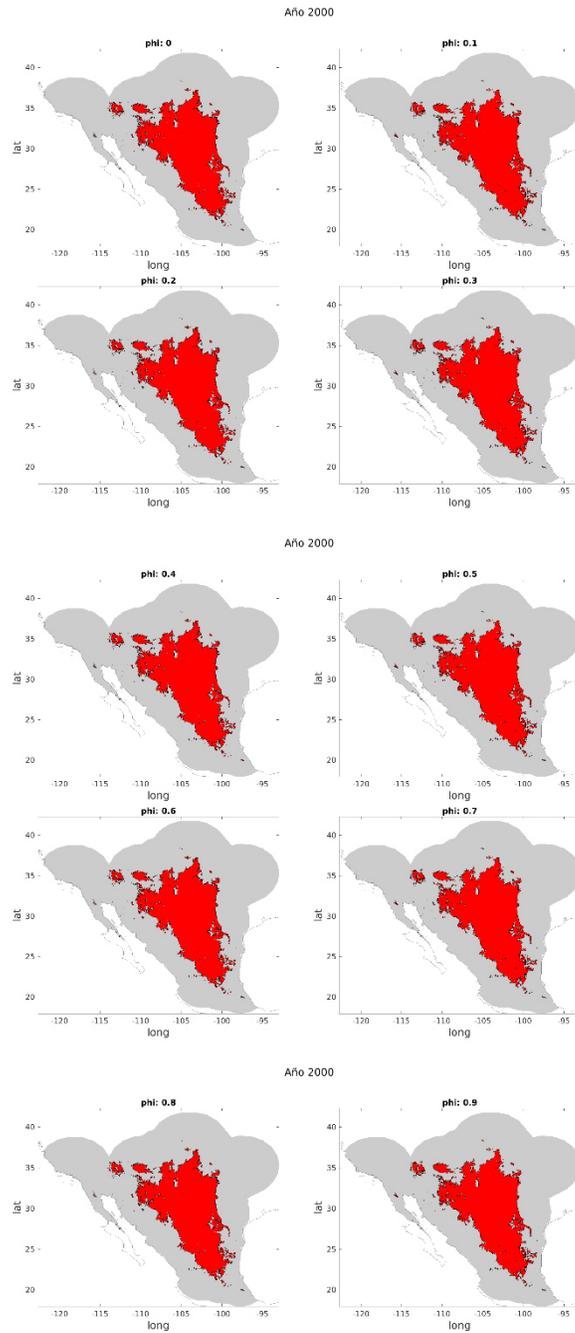


Figura A1. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2000 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

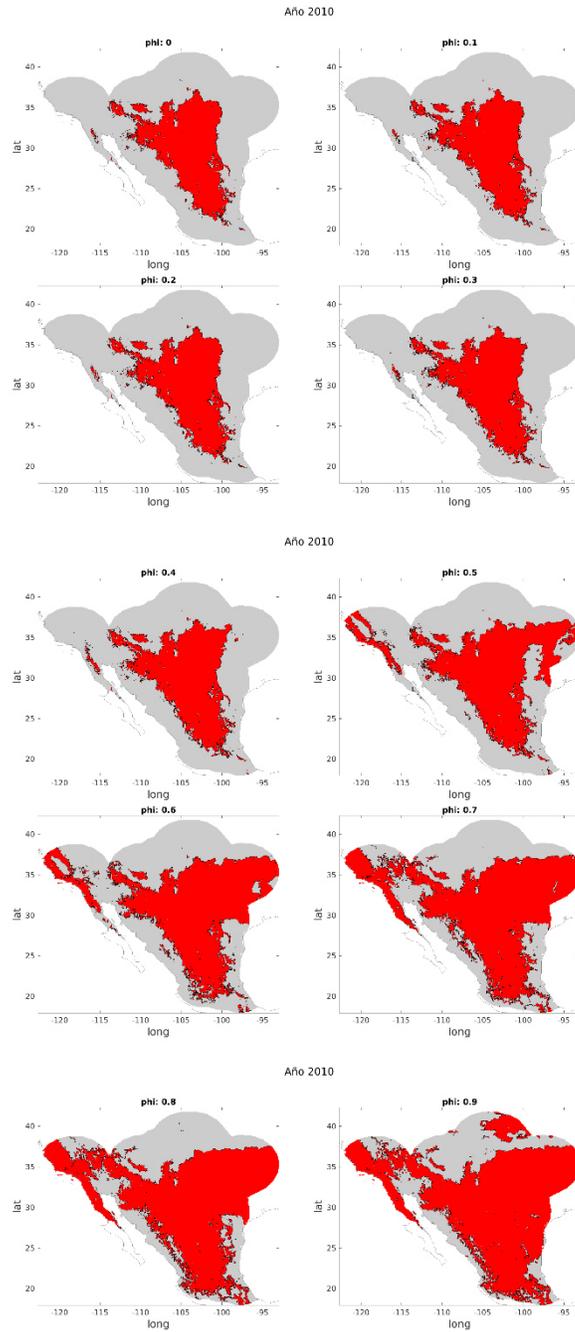


Figura A2. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2010 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

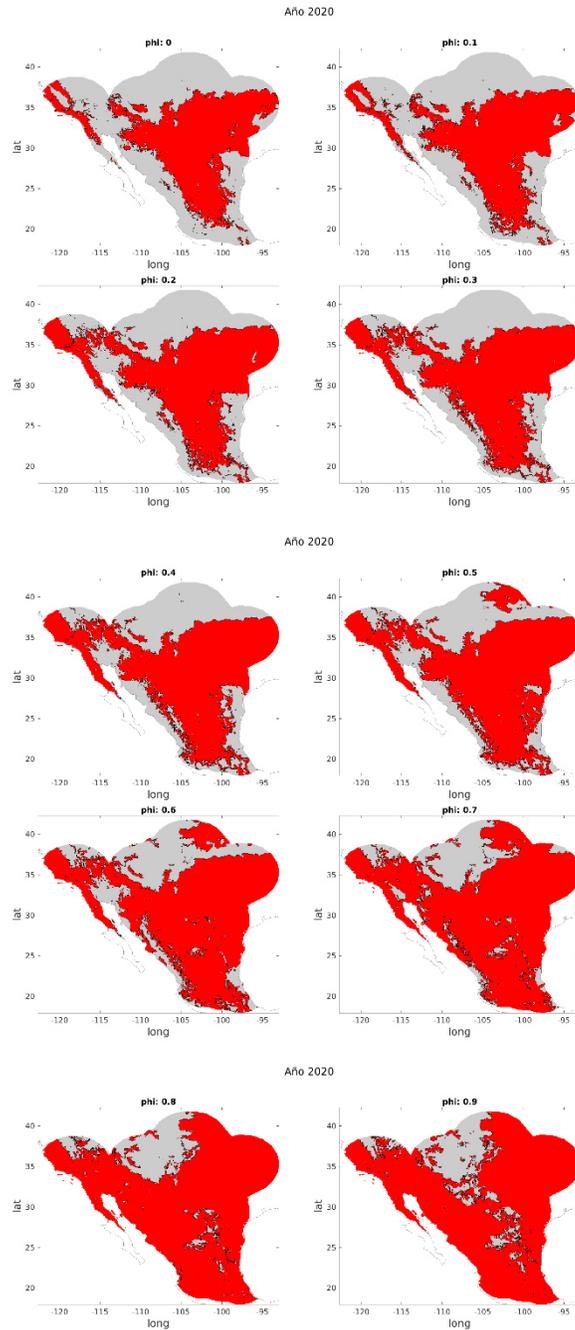


Figura A3. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2020 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

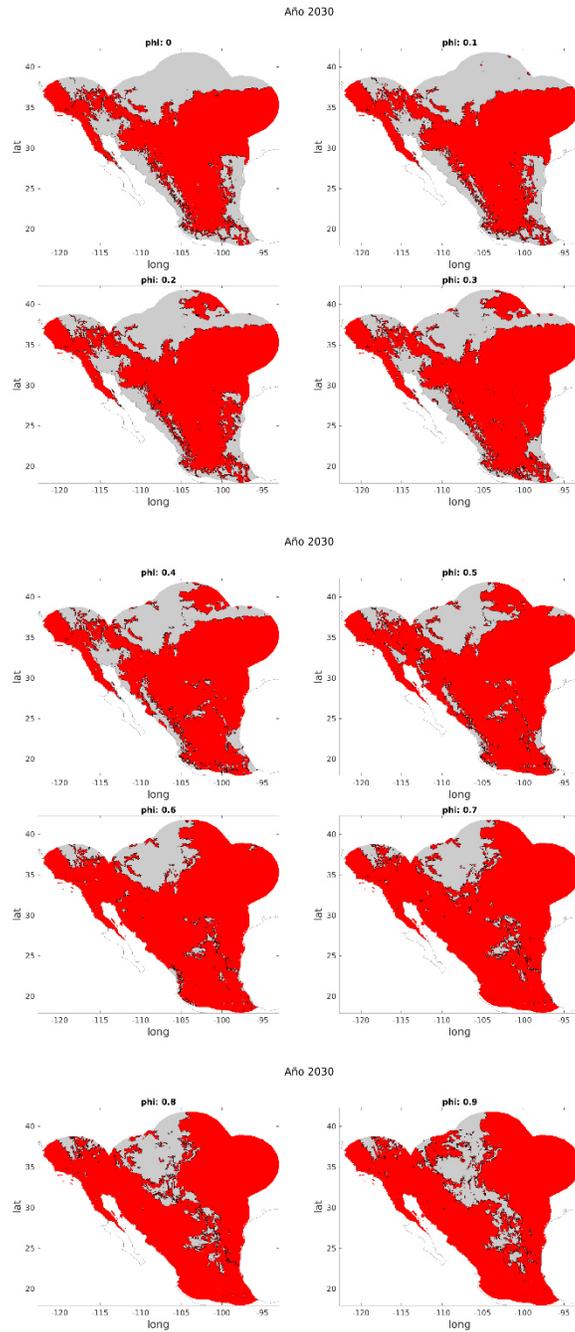


Figura A4. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2030 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

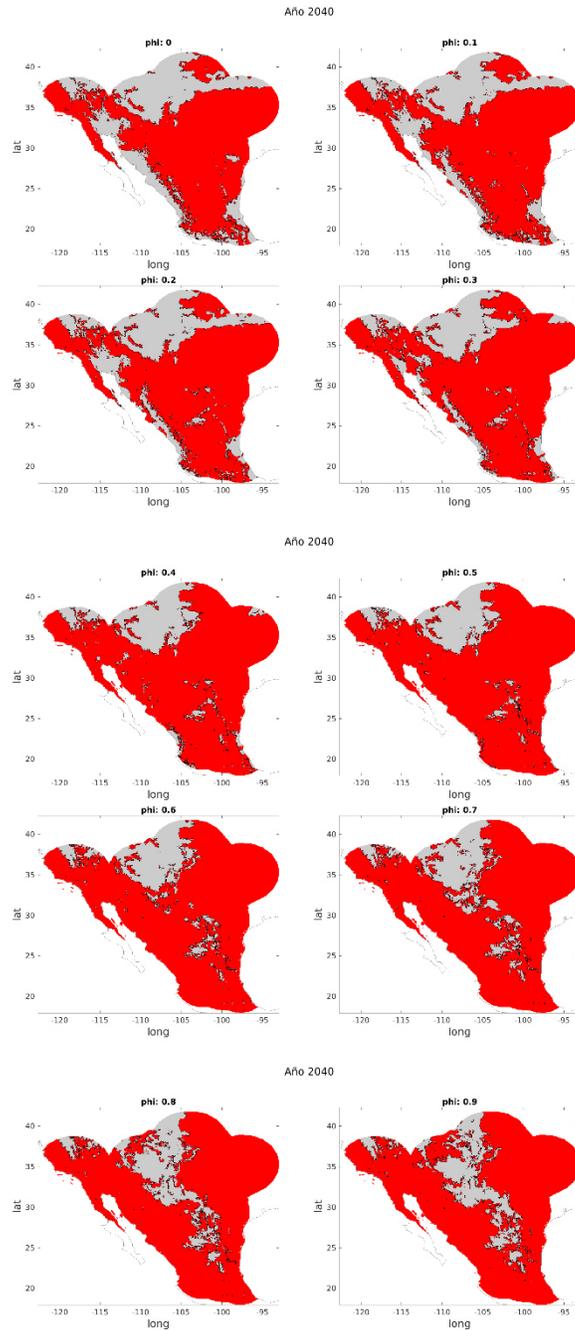


Figura A5. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2040 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

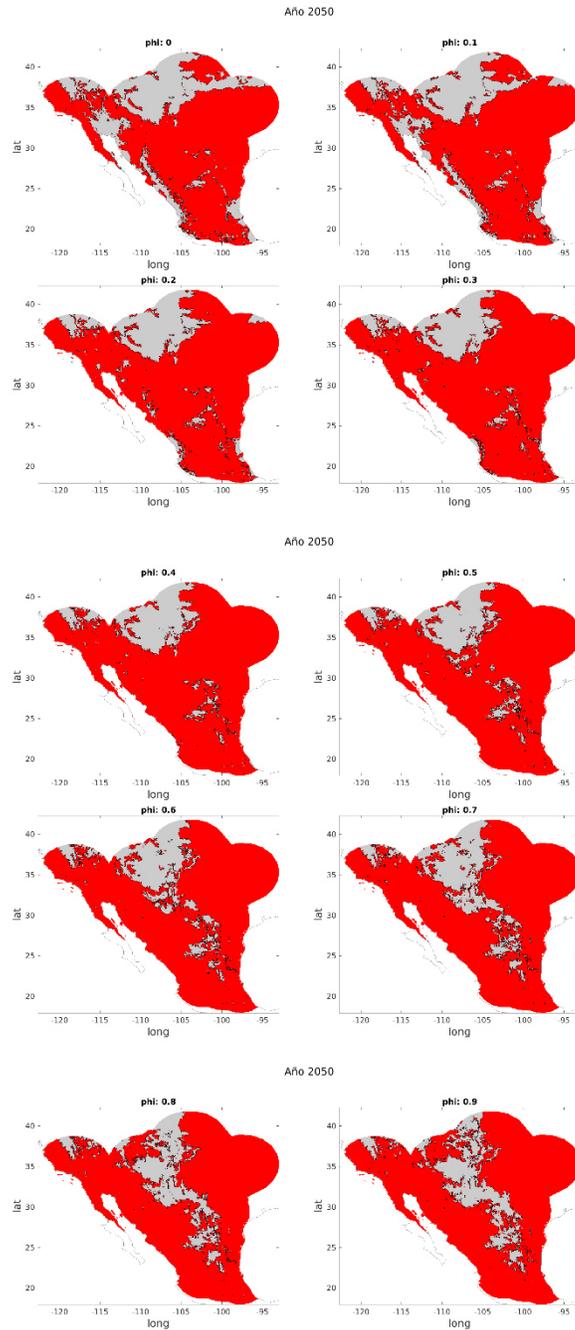


Figura A6. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2050 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

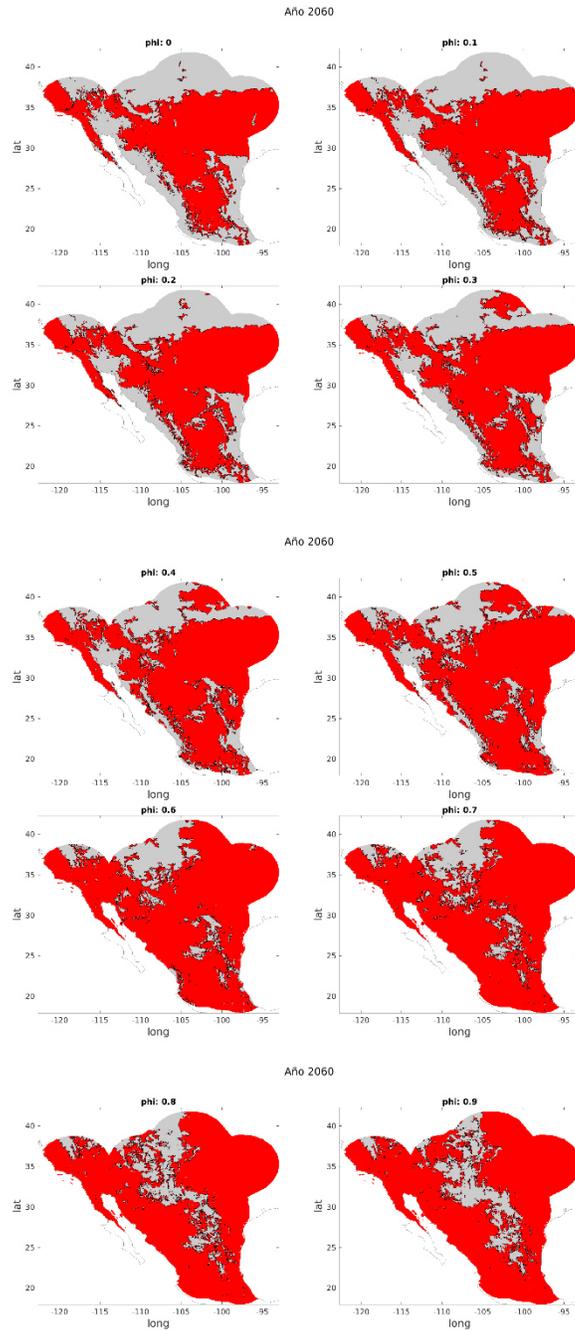


Figura A7. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2060 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

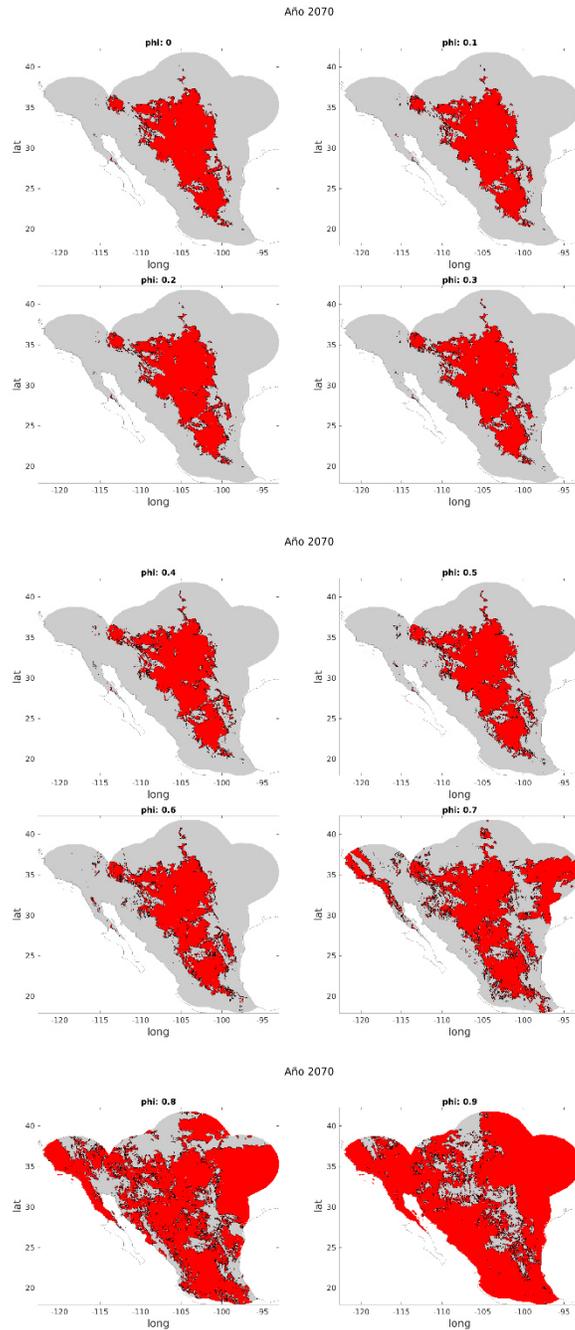


Figura A8. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2070 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

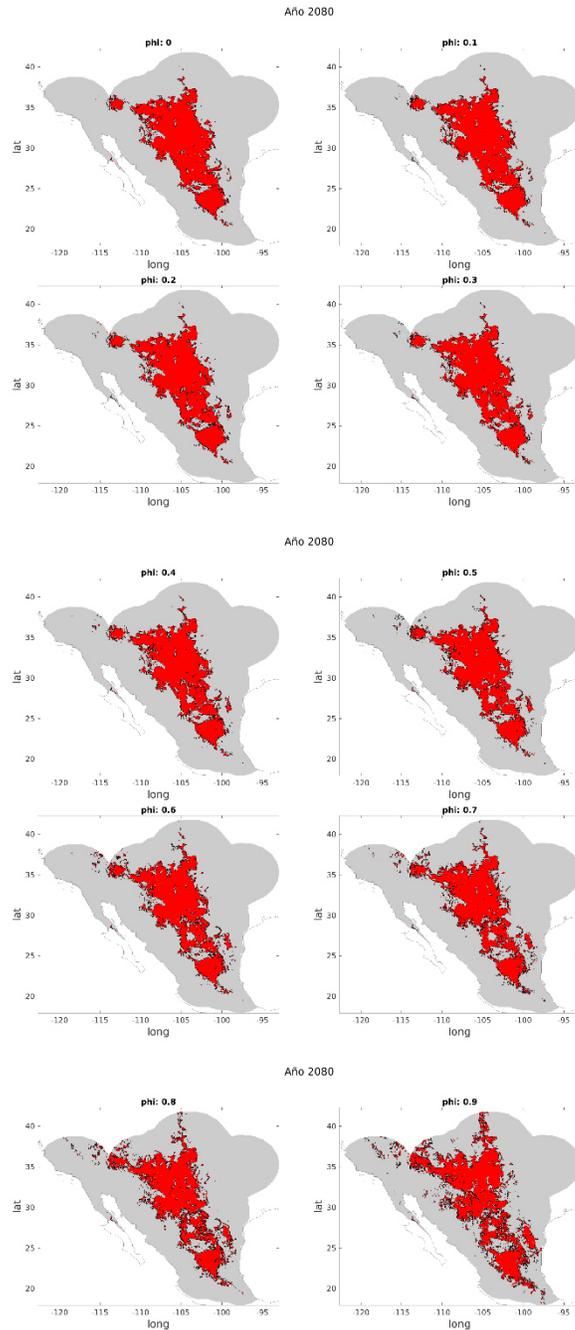


Figura A9. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2080 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

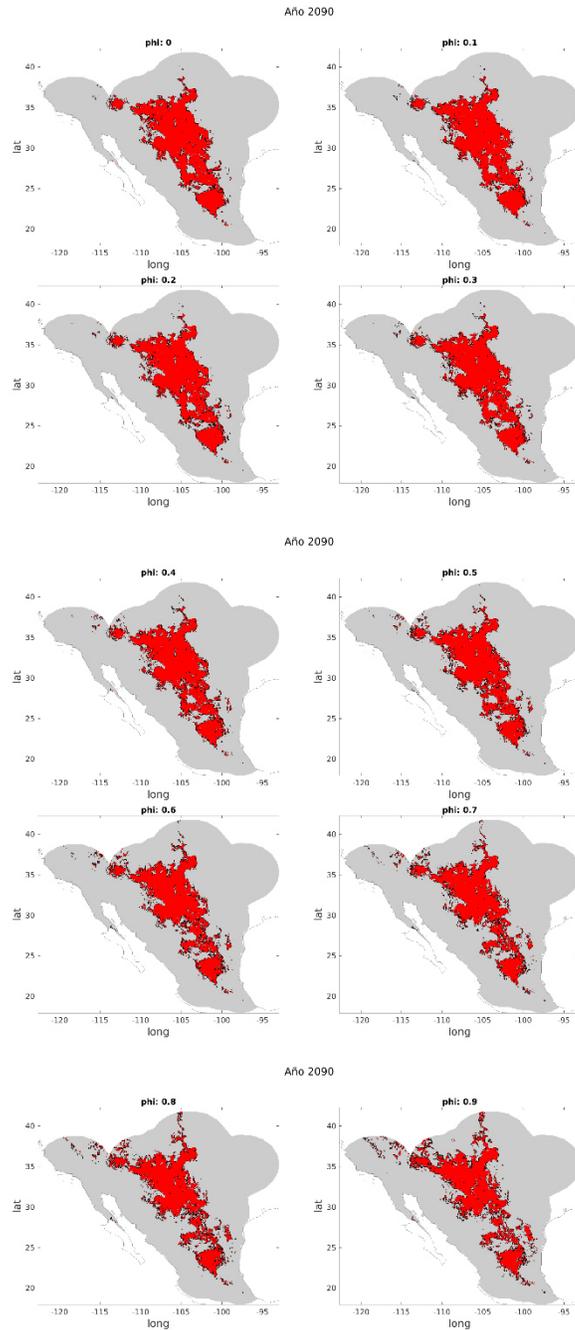


Figura A10. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2090 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.

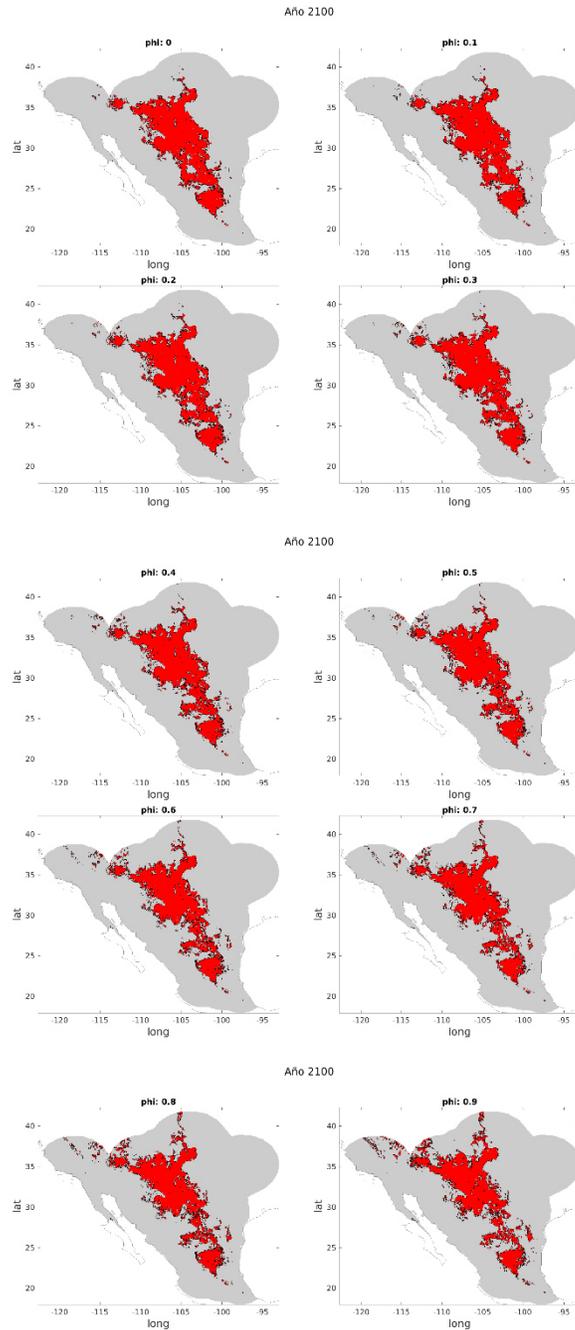


Figura A11. Distribución de *Phrynosoma modestum* en el año 2100 de acuerdo con el escenario de emisiones RCP4.5, el modelo de clima CCSM4 y valores de ϕ entre 0 y 0.9.