

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS MANANTIALES TERMALES DEL NORESTE DE MÉXICO: UNA LÍNEA BASE PARA EL ENTENDIMIENTO DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN SUS ECOSISTEMAS

Jerjes R. Pantoja-Irys^{1*}, Edilia de La Rosa-Manzano², Jean Louis Lacaille-Múzquiz³

¹Corporación Ambiental de México. Texcoco 100, Colonia Satélite Acueducto, 64960 Monterrey, Nuevo León, México.

²Instituto de Ecología Aplicada, Universidad Autónoma de Tamaulipas, División del Golfo 356, Colonia La Libertad, Ciudad Victoria, 87019 Tamaulipas, México

³Centro Interpretativo Ecológico, Camino hacia Alta Cima Km 3, S/N, Gómez Farías, 89790 Tamaulipas, México.

[*jerjes.pantojai@anahuac.mx](mailto:jerjes.pantojai@anahuac.mx)

RESUMEN

El cambio climático es nuestra principal amenaza. El mundo, tal como lo conocemos, se transformará en un futuro muy cercano. Las señales del cambio son cada vez más evidentes, sobre todo para la comunidad científica y quienes mantienen un contacto muy estrecho con la naturaleza. Es urgente generar conocimiento e información para crear y afinar modelos predictivos más reales y precisos; además de vigilar y monitorear parámetros tanto bióticos como abióticos de nuestro entorno, con el fin de adoptar medidas que nos permitan adaptarnos de la mejor manera a los cambios venideros, aprovechando al máximo los recursos renovables disponibles. Hoy más que nunca, tenemos que acercar la investigación científica a la toma de decisiones para la instrumentación de políticas públicas que nos permitan, si aún estamos a tiempo, mitigar el impacto del cambio climático en el mundo y asegurar nuestra supervivencia como especie. El futuro del planeta está en las manos de la generación actual; quizá más adelante ya no habrá otra oportunidad.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se ha vuelto, en este siglo, un tema de conversación y estudio cotidiano entre académicos e investigadores; motivado, en parte, por la gran cantidad de información multitemática disponible, gracias a la revolución tecnológica-científica sin precedente; también por el crecimiento poblacional de los últimos 100 años y el consecuente estrés que genera en el medioambiente. Se ha demostrado científicamente, que la variación del clima terrestre ha motivado, entre otros fenómenos, la migración del hombre y la extinción de megafauna de Norteamérica durante el Cuaternario (Stewart et al., 2021). En el Holoceno diversos registros científicos indican variaciones en temperatura y precipitación relacionados con cambios solares de insolación, saltos latitudinales en la posición promedio de la Zona de Convergencia Latitudinal, variación de la actividad de la Oscilación del Sur de El Niño y de eventos de agua fresca y agua fría en el norte del Atlántico. En Norteamérica condiciones húmedas prevalecieron al inicio de éste y gradualmente cambiaron a poco húmedas como consecuencia de un óptimo

térmico y un monzón débil después (Roy et al., 2019). A pesar de la gran cantidad de datos y conocimiento generado en la última centuria, aún quedan incógnitas por responder en cuanto a las particularidades de los cambios climáticos regionales, la resiliencia de los ecosistemas en cada uno de ellos, el efecto antropogénico y la validez de los modelos regionales y generales ante el cambio climático (Wright et al., 2022). Los modelos actuales proponen posibles modificaciones en la distribución de los ecosistemas; por ejemplo, en el noreste mexicano se anticipa una reducción de los bosques templados y una expansión de los ecosistemas secos como el matorral (Rocha-Ugalde et al., 2022).



Figura 1. Manantiales del Flanco Oriental de la Sierra Madre Oriental. A) Potrero del Prieto; B) Mainero Azufroso; C) Ojo Caliente, D) Taninul, E) El Bañito.

Un grupo de instituciones públicas y privadas, constituido por Corporación Ambiental de México, Instituto de Ecología Aplicada de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Posgrado de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México han unido esfuerzos para plantear estudios multidisciplinarios que permitan entender y atender el efecto del cambio climático en los ecosistemas regionales del noreste mexicano. Después de formular diversas alternativas de investigación, el grupo multidisciplinario, propuso una metodología que integra sus especialidades y que reconoce el ecosistema, la geomorfología, geología y la geoquímica. Inicia mediante el establecimiento de la "línea base" multidisciplinaria de los manantiales de sistemas geotérmicos de baja y media entalpía del noreste de México. El concepto "línea base" se ha utilizado en la investigación científica en la generación de estudios sociales, medioambientales y financieros, entre otros. Se define como la primera identificación, descripción y medición de los indicadores contemplados en el diseño de una investigación; lo que permite conocer el valor de los indicadores al momento de iniciarse las acciones planificadas.

En esta investigación se identificaron 5 manantiales de sistemas geotérmicos de baja y media entalpía en el Flanco Oriental de la Sierra Madre Oriental (Figura 1) y otros 4 manantiales en la Planicie Costera del Golfo de México (Figura 2); distribuidos en un área de 84,577 km² en el noreste de México (Figura 3). La identificación, cartografía, datos físicoquímicos de campo y su descripción general son el componente de este trabajo. Los grupos multidisciplinarios se encargarán, conforme avancen en la investigación, de las publicaciones científicas que coadyuven en la formulación de mejores modelos predictivos del efecto del cambio climático en los ecosistemas del noreste mexicano.



Figura 2. Manantiales de la Planicie Costera del Golfo de México. F) Baño San Ignacio; G) La Azufrosa; H) Poza Verde; I) Rancho Termal.

2. METODOLOGÍA

Los sistemas geotérmicos de baja y media entalpía, con surgencias en el noreste mexicano, fueron cartografiados en un sistema de información geográfica mediante una búsqueda bibliográfica, entrevistas con ecologistas e investigadores que conocen la región y la visita a cada una de las localidades identificadas. Es importante resaltar que se visitaron más de las 9 surgencias aquí reportadas; sin embargo, únicamente las enlistadas en la Tabla 1 fueron seleccionadas por sus características excepcionales en el área de estudio.

ID	Coordenadas Geográficas (UTM)		Altitud m s.n.m.	Caudal L/s	Uso	Estado	Cuenca hidrológica	Acuífero	Formación Geológica
	E	N							
Taninul (mTA)	511344	2425851	64	12.88	Recreativo	San Luis Potosí	Río Tamuín	Tamuín	El Abra
Baño San Ignacio (mBSI)	466209	2749952	248	~5	Reserva Natural	Nuevo León	Río San Fernando	Citrícola Sur	San Felipe
Balneario El Bañito (mBEB)	505000	2423405	55	2.58	Recreativo	San Luis Potosí	Río Tamuín	Huaste-ca Potosina	San Felipe
Ojo Caliente (mOC)	490339	2612313	364	Estático	Ganadería y agricultura	Tamaulipas	Río Soto La Marina	Victoria-Casas	San Felipe
Rancho Termal (mRT)	512278	2483556	76	Estático	Ganadería y agricultura	Tamaulipas	Río Tamesí	Llera-Xicoténcatl	Méndez
Poza Verde (mPV)	585512	2543012	199	~0.5	Recreativo	Tamaulipas	Laguna de San Andrés-Laguna Morales	Aldama-Soto La Marina	San Felipe
Potrero del Prieto (mPP)	399671	2748264	1229	15.94	Natural	Nuevo León	Río San Fernando	Citrícola Sur	Tamaulipas Inferior
La Azufrosa (mAz)	543391	2669752	112	Estático	Ganadería y agricultura	Tamaulipas	Río Soto La Marina	Jiménez-Abasolo	Méndez
Mainero Azufroso (mMA)	428458	2713795	715	3	Natural	Tamaulipas	Río Soto La Marina	Soto La Marina	Taraises

Tabla 1. Nomenclatura, ubicación y características generales de los sistemas geotérmicos de baja y media entalpía del noreste mexicano.

El mapa geomorfológico y de ubicación se elaboró utilizando un modelo digital de elevación (MDE) trabajado mediante el programa ArcGIS Pro-2.6.0. Las surgencias de los manantiales y otros rasgos naturales importantes fueron ubicados con equipo GPS Garmin modelo GPSMAP 64sx, montado en estadal con antena GLONASS Garmin. También se utilizó un dron Mavic 3 DJI para acercamientos a los afloramientos en lugares de difícil acceso. En el caso del agua subterránea de los manantiales el pH, la dureza y la temperatura, entre otros parámetros de campo, se obtuvieron con una sonda digital *YSI Professional Plus* modelo *W14S*. Este equipo digital fue calibrado siguiendo las recomendaciones del fabricante.

3. MANANTIALES TERMALES DEL NORESTE MEXICANO

Los sistemas geotérmicos de baja y media entalpía son aquellos cuyos reservorios se encuentran por debajo de los 150°C de temperatura. Limitadas publicaciones existen de los manantiales que surgen en el noreste mexicano; quizá porque estos sistemas geotérmicos no han sido utilizados aún para la generación de energía renovable y su uso actualmente se restringe a fines recreativos, pecuarios o se mantienen en sus condiciones naturales. Los reservorios geotérmicos de estos sistemas, se alojan a profundidad en potentes cuencas sedimentarias fuertemente plegadas y cabalgadas del Jurásico-Paleógeno, del noreste de México. El agua termal que surge de ellos se integra en cuencas hidrológicas en donde se han desarrollado ecosistemas muy variados, tanto por su altitud como por su clima-precipitación. Los sistemas geotérmicos de baja y media entalpía identificados en esta investigación se distribuyen en los estados de Tamaulipas, este de Nuevo León, noreste de San Luis Potosí, norte de Veracruz y forman parte de las provincias del relieve de la República Mexicana (Lugo-Hubp, 1990): a) Sierra Madre Orienta I; b) Planicie del Noreste de México y c) Planicie Costera del Golfo de México. Se integran en 3 provincias geotérmicas de México (Prol-Ledesma y Morán-Zenteno, 2019): I) Provincia Sierra Madre Oriental (CD2-SMOr); II) Norte de la Provincia

Geo-presurizada (GP North); y (III) Provincia de Vulcanismo Intra-placa Oriental (CV1-EIV).

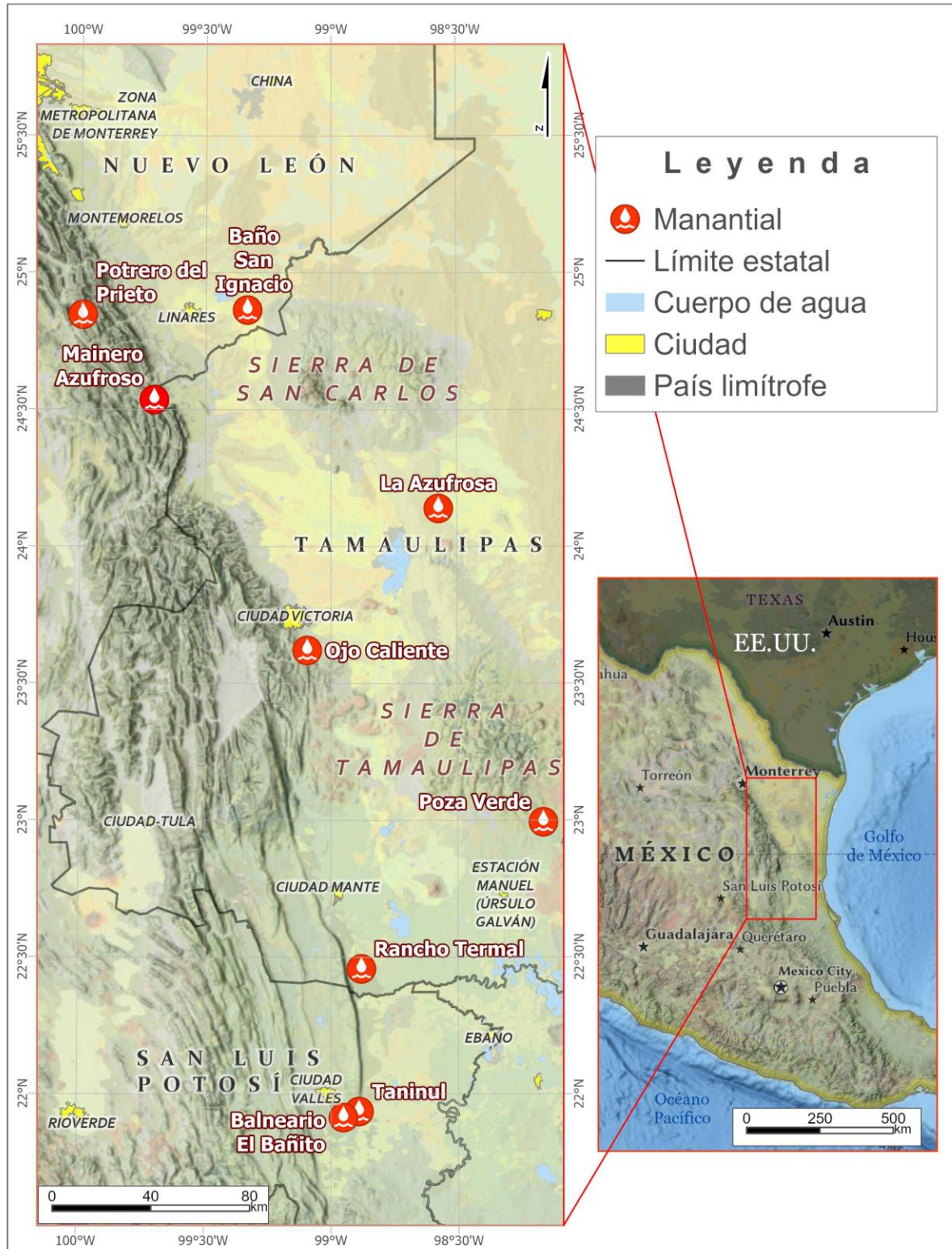


Figura 3. Ubicación de los sistemas geotérmicos de baja y media entalpía investigados.

La región es contrastante debido principalmente a su relieve topográfico ya que en esta confluyen una faja montañosa de crestas alargadas y estrechas y mesetas kársticas como lo es la Sierra Madre Oriental y una zona de tierras bajas atravesada de lomeríos y planicies inclinadas al oriente, acentuada por la erosión diferencial en capas de rocas sedimentarias terciarias. El intervalo altitudinal comienza desde los 3,450 m de la sierra Peña Nevada, en los límites de Nuevo León y Tamaulipas, atravesando una planicie llena de lomeríos de 200 m de altitud en promedio, con algunas interrupciones de 1,000 a 1,500 m de altitud de algunas sierras aisladas como la de Tamaulipas, de San Carlos, Cruillas y la Serranía del Burro; descendiendo suavemente hasta la costa del Golfo de México. La mayoría de las corrientes pluviales en el área de estudio son de agua intermitente y en menor proporción de agua perennes; estos últimos, nacen en la Sierra Madre Oriental y fluyen de suroeste a noreste o de poniente a oriente hacia el Golfo de México. La escasa pendiente de la llanura costera aunado a la distribución de rocas kársticas y volcánicas en ciertas áreas de la planicie, provoca serias deficiencias de drenaje e incluso un reducido escurrimiento superficial comparativo.

4. RESULTADOS

Se exponen las mediciones de parámetros de campo del agua de las surgencias de cada uno de los manantiales durante la época de estiaje (Tabla 2). El manantial termal Taninul (mTA) presenta la mayor temperatura y turbidez entre los manantiales; sin embargo, es el manantial termal Baños San Ignacio (mBSI) el que presenta la mayor conductividad y salinidad. El manantial Mainero Azufrozo (mMA) no presenta anomalía térmica perceptible y la mayor concentración de oxígeno disuelto.

Manantial	Fecha	Hora	Temp	pH	CE	Sal	ORP	DO	Turb	Alc	CO ₃ ⁽²⁻⁾	HCO ₃ ⁽⁻⁾
mTA	02/03/2023	19:20	38.00	6.52	1671	0.58	-7.4	0.05	38.36	350.63	0.40	426.68
mBSI	05/03/2023	11:25	36.60	6.60	7353	3.21	-222.8	0.69	0	254.05	0.35	309.05
mBEB	02/03/2023	16:29	32.60	7.27	1102	0.47	-154.7	1.22	7.2	259.63	0.20	314.73
mOC	03/03/2023	14:36	31.30	6.82	1049	0.46	70	1.29	0	217.35	0.10	264.78
mRT	03/03/2023	10:29	29.90	6.85	800	0.35	69.4	1.88	0	321.37	0.15	391.53
mPV	04/03/2023	08:15	29.60	6.68	789	0.4	-170.2	0.84	0	351.63	0.20	428.37
mPP	05/03/2023	15:49	26.30	6.94	2421	1.21	-247.9	0.81	0	160.83	0.10	195.83
mAZ	04/03/2023	14:10	25.00	7.52	3752	1.98	-346.4	0.55	0	657.13	1.63	913.20
mMA	06/03/2023	09:54	19.90	7.4	362.1	0.19	-150.5	3.56	0	182.07	0.15	221.73
Unidades	d/m/a	h:m	°C	0-14	µS/cm	ppt	mV	mg/L	NTU	mg/L	mg/L	mg/L

Tabla 3. Temp: temperatura del agua del manantial; pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; Sal: salinidad; ORP: potencial óxido reducción; DO: oxígeno disuelto; Turb: turbidez; Alc: alcalinidad; CO₃⁽²⁻⁾: carbonato; HCO₃⁽⁻⁾: bicarbonato.

En general todos los manantiales se caracterizan por tener un pH neutro con “relativa” alta alcalinidad principalmente como bicarbonato y un potencial de óxido reducción negativo, excepto por los manantiales Rancho Termal (mRT) y Ojo Caliente (mOC). Una correlación inversa significativa puede apreciarse para la temperatura con respecto al pH y el oxígeno disuelto en la Figura 4 (Tabla 3).

	<i>Temp</i>	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Sal</i>	<i>ORP</i>	<i>DO</i>	<i>Turb</i>	<i>Alc</i>	<i>CO3(2-)</i>	<i>HCO3(-)</i>
Temp	1									
pH	-0.8	1.0								
CE	0.4	-0.2	1.0							
Sal	0.3	-0.1	1.0	1.0						
ORP	0.3	-0.5	-0.5	-0.6	1.0					
DO	-0.7	0.5	-0.4	-0.4	0.2	1.0				
Turb	0.6	-0.4	-0.1	-0.2	0.3	-0.4	1.0			
Alc	0.0	0.3	0.2	0.3	-0.4	-0.4	0.1	1.0		
CO3(2-)	-0.2	0.5	0.4	0.5	-0.6	-0.3	0.0	0.9	1.0	
HCO3(-)	-0.1	0.4	0.2	0.3	-0.4	-0.4	0.0	1.0	0.9	1.0

Tabla 3. Correlación lineal de parámetros de campo de los manantiales termales identificados.

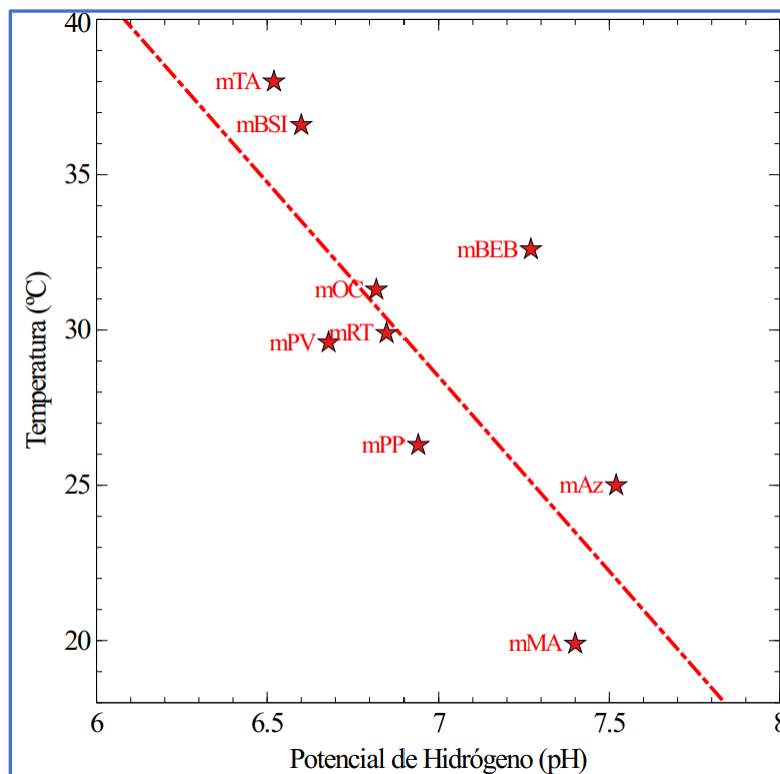


Figure 4. Correlación inversa para el pH y la temperatura de los manantiales del noreste de México.

5. CONCLUSIONES

La búsqueda, identificación, recolección de datos de campo inicial y programación de actividades de investigación multidisciplinaria especializada futuras, permitió el establecimiento de los manantiales de sistemas geotérmicos de baja y media entalpía instalados en sucesiones

sedimentarias carbonatadas-evaporíticas del noreste de México, como lugares estratégicos naturales para la investigación del cambio climático en el noreste de México. La amplia distribución de los manantiales en la accidentada orografía del Flanco Oriental de la Sierra Madre Oriental y la Planicie Costera del Golfo de México propicia que los ecosistemas en estos manantiales sean diversos e ideales para estudiar posibles escenarios de cambio climático. Se plantea que futuros estudios multidisciplinarios especializados permitan alimentar los modelos establecidos y así coadyuvar en la protección y manejo de los ecosistemas regionales.

AGRADECIMIENTOS

A los investigadores Rosa María Prol-Ledesma, Antonio Cardona-Benavides, Daniele Provenzano, e Igor Ishi Rubio-Cisneros por su entusiasmo en esta investigación del noreste mexicano. A la Reserva Natural Baños San Ignacio A.C., por las facilidades otorgadas durante el muestreo del agua subterránea. Finalmente, agradecemos al personal de la empresa Corporación Ambiental de México SA de CV por su valiosa contribución.

REFERENCIAS

Lugo Hubp, J., 1990, El Relieve de la República Mexicana, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, Volumen 9, número 1, páginas 82-111.

Prol-Ledesma, R.M., Morán-Zenteno, D.J., 2019. Heat flow and geothermal provinces in Mexico. *Geothermics* 78, 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2018.12.009>.

Rocha-Ugalde, O., Martínez-Ávalos, J.G., De La Rosa-Manzano, E., Ortega-Rodríguez, J.M., Sáenz-Romero, C., 2022. Impact of climate change on biomes of Tamaulipas and biosphere reserves, El Cielo and Sierra de Tamaulipas, in Mexico. *Southwestern Naturalist* 66, 120–135. <https://doi.org/10.1894/0038-4909-66.2.120>.

Roy, P.D., Vera-Vera, G., Curtis, J.H., Sánchez-Zavala, J.L., Quiroz-Jiménez, J.D., Muthu Sankar, G., 2019. Response of arid northeast Mexico to global climate changes during the late Pleistocene to the middle Holocene. *Earth Surface Process Landform* 44, 2211–2222. <https://doi.org/10.1002/esp.4645>.

Stewart, M., Carleton, W.C., Groucutt, H.S., 2021. Climate change, not human population growth, correlates with Late Quaternary megafauna declines in North America. *Nature Communications* 12. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21201-8>

Wright, K.T., Johnson, K.R., Bhattacharya, T., Marks, G.S., McGee, D., Elsbury, D., Peings, Y., Lacaille-Muzquiz, J.L., Lum, G., Beramendi-Orosco, L., Magnusdottir, G., 2022. Precipitation in Northeast Mexico Primarily Controlled by the Relative Warming of Atlantic SSTs. *Geophysical Research Letter* 49. <https://doi.org/10.1029/2022GL098186>.