



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
FACULTAD DE BIOLOGÍA



# IMPLICACIONES TAFONÓMICAS Y PALEOAMBIENTALES EN UN YACIMIENTO PLIO-PLEISTOCÉNICO AL NORTE DE MICHOACÁN, MÉXICO.

TESIS

Como requisito parcial para obtener el Título en  
**Maestría en Ciencias Biológicas**

Presenta

**Biól. Robert Diego Lystad Gray**

Tutor: Dr. Javier Ponce Saavedra

Co-tutor: Alejandro Hiram Marín Leyva

MORELIA MICH. JUNIO 2021

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi familia, muy en especial a mi madre Mónica Patricia Gray Rodríguez por su apoyo y amor incondicional durante toda mi vida y a mis hermanas Lorraine Marie Lystad Gray y Sarah Mónica Lystad Gray por ser mis guías en las buenas y malas experiencias. A mis abuelos Raphael Gray y Victoria Rodríguez por ser los que me intrigaron a incurrir en el mundo de la ciencia y por ser los pilares y fundación de la familia Gray. Se los debo a ustedes.

A la contribución en el crecimiento científico, desarrollo y educación de este gran estado de Michoacán.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer en primera instancia a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en especial a la facultad de Biología, su Programa de Maestría en Ciencias Biológicas y al área de Ecología y Conservación por darme la oportunidad de formar parte de su programa y por la ayuda proporcionada por el personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo de manutención durante estos últimos dos años para llevar a cabo esta investigación.

Al Centro de Geociencias de la Universidad Autónoma de México, Campus Juriquilla, en especial a Ofelia Pérez Arvizu, por su amabilidad en el apoyo del curso de ICP MS y la realización de las muestras del presente trabajo.

Al director de mi trabajo el Dr. Javier Ponce Saavedra por ayudarme en su revisión y consejos, por guiarme y formar parte de mi proceso de formación.

A mi co-director el Dr. Alejandro Hiram Leyva por su paciencia conmigo, su punto de vista que me ha ayudado a expandir mis horizontes en el ámbito científico y paleontológico, por el apoyo en las revisiones y el desarrollo de mi tesis de maestría.

A la Dra. María Luisa García Zepeda por abrirme las puertas y permitirme formar parte del Laboratorio de Paleontología para poder seguir adentrándome en el tema que más me apasiona. Le estaré eternamente agradecido.

Al Dr. Joaquín Arroyo Cabrales por abrirme las puertas del INAH, por su accesibilidad, consejos, comentarios, aportaciones y humildad.

Al Dr. Peter Schaaf que me ha apoyado con sugerencia y comentarios con su amplio conocimiento en el área de las Geociencias.

Quisiera agradecer de manera entusiasta a Eraclio Ortiz Madrigal por mostrarme la localidad fosilífera y ayudarnos en la colecta de material en Santa Fe del Río. De Alfredo Olivares por permitirnos el acceso a su terreno. A Dulce Ríos Mora y su padre Samuel Ríos que nos han recibido siempre con los brazos abiertos cuando hemos realizado las colectas en la localidad y por su aprecio y curiosidad con el sitio

fósil. A Juanita Alcalá por permitirnos hacer uso de las instalaciones en la biblioteca cuando hubo la necesidad de pasar la noche. Sin ellos no habría sido posible realizar este trabajo.

A mis compañeros de Laboratorio Joaquín, Omar, Roberto, Raymundo, Martín, Ulises y Sabrina por hacer amena mi estancia en el laboratorio, por su apoyo y consejo. A mis amigos Víctor Luna, Roberto Morales, Denis Hernández, Erik, Francisco, Edwin por su amistad, por su apoyo durante la tesis y las distintas colectas realizadas, en general por estar conmigo. ¡Gracias!

## ÍNDICE

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos .....	ii
Resumen general .....	1
General Abstract .....	2
1. Introducción general.....	4
2. Preguntas de investigación.....	5
3. Hipótesis .....	5
4. Objetivos .....	5
4.1 General.....	5
4.2 Particulares.....	6
5. Descripción del Área de Estudio .....	7
5.1 Ubicación .....	7
5.2 Clima .....	8
5.3 Fauna actual .....	8
5.4 Vegetación actual.....	8
5.5 Geología local.....	9
Capítulo 1. Facies Sedimentarias del Paleolago de Santa Fe del Río. ....	11
Resumen .....	11
Abstract.....	12
1. Introducción.....	13
2. Antecedentes.....	14
2.1 Marco geológico.....	16
3. Material y Métodos .....	18
3.1 Trabajo en campo .....	18

3.1.1 Estratigrafía.....	18
3.1.2 Sedimentología .....	22
3.2 Trabajo en laboratorio .....	22
3.3 Trabajo de gabinete .....	23
4. Resultados .....	24
4.1 Columna estratigráfica .....	24
4.2 Sedimentología .....	27
5. Discusión .....	31
6. Conclusiones.....	36
7. Literatura citada .....	37
Capítulo 2. Fauna Fósil e interpretación tafonómica y paleoambiental de Santa Fe del Río.....	41
Resumen .....	41
Abstract.....	42
1. Introducción.....	44
1.1 Procesos tafonómicos.....	45
2. Antecedentes.....	46
3. Material y Métodos .....	48
3.1 Colecta y Transporte de Material Fósil .....	48
3.1.2 Limpieza y Consolidación del Material Fósil.....	48
3.2 Trabajo de escritorio.....	49
3.2.1 Determinación Taxonómica .....	49
3.3 Escala de intemperismo .....	49
3.4 Escala de fragmentación.....	50
4. Resultados.....	51

4.1 Paleontología Sistemática.....	55
5. Discusión .....	75
6. Conclusiones.....	77
7. Literatura citada .....	79
<b>Capítulo 3. Inferencias paleoambientales y tafonómicas con el uso de Elementos de Tierras Raras (ETR) de Santa Fe del Río.....</b>	<b>86</b>
Resumen .....	86
Abstract.....	87
1. Introducción.....	89
2. Antecedentes.....	91
3. Material y Métodos .....	95
3.1 Trabajo en Campo.....	95
3.2 Trabajo en Laboratorio .....	95
3.2.1 Preparación de las muestras de sedimentos .....	95
3.2.2 Preparación de las muestras de los fósiles .....	96
3.3 Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MS .....	97
3.4 Análisis de las muestras .....	98
4. Resultados .....	99
5. Discusión .....	107
5.1 Elementos de Tierras Raras en Sedimentos.....	107
5.2 Elementos de Tierras Raras en Fósiles .....	107
6. Conclusiones.....	109
7. Literatura citada .....	110
6. Discusiones generales.....	115
7. Conclusiones generales .....	117

<b>8. Literatura general .....</b>	<b>119</b>
------------------------------------	------------



## **Figuras Generales**

<b>Figura 1. Mapa de Santa Fe del Río. Realizado en ArcGIS versión 10.3.....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 2. Tomado y adaptado de la Carta Geológica Minera de Querétaro (1999). <a href="http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/77_F14-10_GM.pdf">http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/77_F14-10_GM.pdf</a>.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 1. Mapa del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano en gris oscuro, en amarillo se resalta el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. Tomado de: <a href="http://paricutin.umich.mx/10_Paricutin_CVMG.html">http://paricutin.umich.mx/10_Paricutin_CVMG.html</a>.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2. Mapa de Santa Fe del Río. Realizado en ArcGIS versión 10.3.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 3. Estratos 16 y 17 de la columna estratigráfica en campo de Santa Fe del Río. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4. Columna estratigráfica en campo del estrato 1 al 15 de Santa Fe del Río. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 5. Tamizado y almacenado de las muestras. ....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 6. Gráfica de frecuencia acumulativa relativa. Tomado y adaptado de López-García, 2008.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 7. Columna estratigráfica de Santa Fe del Río. Elaborada con el programa SedLog 3.0.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 8. Columna estratigráfica con los niveles respectivos de energía de cada estrato. ....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 9. Curva de energía granulométricas de cada estrato que reflejan la frecuencia con el diámetro.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 1. Grado de intemperismo en los fósiles identificados del estrato inferior (14) de Santa Fe del Río.....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 2. Grado de intemperismo en los fósiles identificados del estrato superior (17) de Santa Fe del Río.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 3. Tabla de fragmentación de los fósiles del estrato inferior (14) de acuerdo con Fernández-Jalvo y Andrews, 2016.....</b>	<b>53</b>

Figura 4. Tabla de fragmentación de los fósiles del estrato superior (17) de acuerdo con Fernández-Jalvo y Andrews, 2016.....	54
Figura 5. Fósiles del estrato superior de Santa Fe del Río. A) Diente faríngeo de ciprínido (UM 3350). B) Vértebra torácica de ciprínido en vista ventral (UM 3348). C) Vértebra torácica de ciprínido vista craneal (UM 3348). D) Incisivo de roedor. E) Vértebra de serpiente vista craneal (UM 3351). F) Molar de roedor (UM 3352). G) Defensa de proboscídeo (UM 3353). La escala de la defensa está dada en 1 cm, el resto de fósiles en 1 mm.....	57
Figura 6. Distintas vértebras de peces del estrato inferior en vista ventral. A) Vértebra de ciprínido (UM 3324). B) Vértebra de aterínido (UM 3368). C) Vértebra de ictalúrido (UM 3370). Escala dada en 1 mm.....	60
Figura 7. Urostilo de <i>Lithobates</i> sp. en vista craneal (UM 3375). Escala dada en 1 mm.....	61
Figura 8. Vértebras de serpientes. A) Vértebra de serpiente en vista caudal (UM 3344). B) Vértebra de serpiente en vista ventral (UM 3345). C) Vértebra de serpiente en vista craneal (UM 3346). D) Vértebra de serpiente en vista dorsal (UM 3371). .....	63
Figura 9. Vértebra torácica de <i>Lampropeltis</i> sp. (UM 2064). A) Vértebra torácica de <i>Lampropeltis</i> sp. en vista caudal. B) Vértebra torácica de <i>Lampropeltis</i> sp. en vista lateral). C) Vértebra torácica de <i>Lampropeltis</i> sp. en vista craneal..	64
Figura 10. A) Vértebra torácica de <i>Thamnophis</i> sp. en vista craneal (UM 3372). B) Vértebra de <i>Thamnophis</i> sp. en vista caudal (UM 3372). C) Vértebra de <i>Thamnophis</i> sp. en vista ventral (UM 3372). La escala está dada en 1 mm...	66
Figura 11. Calcáneo de roedor (UM 3373).....	66
Figura 12. Molar M1 de <i>Sigmodon minor</i> (UM 2068). Escala dada en 1mm. Tomado de Lystad-Gray (2018).....	68
Figura 13. Fósiles de lagomorfos. A) Húmero derecho de <i>Hypolagus vetus</i> (UM 3335). B) Húmero izquierdo (UM 3340). C y D) falanges distales (UM 3337 y UM 3338). E). m3 derecho de <i>Hypolagus vetus</i> (UM 3347). F) P2 izquierdo de	

<i>Hypolagus vetus</i> (UM 3364). G) Astrágalo derecho de <i>Hypolagus vetus</i> en vista dorsal (UM 3340). H) Astrágalo derecho en vista ventral (UM 3340). De la A a la F la escala está dada en 1 mm, la G y H está dado en 1 cm. ....	72
Figura 14. Metacarpal III de <i>Equus</i> sp (UM 3374). A) Vista proximal. B) Vista lateral. Escala dada en 1 cm. ....	74
Figura 1. Preparación de las muestras de sedimento. A la izquierda se tiene el mortero con el que se realizó el pulverizado y la balanza con el polvo pesado. A la derecha se tiene el contenedor del polvo de ETR con su etiqueta correspondiente .....	96
Figura 2. Preparación de las muestras con el Micro Drill eléctrico. ....	97
Figura 3. Ubicación de Santa Fe del Río y las localidades de comparación de Querétaro, Guanajuato, Jalisco y Michoacán de ETR tomados de Gómez-Tuena <i>et al.</i> (2018). Realizado en ArcGIS versión 10.3. ....	99
Figura 4. Firmas de elementos de tierras raras en los sedimentos de la columna estratigráfica de Santa Fe del Río. ....	101
Figura 5. Firmas de elementos de tierras raras de los Altos de Jalisco. Tomado y adaptado de Gómez-Tuena <i>et al.</i> (2018). ....	102
Figura 6. Firmas de elementos de tierras raras del complejo volcánico Palo Huérfano-La Joya-Zamorano de Querétaro. Tomado y adaptado de Gómez-Tuena <i>et al.</i> (2018). ....	103
Figura 7. Firmas de elementos de tierras raras de Michoacán (CVMG=Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, CVMC=Campo Volcánico Mil Cumbres, CE=La Escalera Caldera). Tomado y adaptado de Gómez-Tuena <i>et al.</i> (2018). ....	104
Figura 8. Firmas de elementos de tierras raras de sedimentos y fósiles de ambos estratos normalizados con Condrita C1 de Santa Fe del Río. ....	105
Figura 9. Firma de elementos de tierras raras en sedimentos y en cinco fósiles del estrato 14 (inferior) de la columna estratigráfica. Normalizados con NASC. ....	106

<b>Figura 10. Firma de elementos de tierras raras en sedimentos y en cinco fósiles del estrato 17 (superior) de la columna estratigráfica. Normalizados con NASC. ....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 1. Lista de fósiles incluyendo los previamente identificados de Santa Fe del Río. ....</b>	<b>122</b>

## Resumen general

El Blanco es una edad de mamíferos terrestres de América del Norte, tiene un rango temporal aproximado de entre 4.6 millones de años (Ma) a 1.35 Ma, Santa Fe del Río es una localidad fosilífera al norte de Michoacán, México, que corresponde a esta NALMA (Plioceno tardío-Pleistoceno temprano) de acuerdo con la presencia de los fósiles índice *Nannippus peninsulatus* y *Sigmodon minor*. En esta localidad paleontológica se llevó a cabo un estudio estratigráfico, sedimentológico (granulométrico), taxonómico y geoquímico, con el objetivo de conocer los procesos sedimentarios, el grado de energía de los depósitos, la riqueza de especies fósiles y la geoquímica por medio del uso de Elementos de Tierras Raras (ETR) y sus implicaciones en la tafonomía y reconstrucción paleoambiental del yacimiento de Santa Fe del Río. Los resultados de la estratigrafía y la granulometría muestran una columna con 17 estratos con niveles de energía de depósito variable (baja-media-alta), agrupados en 14 facies, sugiriendo la presencia de un antiguo lago. En el apartado paleontológico los fósiles identificados de los estratos 17 (superior) y 14 (inferior) suman un total de 46; 11 provenientes del estrato superior y 35 del estrato inferior. El estrato superior tiene la presencia de ciprínidos, serpientes, roedores (*Sigmodon* sp.) y proboscídeos, el estrato inferior tiene la presencia de fósiles que incluye tres familias de peces (Cyprinidae, Aterinidae e Ictaluridae), anfibios (*Lithobathes* sp.), tortugas (*Kinosternon* sp.), serpientes (*Lampropeltis* sp. y *Thamnophis* sp.), lagomorfos (*Hypolagus vetus*), roedores (*Sigmodon minor*) équidos (*Equus* sp. cf. *Equus simplicidens*) y proboscídeos. En el análisis de ETR realizado a un total de 27 muestras, 17 en rocas sedimentarias y diez en fósiles de ambos estratos fosilíferos; cinco del estrato 17 y cinco del 14, muestran que los patrones de ETR en los niveles de origen volcánico son de origen magmático similar provenientes de campos volcánicos dentro del estado de Michoacán, los valores de ETR en los fósiles del estrato 14 sugieren una fósil diagénesis temprana con condiciones similares, implicando que no sufrieron movimiento post-deposicional, mientras que los del nivel 17 sugieren una diferencia en la fósil diagénesis temprana, implicando diferentes ambientes de depósito y movimiento post-deposicional.

Dentro del análisis se consideraron las anomalías de Cerio (Ce) y Europio (Eu) que permitieron conocer las condiciones de óxido-reducción en los sedimentos y fósiles. Finalmente todas las evidencias nos permiten concluir la presencia de un paleolago con distintos estadios de estabilidad, sequía, diluvio y eventos volcánicos, los resultados de ETR en los fósiles del estrato inferior indican que no fueron retrabajados (fosilizaron en el mismo sitio), en cambio los del estrato superior indican que sí (fosilizaron en sitios distintos), de acuerdo con las anomalías de Ce y Eu se demuestra que las condiciones de fosilización en el sitio eran oxidantes, la presencia de distintos taxones dulceacuícolas apoyan la evidencia de un lago de agua tranquila y los taxones terrestres una heterogeneidad de ambientes.

**Palabras clave: Elementos de Tierras Raras (ETR), yacimiento fosilífero, estratigrafía, sedimentología, Blancano.**

### **General Abstract**

The Blancan is a North American Land Mammal Age (NALMA) that has a time range of approximately 4.6 million years (Myr) to 1.35 Myr, Santa Fe del Río is a fossil site north of the state of Michoacan, Mexico, that belongs to this NALMA (late Pliocene-early Pleistocene) determined by the presence of the index fossils *Nannippus peninsulatus* and *Sigmodon minor*. A study was conducted which involved the stratigraphy, the sedimentology (grainsize analysis), the taxonomy and the geochemistry in the site. The objective of the study is to know the sedimentary processes, level of energy of the deposits, the richness of fossil species and the geochemical processes with the use of REE to deduce the taphonomic implications and to make a paleoenviromental reconstruction of the fossil site of Santa Fe del Río. The results of the stratigraphic column and the grainsize analysis show the presence of 17 strata with varied levels of deposit energy (low-medium-high), suggesting the presence of an ancient lake. On the taxonomic aspect the fossils identified from the strata 17 (superior) and 14 (inferior) include a total of 46; 11 from the superior strata and 35 from the inferior one. The register of the superior strata includes the presence of cyprinids, snakes, rodents (*Sigmodon* sp.) and

proboscideans, the superior strata includes the register of three fish families (Cyprinidae, Aterinidae and Ictaluridae), amphibians (*Lithobates* sp.), turtles (*Kinosternon* sp.), snakes (*Lampropeltis* sp. and *Thamnophis* sp.), lagomorphs (*Hypolagus vetus*), roedents (*Sigmodon minor*), equines (*Equus* sp. cf. *simplicidens*) and proboscideans. In the REE study 27 samples were analyzed in total; 17 were done on each strata and ten were done in fossils from both fossil strata, five from the strata 17 and five from the strata 14. The REE patterns of the volcanic sediments indicate a similar magmatic origin coming from volcanic fields within the state of Michoacán. The REE patterns in the fossils from the strata 14 suggest an early fossil diagenesis with similar conditions, implying that they didn't suffer post-depositional movement. On the other hand the fossils from strata 17 indicate a difference in their early fossil diagenesis, implying that there were different depositional environments and post-depositional movement. The analysis considered the Cerium (Ce) and Europium (Eu) anomalies that allowed to infer the oxide-reduction conditions in the sediments and fossils. At last with all the evidence gathered it's possible to conclude the presence of a paleolake with different phases of stability, drought, flood and volcanic events that existed in Santa Fe del Río. The REE patterns in the fossils from the inferior strata indicate they weren't reworked (they fossilized in the same place), the REE patterns of the superior strata indicate that they were reworked (they fossilized in different places). According to the Ce and Eu anomalies it's possible to infer that the conditions of fossilization were oxic. The presence of the different aquatic taxa supports the evidence of a calm lake and the terrestrial taxa suggest the heterogeneity of environments around it.

**Key words: Rare Earth Elements (REE), fossil site, stratigraphic column, sedimentology, Blancan.**

## 1. Introducción general

El Blancano es una de las temporalidades o NALMAs (Edades de Mamíferos Terrestres de América del Norte por sus siglas en español) que menos se conocen en México debido en gran parte a la geología del país, pero sobre todo por la falta de investigadores en el tema. El Blancano tiene un rango aproximado temporal de entre 4.6 millones de años (Ma) a 1.35 Ma de acuerdo con la ICS (International Chronostratigraphic Chart) en 2018.

La estratigrafía estudia la relación existente entre rocas similares dentro de un marco cronoestratigráfico y permite definir edades con poca evidencia geológica. Las secuencias y los componentes presentes en los estratos permiten hacer especulaciones sobre cambios que dieron lugar dentro de la columna estratigráfica como los restos fósiles (Van Wagoner *et al.*, 1988). En el yacimiento fosilífero de Santa Fe del Río se registran en Lystad-Gray (2018), la presencia de cinco estratos distinguibles, de los cuales el primero (sin definición temporal aún) y el tercero (Blancano), presentan abundante materia orgánica y restos fósiles. La localidad se encuentra próxima al sistema hidrológico del río Lerma-Chapala, el cual se cree que estuvo asociado con el sitio debido a la presencia de taxones fósiles identificados previamente como aves acuáticas (Scolopacidae, Anseriformes), peces (Cyprinidae, Aterinidae e Ictaluridae), anfibios (*Lithobates* sp.) y reptiles (*Kinosternon* sp., *Thamnophis* sp. y *Lampropeltis* sp.), indicadores de un ambiente dulceacuícola. Los Elementos de Tierras Raras (ETR) en los sedimentos y fósiles, forman óxidos estables e insolubles que se transportan como partículas suspendidas en corrientes de agua hasta el sitio de depósito (Rollinson, 1994). Los ETR en los sedimentos se incorporan en los huesos al fosilizar y una vez que se saturan su composición no variará más funcionando como una huella o firma única del sitio donde fosilizaron (Trueman *et al.*, 2006; Tütken *et al.*, 2011).

En el presente trabajo se pretende hacer un estudio paleontológico (taxonomía), estratigráfico (columna y estratigrafía a detalle), sedimentológico (granulometría) y geoquímico (elementos de tierras raras en sedimentos y fósiles) en el sitio de Santa



Fe del Río, Penjamillo, Michoacán, México con la finalidad de conocer los procesos sedimentarios que formaron el yacimiento (p. ej, energía de depositación), mientras que a través de los datos geoquímicos en los sedimentos y fósiles se busca hacer inferencias paleoambientales y tafonómicas en el área, conocer el ambiente de enterramiento y la posible reelaboración tafonómica. Este trabajo representaría el primero realizado para la localidad de Santa Fe del Río y servirá como base informativa para investigaciones futuras.

## **2. Preguntas de investigación**

¿En qué tipo de paleoambiente se sedimentaron los fósiles?, ¿Cuál fue la rapidez con la que se depositaron los restos óseos?, ¿Los fósiles son de carácter autóctono o alóctono?, ¿Las cenizas volcánicas provienen de algún volcán cercano?

## **3. Hipótesis**

1. Los restos óseos fosilizaron en un tipo de paleoambiente lacustre debido al grado de energía en el que se depositaron los sedimentos.
2. Los restos óseos se depositaron de manera rápida en los sedimentos después de su muerte por que están poco intemperizados y transportados.
3. Los procesos de sedimentación y la historia geológica del área de estudio permitieron que los fósiles allí depositados sean autóctonos.
4. La existencia de intensa actividad volcánica asociada al área y época de estudio, implica que las cenizas y arena volcánica que se encuentran en la estratigrafía de la zona, proviene de eventos volcánicos locales.

## **4. Objetivos**

### **4.1 General**

Conocer los procesos estratigráficos, la sedimentología, la riqueza de especies fósiles y la geoquímica por medio del uso Elementos de Tierras Raras del

yacimiento de Santa Fe del Río y sus implicaciones en la tafonomía y reconstrucción paleoambiental.

#### **4.2 Particulares**

Hacer una columna estratigráfica a detalle del yacimiento fosilífero para conocer los distintos procesos geológicos y sedimentarios.

Establecer el origen, tipo y energía de depósito de los sedimentos presentes en cada estrato por medio de un análisis granulométrico para conocer la composición sedimentológica.

Elaborar un listado taxonómico de los restos fósiles identificables que provengan de los estratos fosilíferos.

Determinar la composición de elementos de tierras raras en las muestras de sedimento y en los fósiles para inferir condiciones tafonómicas y paleoambientales del sitio.

Elaborar una propuesta de reconstrucción tafonómica y paleoambiental derivada de la información generada.

## 5. Descripción del Área de Estudio

### 5.1 Ubicación

El yacimiento se encuentra en la cuenca del Bajo Lerma, dentro de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), en el campo volcánico de Michoacán-Guanajuato, y está ubicada en un banco de materiales en Santa Fe del Río, que se encuentra dentro del municipio de Penjamillo, estado de Michoacán de Ocampo, México. La altitud es de 1771 msnm, con coordenadas 20°11'27" Latitud Norte y 101°50'20" Longitud Oeste. Por la parte norte colinda con el Estado de Guanajuato, por el este con los municipios de Angamacutiro y Panindícuaro; al sur con Zacapu y Tlazazalca y al oeste con Churintzio, Zináparo y Numarán (INAFED, 2010) (Figura 1).

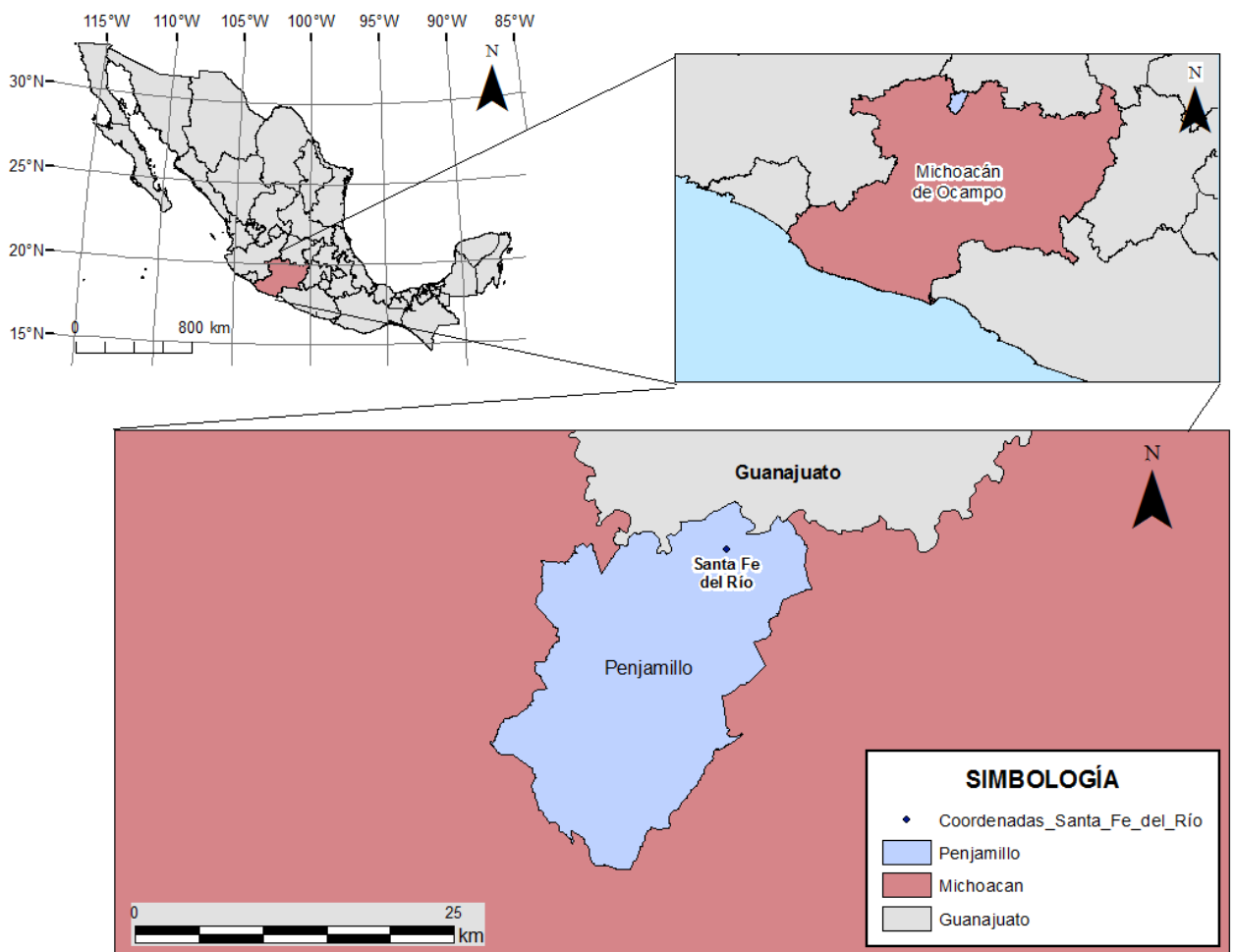


Figura 1. Mapa de Santa Fe del Río. Realizado en ArcGIS versión 10.3.

## 5.2 Clima

El rango de temperatura oscila entre los 16° y 22° C. El rango de precipitación se encuentra entre los 700 y 1 000 mm anuales. El clima es semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (66.77%), templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (32.79%) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (0.44%) (INEGI, 2009).

## 5.3 Fauna actual

La fauna actual incluye la presencia de mapache (*Procyon lotor*), comadreja (*Mustela nivalis*), ratas de campo (*Sigmodon*), conejos (*Sylvilagus floridanus*), armadillo (*Dasypus novemcinctus*), ardilla, tlacuache (*Didelphys virginiana*), zorrillo (*Mephitis macroura*), cacomiztle (*Bassariscus astutus*), venado (*Odocoileus virginianus*) y una gran variedad de aves como aguililla roja (*Buteo jamaicensis*), halcón peregrino (*Falco sparverius*), quebranta huesos (*Caracara cheriway*), lechuzas (*Tyto alba*), correcaminos (*Geococcyx*), torcaza y pato (Notas personales; INAFED, 2010). También existe una gran variedad de reptiles y anfibios como; ranas (*Ranidae*), zapos (*Bufo*), lagartijas, serpientes de cascabel (*Crotalus*), coralillos (*Lampropeltis*), chirrioneras (*Masticophis flagellum*), tortugas casquito (*Kinosternon*), etc. De algunos artrópodos se encuentran alacranes, viudas negras (*Latrodectus mactans*), solífugos, hormigas rojas, abejas africanas y avispa roja (INAFED, 2010; Hernández, 2005).

## 5.4 Vegetación actual

En la vegetación actual abundan el nopal (*Opuntia* sp.), *Acacia*, pastizales y matorrales diversos (INAFED, 2010). En la zona urbana y aledaña a Penjamillo la flora por especies arbóreas como; el sabino (*Taxodium mucronatum*), también hay mezquite (*Fabaceae*) y pinzan (*Pithecellobium dulce*), con árboles de entre 8 a 12 m de altura (Hernández, 2005). La región del Bajío ocupa parte de los estados de Guanajuato, Michoacán y Querétaro en las que se describe un tipo de vegetación seca, una franja de vegetación que de bosque espinoso, son comunes los mezquiales, algunas cactáceas, gramíneas que se encuentran presentes en Santa Fe del Río (Rzendowski, 2006).

## 5.5 Geología local

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es un arco volcánico que se desarrolla sobre el margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos (Ferrari, 2000). El campo volcánico Michoacán-Guanajuato se desarrolla en el sector central, del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), formado por centros monogenéticos y pequeños volcanes escudo de composición basáltica o basáltico-andesítica. No hay estratovolcanes, excepto por el Cerro de Tancítaro (Ferrari, 2000). Aunque se sugiere que el CVTM se formó desde el Mioceno superior, existe un arco volcánico Plio-Cuaternario que tiene un ancho variable de hasta 200 km en la región del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) y un mínimo de 65 km en las regiones de Chapala y Morelia (Ferrari, 2000). Un estudio realizado por Hasenaka *et al.* en 2012 resalta que hay 2 tipos de volcanes que constituyen al Cinturón Volcánico, conos monogenéticos pequeños y volcanes de escudo que son más grandes, ambos tipos de volcanes fechados con K-Ar sugieren distintos momentos de formación, en el caso de los conos se formaron después que los volcanes de escudo. Los volcanes de escudo en el CVMG tienen flujos de lava con diferente petrografía y química que los conos de menor tamaño. Las rocas volcánicas de los basaltos primitivos calcoalcalinos sin fraccionar en la mayoría de los volcanes pertenecen a los conos de ceniza, la andesita calcoalcalina representa a los volcanes de escudo y su flujo magmático que si está fraccionada (Hasenaka *et al.*, 2012). Casi todos los volcanes en el CVMG son de composición basáltica o andesita basáltica, con fenocristales de olivino, plagioclasa, augita y piroxeno (excepto los domos de lava, que son de composición andesítica o dacítica) (Hasenaka y Carmichael, 1987; Guilbaud *et al.*, 2012). El desarrollo del CVMG comienza en el Plioceno tardío, su actividad incrementa a partir del Pleistoceno y el Holoceno (Hasenaka y Carmichael, 1985; Ban *et al.*, 1992; Guilbaud *et al.*, 2012; Siebe *et al.*, 2014; Pola *et al.*, 2015; Reyes-Guzmán *et al.*, 2018; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). De acuerdo con fechamientos de K-Ar los conos presentes son de edades entre 2.9 Ma a 1.4 Ma (Pasquarè *et al.*, 1991).

Es posible ver la distribución de las rocas pertenecientes al municipio de Penjamillo en la Carta Geológica Minera de Querétaro (1999) y está constituida principalmente por rocas de toba basáltica-arenisca y de andesita-basalto (**Figura 2**).

De acuerdo con estudios realizados por el INAFED en 2010 los suelos del municipio datan de períodos Cenozoico, Neógeno. El periodo en el que se encuentran las rocas de acuerdo con el INEGI (2009) son: Plioceno-Cuaternario (79.15%), Cuaternario (14.00%) y Neógeno (5.16%). La zona urbana crece sobre suelo aluvial del Cuaternario y roca ígnea extrusiva del Plioceno-Cuaternario en su mayoría y sedimentaria del Neógeno (INEGI, 2009).

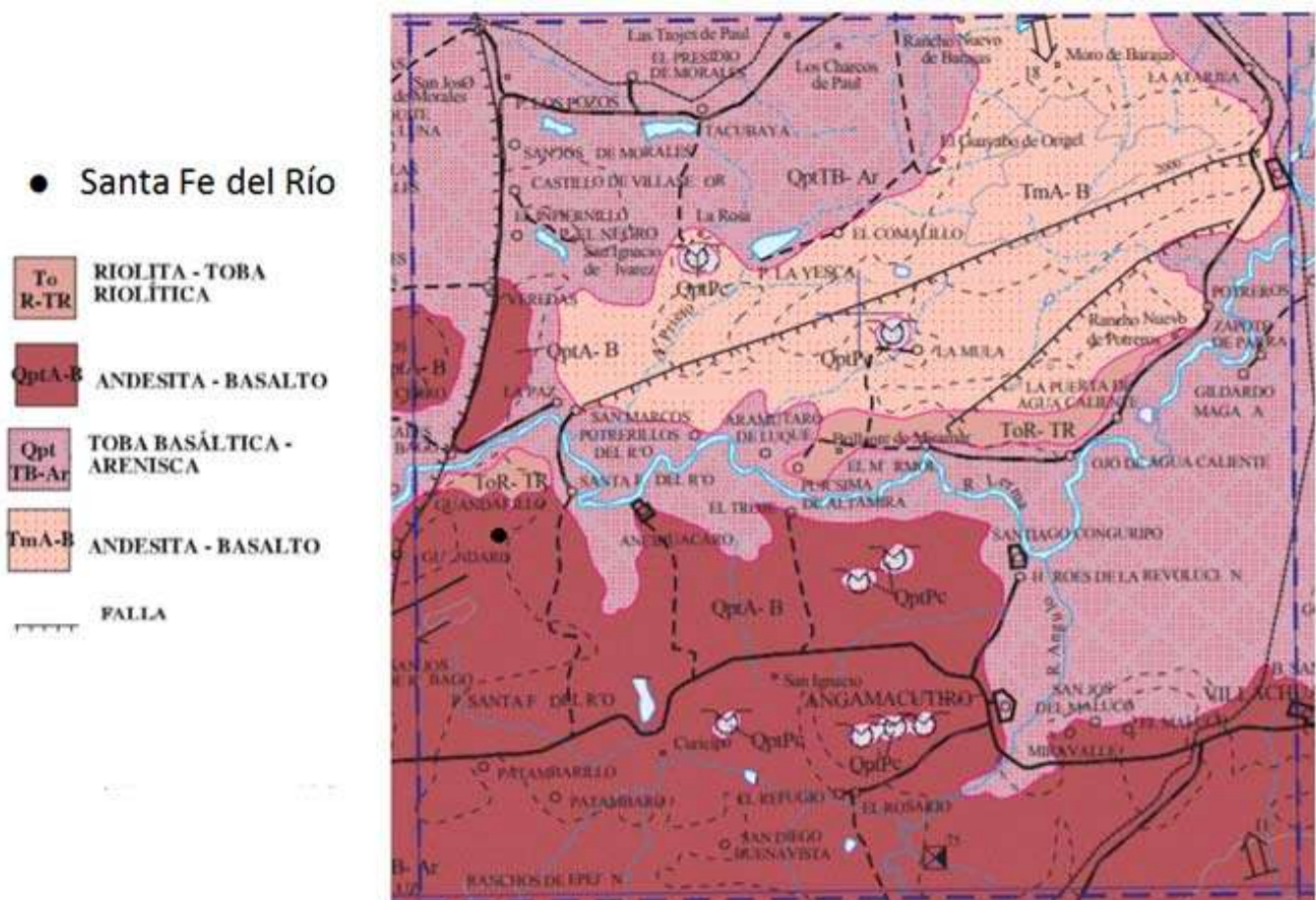


Figura 2. Tomado y adaptado de la Carta Geológica Minera de Querétaro (1999). [http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas\\_Online/geologia/77\\_F14-10\\_GM.pdf](http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/77_F14-10_GM.pdf).

## **Capítulo 1. Facies Sedimentarias del Paleolago de Santa Fe del Río.**

**Robert Diego Lystad Gray<sup>1</sup>, Javier Ponce Saavedra<sup>2</sup>, Alejandro H. Marín Leyva<sup>1</sup>, María Luisa García Zepeda<sup>1</sup>, Joaquín Arroyo-Cabrales<sup>3</sup>, Peter Schaaf<sup>4</sup>**

*<sup>1</sup>Laboratorio de Paleontología, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. R 2° Piso, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>2</sup> Laboratorio de Entomología “Biol. Sócrates Cisneros Paz”, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. B4 2° Piso, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>3</sup> Laboratorio de Arqueozoología “M. en C. Ticul Álvarez Solórzano”, Subdirección de laboratorio y Apoyo Académico, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Moneda #16, Col. Centro, 06060, Ciudad de México, México.*

*<sup>4</sup> Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS), Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, 04150, Ciudad de México, México.*

### **Resumen**

Se realizó un estudio estratigráfico y sedimentológico de la localidad fosilífera ubicada en Santa Fe del Río, en el municipio de Penjamillo, Michoacán, México con la finalidad de conocer la evolución de las distintas facies que componen la columna estratigráfica del sitio. La columna tiene 17 estratos, donde hay arcillas que se intercalan con arena volcánica, también presenta un estrato limoso (estrato fósil), otro con grandes clastos y estratos con concreciones. Por medio del estudio granulométrico de las facies sedimentarias se distinguen desde partículas finas a muy gruesas sugiriendo cambios drásticos en el ambiente. Los resultados muestran eventos climáticos variados que influenciaron el ingreso de sedimento hacia un antiguo lago situado al norte del estado, se aprecian ambientes desde un lago estable y tranquilo, aluvial, somero y eventos volcánicos de ceniza y piroclastos propiciados por la formación del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato que dieron comienzo durante el Plioceno tardío. Los estratos 14 y 17 de la columna

contienen restos de vertebrados fósiles. El estrato 14 contiene los fósiles índice *Nannippus peninsulatus* y *Sigmodon minor* que permiten hacer una correlación con la edad de mamíferos terrestres de América del Norte del Blancano.

**Palabras Clave: paleolago, facies, biofacies, eventos tectónicos.**

### **Abstract**

A stratigraphic and sedimentological study was conducted at the fossil site of Santa Fe del Río, in the municipality of Penjamillo, Michoacán, México, to better understand the evolution of the sediments seen in the stratigraphic column of the site. The column has 17 strata in total which include clays that alternate with volcanic sediments along most of the column, there is also the presence of a silt (fossil stratum), another with big clasts, and a few with concretions. Through the granulometric study of the sedimentary facies grains of different sizes were identified, going from small and fine particles to big and thick ones, suggesting drastic changes in the environment. The results show that many climatic events influenced the entrance of sediments to the old lake situated north of the state, suggesting the environment of a calm and stable lake, there is also the presence of an alluvial environment, shallow ones and volcanic ashes and pyroclastic events took place during the formation of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Belt in the late Pliocene. The strata 14 and 17 possess vertebrate fossils. In stratum 14 the presence of the index fossils *Nannippus peninsulatus* and *Sigmodon minor* allowed to make a correlation with the Blancan terrestrial mammal age of North America.

**Key words: paleolake, biofacies, tectonic events.**



## 1. Introducción

Nuestro planeta puede considerarse como estratificado en cierto sentido, por lo que todas las rocas y sus clases; sedimentarias, ígneas y metamórficas pueden ser estudiadas y clasificadas por la estratigrafía (Hedberg, 1980). La historia de la corteza terrestre se preserva en cierto grado en las rocas sedimentarias. Así como los fósiles nos proporcionan información sobre la evolución de la vida en la Tierra y nos ayudan a establecer una secuencia de periodos cronológicos, las rocas sedimentarias preservan información química e isotópica sobre la evolución de la corteza terrestre (Taylor y McLennan, 2009). La Tierra es un planeta dinámico donde ocurren diversos procesos de formación geológicos en el que, las placas tectónicas se mueven para formar montañas, ríos, lagos, océanos y se dan cambios atmosféricos que pueden afectar el clima de manera local y globalmente. Para poder estudiar y comprender estos procesos geológicos se necesita un registro del pasado que puede ser analizado por medio de las rocas presentes en los distintos estratos (Nichols, 2009).

El realizar una secuencia estratigráfica nos permite estudiar la relación existente entre rocas similares dentro de un marco cronoestratigráfico e inferir edades en donde existe poca evidencia geológica. Las secuencias y los componentes presentes en los estratos nos permiten hacer especulaciones sobre si hubo por ejemplo: un cambio global en el nivel del mar, el hundimiento gradual ya sea, parcial o completo de alguna porción de suelo o roca, el suministro o tasa de sedimentación, el grado de energía con el que se depositaron los sedimentos, etc. (Van Wagoner *et al.*, 1988). La edad relativa de las rocas y por ende los procesos que se registran en ellas pueden ser determinadas por medio del principio básico de la estratigrafía propuesto por Steno en 1669, que sugiere que la roca más joven va a encontrarse por encima de otra más vieja. Es así que cuando se disponen dos o más capas con estratos fosilíferos en una misma columna estratigráfica se dice que el que está por encima de la otra es más reciente y el de abajo más antiguo, aunque dicho método no nos da una edad absoluta, si representa una secuencia cronológica (Kardong, 2012). Una correlación entre dos localidades separadas se

hace comparando el contenido mineral y su estructura, dentro de estas capas es posible encontrar “fósiles índice” los cuales son fósiles que ocurrieron en un horizonte específico en el tiempo, ayudando a confirmar que dos capas de rocas son equivalentes en edad si contienen los mismos taxa aunque estén muy separados entre sí (Kardong, 2012).

La Sedimentología estudia la formación, transporte y depósito de materiales que se acumulan como sedimentos en los ambientes marinos y continentales, después estos sedimentos se compactan y consolidan para formar rocas sedimentarias (Vera-Torres, 1994). Estos estratos se forman y acumulan en zonas de diferentes tamaños llamadas cuencas sedimentarias, sus materiales de relleno registran la evolución paleogeográfica de la misma (Arche, 2010). Muchas de las secuencias sedimentarias que estudian sedimentólogos y estratígrafos provienen de ríos que rellenan las cuencas y pueden variar por el caudal, la carga, el tipo de sedimentos transportados y la pendiente del cauce (Arche, 1992). La combinación de la Sedimentología y la Estratigrafía nos ayuda a crear una imagen de la superficie terrestre en distintos lapsos temporales y espaciales que pueden ser relacionados (Nichols, 2009).

En Santa Fe del Río se registran varios eventos volcánicos de arena y ceniza distintos, también se identifican diversas capas de limos y arcillas relacionadas con corrientes acuáticas, las que pudieran asociarse con otros eventos climáticos y tectónicos dentro del estado o en el país, ilustrando como ha ido evolucionando el cambio climático, las cuencas y la fauna a lo largo del tiempo.

## **2. Antecedentes**

El realizar un estudio estratigráfico sistematizado nos permite reconocer información relevante acerca de las rocas sedimentarias y se puede interpretar mediante su descripción minuciosa, en las que se distinguen cambios que prevalecieron en el medio ambiente al momento de su formación. Al conocer y definir los distintos estratos en una columna estratigráfica es posible ubicar con certeza en los que

están presentes restos fósiles y en los que han sucedido diversos eventos sedimentarios (López-García, 2008).

Durante el Blancano en México la temperatura comenzó a descender lo que provocó zonas áridas y la expansión de áreas abiertas de vegetación (Potts y Behrensmeyer, 1992; Cerling et al., 1997; MacFadden, 2000). Dentro de las localidades más representativas del Blancano en el país son las de Yepómera y La Concha en Chihuahua Lindsay y colaboradores (1984), en las que se documenta el límite inferior entre el Henfiliano y el Blancano.

Otra localidad importante es la de Rancho Viejo en Guanajuato contiene *Glyptotherium*, *Glossotherium garbanii*, *Hypolagus mexicanus*, *Paranotolagus complicatus*, *Neochoerus cordobai*, *Borophagus diversidens*, *Nannippus peninsulatus*, y *Equus* sp., el material más abundante son los équidos, sobre todo *N. peninsulatus* (Carranza-Castañeda y Miller, 1980; 1988; Miller y Carranza-Castañeda, 1984). Pacheco en 2014, sugiere utilizar la especie *Sigmodon minor* como fósil índice para el Blancano en México, porque es una especie abundante en San Miguel de Allende. La fauna asociada se conforma por *Nannippus peninsulatus* y *Equus (Dolichohippus)* sp., estos taxones son índice para el Blancano (McGrew, 1948; MacFadden, 1984; MacFadden y Waldrop, 1980; Matthew, 1924; Stirton, 1940; Howe, 1970).

En Querétaro se tiene registro de un hiénido posiblemente *Borophagus diversidens*. En el estado de Jalisco se reporta la presencia de *Hypolagus*, *Neochoerus*, *Hemiauchenia*, *Platygonus* y *Equus simplicidens* (Carranza-Castañeda, 2006).

Para Michoacán se han realizado estudios geológicos y estratigráficos desde los cuarentas, sin embargo, no es hasta la década de los noventas que se hicieron estudios de este tipo desde un enfoque paleontológico con el fin de hacer una reconstrucción paleoambiental (Díaz Sibaja 2011). Dichos estudios se han enfocado principalmente en las cuencas de Cuitzeo y del Lerma.

Algunos trabajos previos para el estado incluyen a De Buen (1943), que como trabajo base considera que los lagos de Zirahuén, Pátzcuaro y Cuitzeo, formaron parte de una cuenca fluvial que desembocaba hacia el río Lerma, tomando en cuenta los criterios de la repartición geográfica, la disposición escalonada de los lagos y la similitud entre la ictiofauna, que por fallas tectónicas terminaron por separarse.

Para la cueca de Charo Onida *et al.*, (1995), realizó estudios estratigráficos, geológicos y micropaleontológicos, los cuales permitieron realizar la reconstrucción estratigráfica, sedimentológica y vulcanotectónica, así como la evolución climática de esta cuenca. Los sedimentos presentes según los autores tienen una edad que abarca desde el Mioceno superior hasta el Pleistoceno.

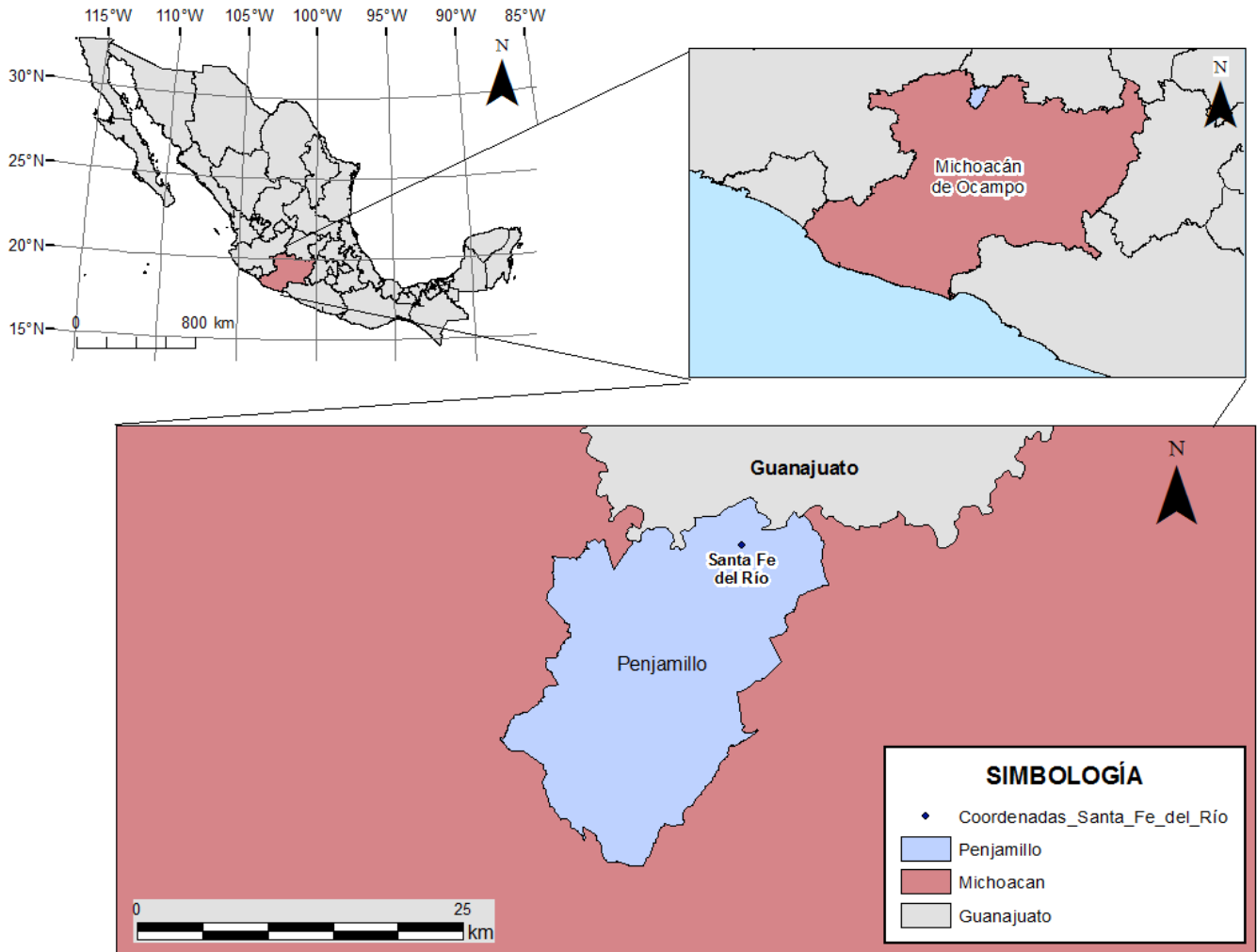
Con la ayuda de diatomeas, dataciones y estratigrafía Israde-Alcántara *et al.* (2002) realiza una reconstrucción del paleoambiente para el Cuaternario tardío en el lago de Cuitzeo, donde estima una edad de ca.120 Ka AP.

## **2.1 Marco geológico**

El Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) se forma durante el Mioceno tardío con la subducción de la placa de Cocos y Rivera, con dirección de E-W, estos volcanes son los más recientes en México, en particular muchos de los volcanes presentes en el Cinturón Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) se generan desde el Plioceno hasta la actualidad (Ferrari, 2000) (**Figura 1**). Más de 900 conos cineríticos conforman la formación de estos volcanes y es una de las regiones con vulcanismo monogenético más extensas del mundo (Robles-Camacho, 2010). Al generarse los volcanes se separaron diversos cuerpos de agua de los cuales algunos permanecen hasta ahora como en el caso de: el Lago de Chapala, Cuitzeo, Maravatio y Acambay, entre otros (De Buen, 1943; Álvarez, 1972; Suter y Johnson, 1992; Onida *et al.*, 1995). Santa Fe del Río (**Figura 2**) y la frontera del estado de Guanajuato se encuentran separados por pocos kilómetros de distancia, los divide el sistema hidrológico Lerma-Chapala.



**Figura 1.** Mapa del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano en gris oscuro, en amarillo se resalta el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. Tomado de: [http://paricutin.umich.mx/10\\_Paricutin\\_CVMG.html](http://paricutin.umich.mx/10_Paricutin_CVMG.html).



**Figura 2.** Mapa de Santa Fe del Río. Realizado en ArcGIS versión 10.3.

### 3. Material y Métodos

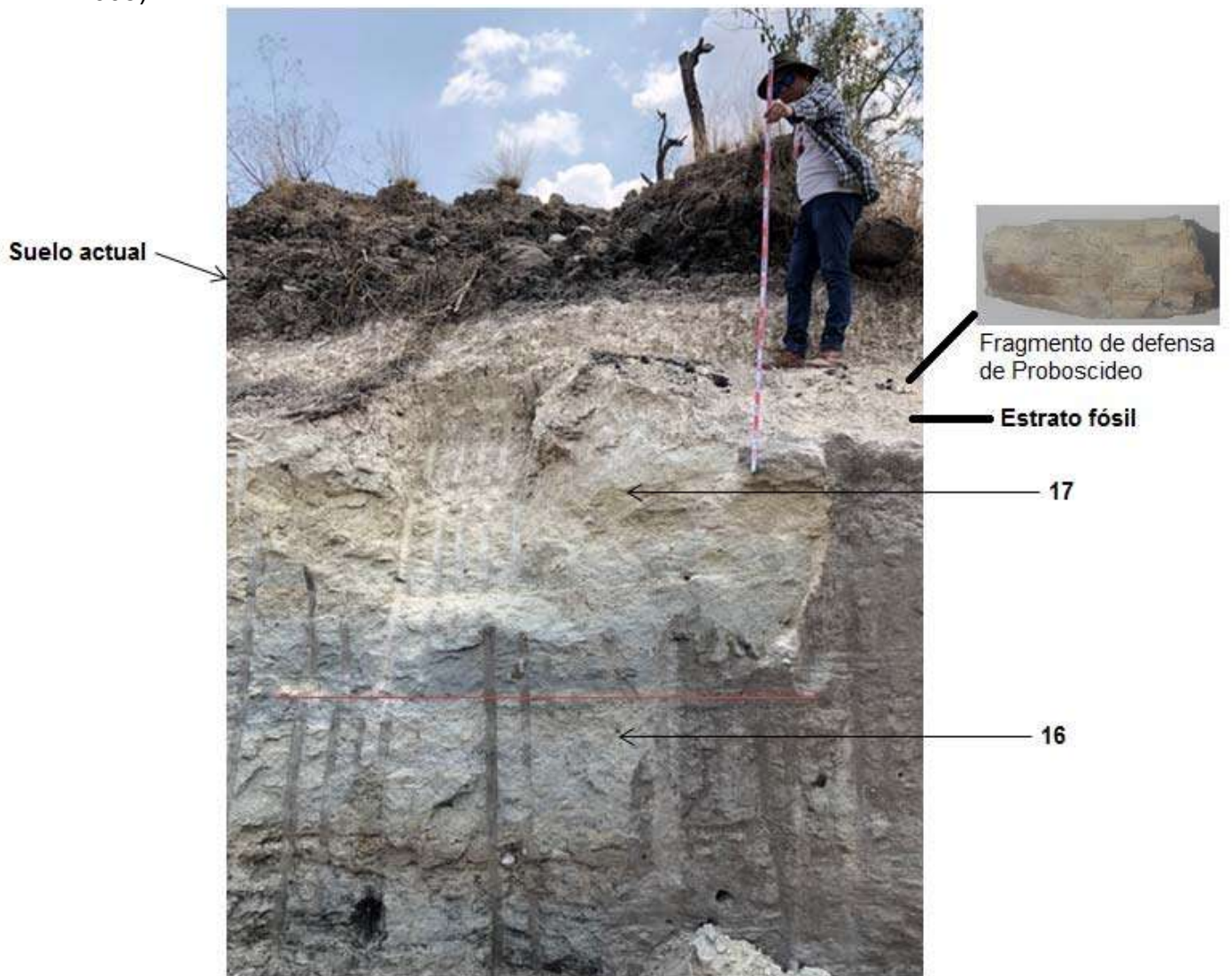
#### 3.1 Trabajo en campo

##### 3.1.1 Estratigrafía

Se registraron 5 horizontes en la columna estratigráfica en Lystad-Gray 2018, los horizontes 1 y 3 contienen restos fósiles separados por una capa grande de ceniza volcánica. Sin embargo, se propone ampliar la columna estratigráfica para poder

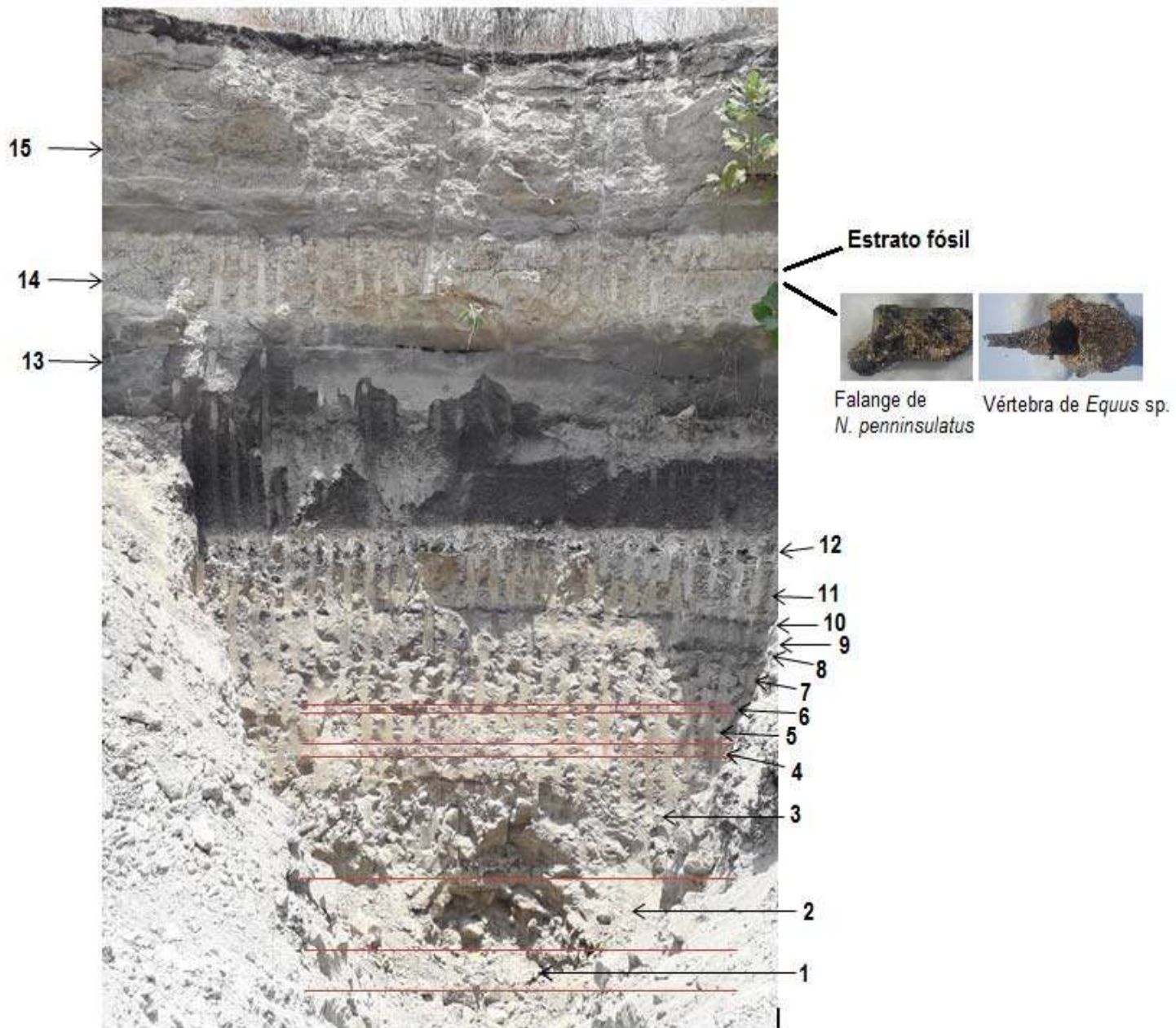
comprender mejor la dinámica de la formación de las distintas capas, con este fin se introdujo una máquina retroexcavadora en el banco de materiales, con la que se excavó y se descubrieron 17 horizontes en total, los cuales se describieron de la base a la cima (**Figura 3 y Figura 4**).

Al hacer el levantamiento de la columna estratigráfica se registran los datos siguientes: el color y litología, tipo de contacto, granulometría, espesores, orientación de clastos, diámetro de clastos, geometría de clastos, composición de líticos, las cuales depende de condiciones ambientales en el área (López-García, 2008).





**Figura 3.** Estratos 16 y 17 de la columna estratigráfica en campo de Santa Fe del Río.



**Figura 4.** Columna estratigráfica en campo del estrato 1 al 15 de Santa Fe del Río.





### **3.1.2 Sedimentología**

Para cada uno de los estratos se tomaron muestras de los sedimentos dentro de la columna estratigráfica de la base a la cima, para evitar que se contaminaran. Las muestras se separaron en contenedores de plástico y se etiquetaron con el número del horizonte al que pertenecían junto con la fecha y localidad.

### **3.2 Trabajo en laboratorio**

Para la preparación de la muestra se siguieron los siguientes pasos:

1. Se cuarteó un aproximado de 200 g de muestra, verificando que los granos de la muestra estén bien disgregados sin fragmentar los clastos.
2. Se dejó secar al aire para eliminar el exceso de humedad, se pesaron 100 g de muestra.
3. Se colocó la muestra en suspensión acuosa hasta disgregar los materiales.
4. Se lavó el material con agua en un tamiz del N° 200, con apertura de malla de 0.074 mm para eliminar arcillas.
5. La muestra se lavaron y secaron al aire libre para quitar el excedente de humedad.
6. Se obtuvo el peso perdido de arenas y arcillas al pesar de nuevo la muestra.

Tamizado:

1. Se registró en una base de datos el peso inicial de cada muestra como 100 g.
2. Se tamizó la muestra en una torre de tamices ordenados descendentemente, la cual se agitó cerca de 10 minutos.

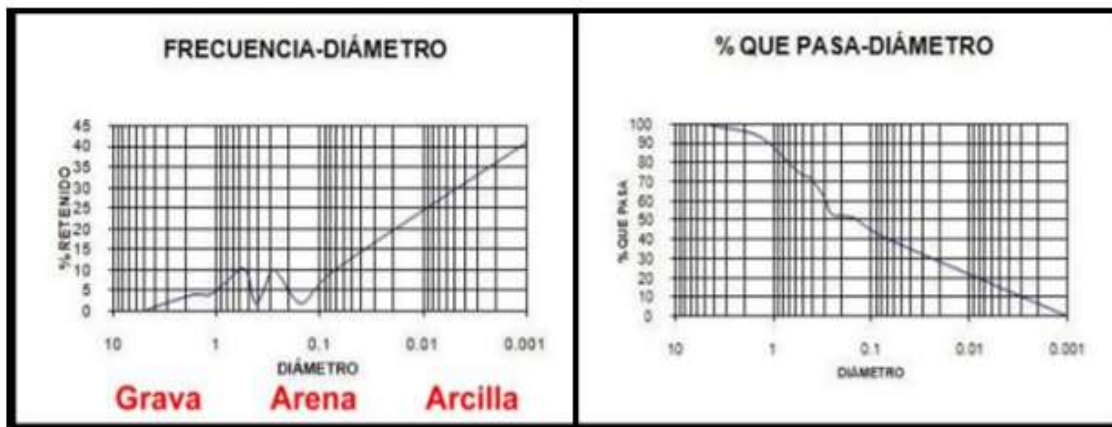
3. La muestra retenida en cada tamiz se pesó en una balanza con resolución de 0.1 g y se almacenó para futuros análisis en pequeñas bolsas ziploc con el nombre de la localidad, el número de la muestra y el tamiz (**Figura 5**).
4. Se limpiaron los tamices con brochas y cepillos para retirar las partículas adheridas.
5. El peso del material retenido en cada tamiz por sedimento se capturó en una base de datos para su posterior análisis granulométrico (López-García, 2008; Marín-Leyva, 2011; Díaz Sibaja, 2013).



**Figura 5.** Tamizado y almacenado de las muestras.

### 3.3 Trabajo de gabinete

Se analizaron los datos en una hoja de cálculo del programa Microsoft Office Excel con la que se obtuvo la frecuencia acumulativa relativa a la distribución de tamaños de los clastos con relación al porcentaje retenido (**Figura 6**). También se determinaron de modo manual los parámetros granulométricos (promedio, media, curtosis, asimetría, etc.) característicos de la muestra.



**Figura 6.** Gráfica de frecuencia acumulativa relativa. Tomado y adaptado de López-García, 2008.

## 4. Resultados

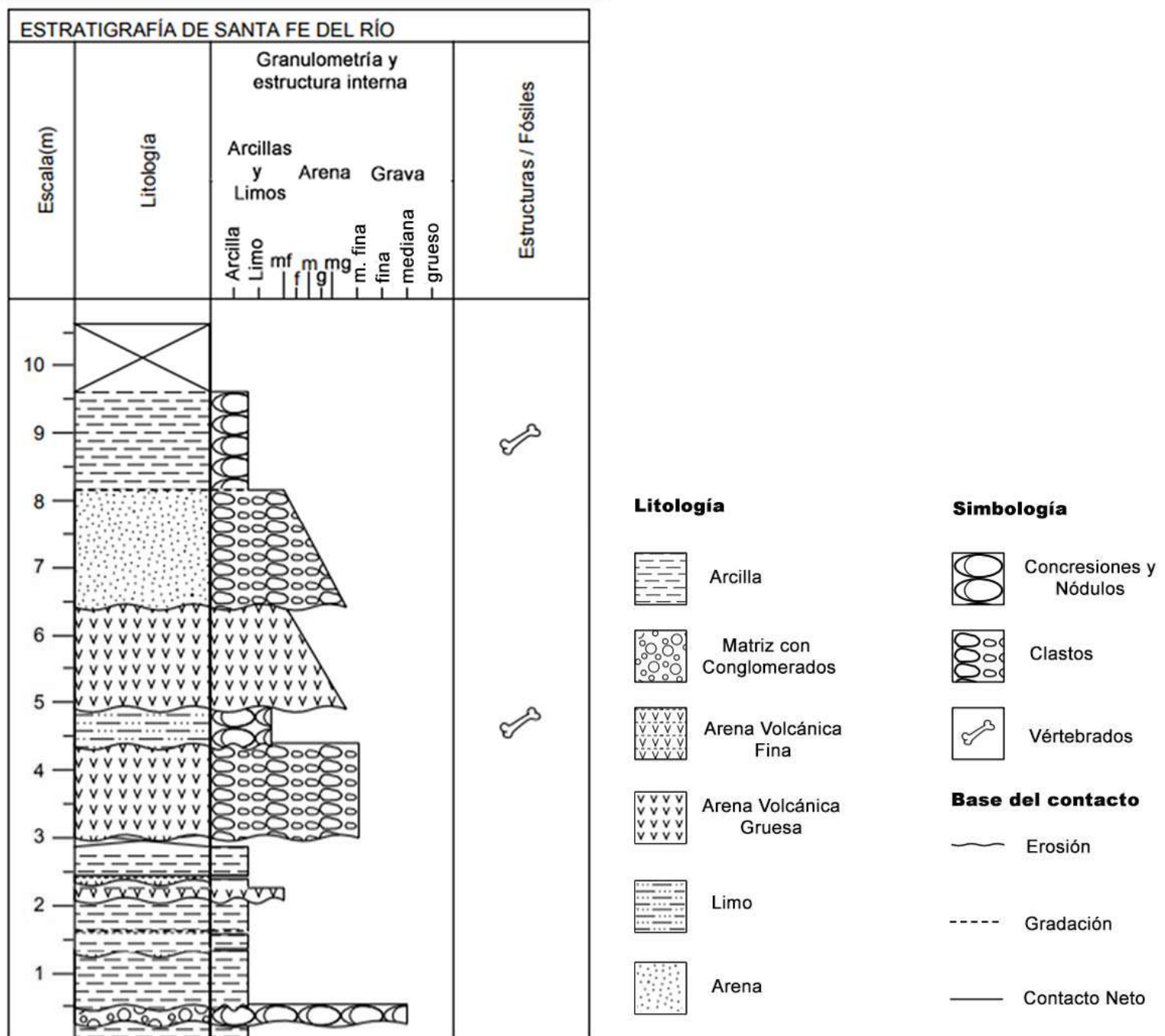
### 4.1 Columna estratigráfica

Se describe la siguiente columna dispuesta en estratos de manera paralela y horizontal de la base a la cima realizada a detalle de Santa Fe del Río.

1. Se presenta una capa de 30cm de arcilla limosa compacta y dura de color café lechoso. El contacto superior se encuentra fuertemente erosionado.
2. 25cm de canal con clastos grandes de hasta 20cm de basalto, con una matriz arcillosa limosa de color café u ocre amarillo de tipo fluvial. Contacto superior erosionado.
3. 80cm de arcilla limosa color café lechoso fuertemente compactada. Con contacto superior erosionado.
4. 3 cm de ceniza volcánica con proceso de arrastre. Contacto superior erosionado.
5. 20cm de arcilla limosa café lechosa poco compactada. Contacto superior neto.
6. 5cm de arcilla fina de color gris poco compactada. Contacto superior moderadamente erosionado transicional.
7. 50 cm de arcilla limosa café lechosa poco compactada. Contacto superior ligeramente erosionado.

8. 12 cm de arena volcánica gris oscuro. Contacto superior ligeramente erosionado transicional.
9. 12 cm de arcilla limosa color café lechoso. Intemperizado con ocasionales concreciones carbonosas y arena abundante. Contacto superior medianamente erosionado.
10. 5 cm de arena volcánica fina de color gris oscuro. Contacto superior neto.
11. 42 cm de arcilla limosa de color café lechoso con inclusiones de partículas ferrosas. Contacto superior erosionado.
12. Capa de 18 cm de matriz arcillosa que envuelve concreciones carbonosas con evaporitas muy duras. Contacto superior erosionado.
13. 135 cm de arena volcánica de flujo piroclástico con clastos mayores a 3 cm de diámetro. Con inclusiones carbonosas. Contacto superior fuertemente erosionado con espacios transicionales.
14. 55 cm de limo arenoso poco compactado con inclusiones carbonosas. Contacto superior erosionado. En este estrato se han encontrado restos fósiles de mamíferos, aves, reptiles, anfibios y peces, incluyendo la presencia de una falange de *Nannippus peninsulatus*, fósil índice del Blancano, aunado a pocos restos de planórbidos. Los fósiles son de un color café oscuro, los que parecen haber tenido un grado de intemperización tiene un color café claro y pocos fósiles son de color negro.
15. 150 cm de arena volcánica piroclástica de color oscuro con intercalaciones de arenas finas con clastos de hasta 2 cm formando capas de entre 5 a 10 cm de color gris, gris claro y oscuro muy compactadas. Con inclusiones carbonosas. Contacto superior erosionado.
16. 170 cm de arenas finas y gruesas fuertemente compactadas con clastos de entre 1 y 2 cm. Contacto superior erosionado.
17. 145 cm de arcilla limosa color café lechoso con la presencia de concreciones algunas muy duras y otras frágiles al tacto. Contacto superior transicional. Este estrato posee restos fósiles de algunos peces, reptiles y mamíferos, de color crema y blancos, ocasionalmente con parches grises o negros.

18. Se describe 1 metro de suelo color negro por encima del último estrato con roca volcánica y basalto (**Figura 7**).



**Figura 7.** Columna estratigráfica de Santa Fe del Río. Elaborada con el programa SedLog 3.0.

## 4.2 Sedimentología

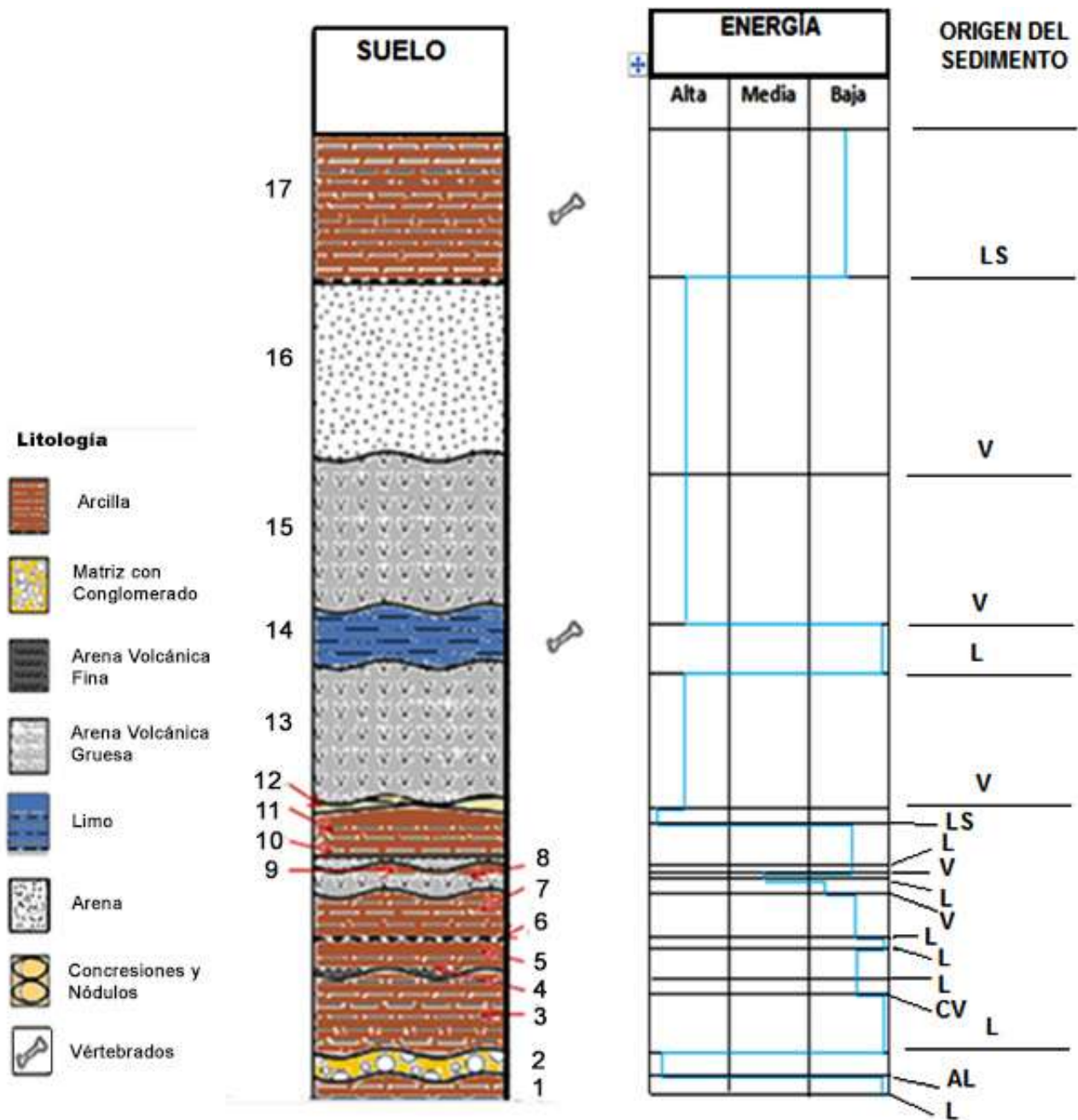
El estudio granulométrico nos permite identificar las condiciones de energía que se dieron en el momento de depósito de los sedimentos. Para hacer la interpretación se utilizaron gráficas en las que se ve representado el grado de energía en base a tres aspectos; de alta energía aquellos depósitos granulares gruesos, como arenas, gravas y conglomerados o aglomerados; media energía para depósitos de arenas finas, muy finas y limos; y de baja energía para depósitos finos de arcillas.

En la **Figura 8** se pueden observar los cambios en el grado de energía a lo largo de la columna. Cerca de la base en el estrato 1 se depositaron arcillas lo cual, requiere de baja energía, se compone de más de 45% de arcilla. El estrato 2 posee una matriz limo arcillosa (15%) con grandes clastos (hasta 30% presentes en la muestra). El estrato 3 tiene un comportamiento similar al uno (energía baja) por su naturaleza arcillosa (50%). El estrato 4 que también es de baja energía se define por la presencia de una fina capa de ceniza volcánica (arcilla 45%) con proceso de arrastre. El estrato 5 está formado de arcilla (más del 30%) limosa (10%) poseen un grado de energía baja pero levemente más fuerte que en los estratos uno y tres. El estrato 6 consiste de arcilla (70%) gris con un grado de energía baja. El estrato 7 otra arcilla (70%) de color café lechoso posee un grado de energía bajo similar al estrato cinco y cuatro. En el estrato 8 una arena volcánica (composición más del 15% de limo y más del 25% de arcilla) sube el grado de energía pero no lo suficiente para considerarse intermedia. En el estrato 9 la energía sube a intermedia con la presencia de una arcilla (20%) y concreciones café lechoso. En el estrato 10 de nuevo baja la energía con la presencia de una arena volcánica fina (25%) de color gris. Estrato 11 con una arcilla (más del 30%) café lechoso y energía baja. En el estrato 12 (composición 80%) se registra un aumento de energía similar al estrato dos pero con la presencia de concreciones. En el estrato 13 con la presencia de arena volcánica (50%) permanece un alto grado de energía un poco menor al estrato anterior. El estrato 14 desciende de nuevo el nivel hasta el nivel bajo de energía con hasta 40% de arcillas. Los estratos 15 y 16 presentan un alto grado de energía con arena volcánica y arena (más del 35% y 40%) respectivamente. Por

último el estrato 17 tiene un nivel bajo de energía con la presencia de arcilla (25%) café lechoso y la presencia de vertebrados fósiles. En la **Figura 9** se observan las curvas de frecuencia sobre diámetro que indican el porcentaje de gravas, arenas y limos de cada estrato. Los estratos 1, 3, 5, 6, 7, 9, 11, 14 y 17 poseen arcillas asociadas a ambientes de baja energía. Los estratos 8, 10, 13, 15 y 16 son de un tipo de energía media y alta, se conforman principalmente de arena y grava volcánica gruesa. Por encima se encuentra una gran capa de suelo perdiéndose ahí la presencia de la roca sedimentaria.

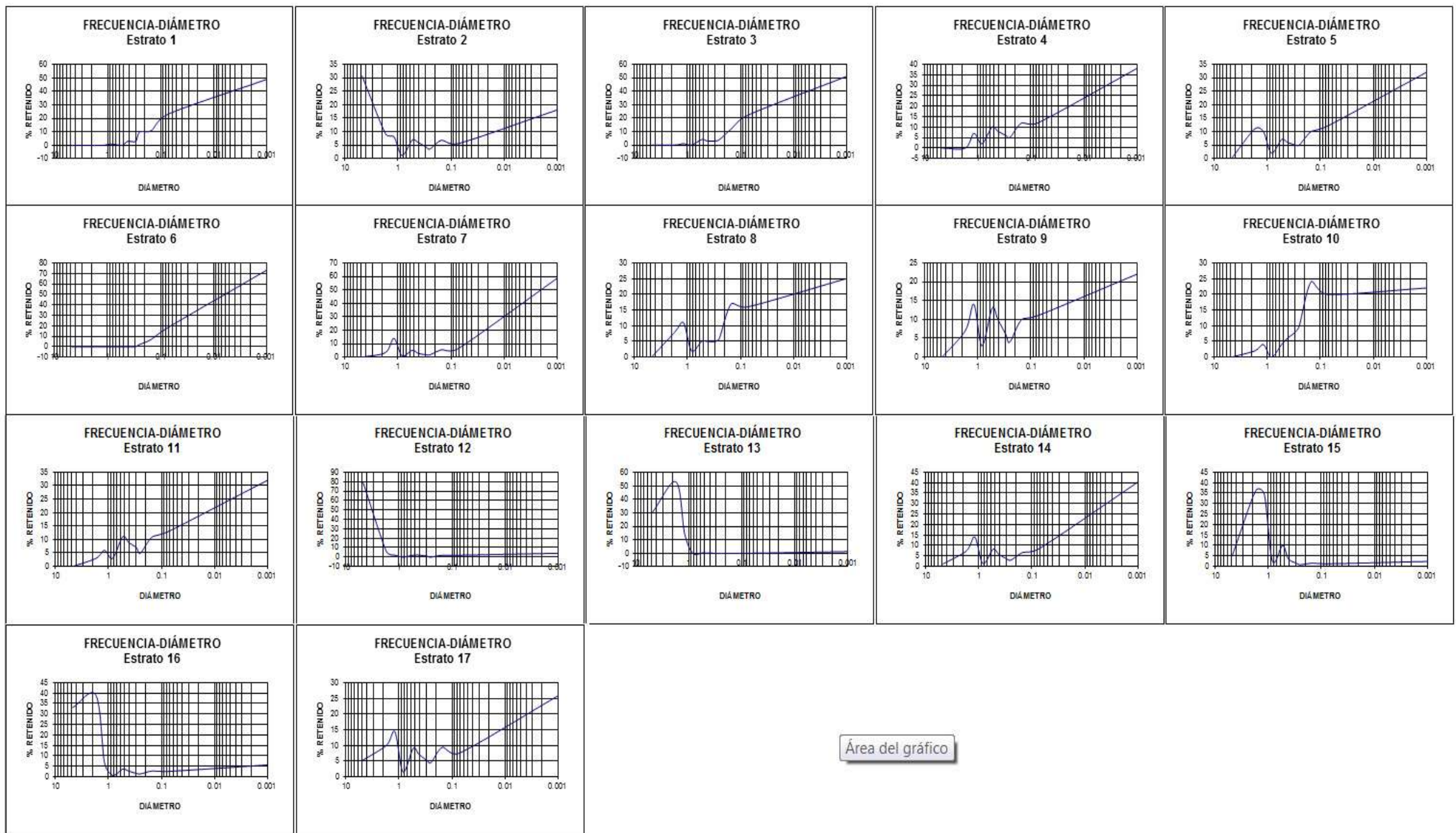


### Columna estratigráfica con los grados de energía



CLAVE: AL= aluvial CV= ceniza volcánica L= lacustre LS= lacustre somero V= volcánico

Figura 8. Columna estratigráfica con los niveles respectivos de energía de cada estrato.



**Figura 9.** Curva de energía granulométricas de cada estrato que reflejan la frecuencia con el diámetro.

## 5. Discusión

Con el presente trabajo se efectúa un levantamiento estratigráfico más completo de Santa Fe del Río del que se tenía descrito por Lystad-Gray (2018), en el que se describen solamente 5 estratos en la columna, aumentado a un total de 17 estratos incluidos los previamente descritos con distintos eventos sedimentarios y 2 estratos con presencia de fósiles. Con ayuda de la sedimentología se logra definir de manera clara los ambientes de depósito presentes en los estratos observando distintos cambios climáticos y tectónicos a lo largo de la columna por medio de la descripción de los sedimentos, su composición granulométrica y el grado de energía. Las *Litofacies* están divididas en zonas que representan litologías diferentes y eventos tectónicos importantes en la columna. Mientras que, las *Biofacies* representan los eventos biológicos importantes reconocidos dentro de la columna.

### *Litofacies*

#### Zona 1 (de 0 cm a 30 cm)

En el estrato 1 la columna contiene una arcilla con un grado bajo de energía. De acuerdo con estudios realizados por Arche (1992) y Vera-Torres (1994) este tipo de sedimentos son indicativos de ambientes de cuerpos de aguas tranquilas como en el caso de un lago en el que el acarreo de partículas en una corriente es gradual y lento.

#### Zona 2 (de 31 cm a 55 cm)

El estrato 2 tiene la presencia de una matriz arcillosa con conglomerados grandes, el acarreo de conglomerados en una corriente de agua requiere de un alto grado de energía, lo cual se relaciona con la llegada repentina de material grueso asociado con deltas que ingresaron al lago durante periodos de humedad o fluviales con textura granosostenida o flotante sin gradación ni orden. En ocasiones se producen eventos de alta energía como la ruptura de una presa natural o artificial, la cantidad de terrígenos y la velocidad del cauce se ven alterados significativamente en

comparación con los sedimentos depositados con baja energía, en los que se llegan a transportar materiales de gran tamaño, de granulometría variadas y que no se ha llegado a seleccionar, dejando evidencia en el registro geológico (Scott y Gravlee, 1968) similar al caso del estrato 2 de alta energía.

Zona 3 (56 cm a 135 cm)

El estrato 3 pertenece a una arcilla de baja energía con las mismas características de acarreo que el estrato 1, indicando que las condiciones del cuerpo de agua se tranquilizan y se estabilizan nuevamente.

Zona 4 (136 cm a 138 cm)

El estrato 4 se caracteriza por la presencia de una delgada capa de ceniza volcánica con proceso de arrastre de baja energía, aunque es un evento tectónico leve se separa de las facies 3 y 5 para distinguirlo entre el resto de eventos de la columna, este tipo de estratos indican por la erosión del contacto inferior y granulometría fina que provienen de una fuente alejada del lago cuyos productos se depositaron primero y después se erosionaron y fueron transportados dentro del lago (López-García, 2008), el vulcanismo puede afectar cuencas alejadas cientos de kilómetros de ellas, en consecuencia es posible observar cenizas volcánicas muy lejos de su origen (Farooqui *et al.*, 2009). Dado que el estrato es muy delgado parece ser que el evento de ceniza volcánica no fue un evento prolongado, este es el primer evento tectónico presente en la columna.

Zona 5 (de 139 cm a 213 cm)

Se consideran como una unidad por la similitud en litología y el grado bajo de energía. En esta zona cesa la actividad volcánica. Los estratos 5, 6, y 7 son arcillas en las que se sugiere que permanecen condiciones de cuerpos de aguas tranquilas y estables similares a las del estrato 1 y 3.

Zona 6 (214 cm a 225 cm)

En el estrato 8 se encuentra una arena volcánica que indica un aumento ligero en el grado de energía, pero no lo suficiente para considerarse en grado medio de energía, siendo este un segundo evento volcánico más fuerte que el descrito en la zona 4 y posiblemente de tipo local, el tipo de contacto ligeramente erosionado y el hecho de que las arenas presentan poco redondeo sugieren que no son de arrastre. A diferencia de las cenizas volcánicas estas son más ligeras que las gravas y arenas volcánicas, por esta razón no alcanzan a ser transportadas a distancias tan alejadas de su origen como en el caso de las cenizas (Cremona *et al.*, 2011).

Zona 7 (de 226 cm a 237 cm)

El estrato 9 contiene una arcilla dentro de la cual se envuelven concreciones. Es un estrato de baja energía y granulometría fina. La presencia de concreciones, es más frecuente en ambientes someros que profundos (Dietrich, 1999) lo que sugiere una disminución en la columna de agua y un lapso de tiempo de mayor sequía que en los estratos previos como en un ambiente pantanoso en los que se acumulan restos de materia orgánica por ejemplo (Flores *et al.*, 2012). Cuando hay concreciones carbonosas se forman por una precipitación de ciertos minerales en porciones localizadas de la roca, sugiriendo la presencia de materia orgánica en el estrato y la posibilidad de un pH alcalino (Ponce *et al.*, 2018). Por otra parte Coleman y Raiswell (1993) indican como requisito para el crecimiento de una concreción, la permanencia dentro de un ambiente geoquímico específico durante un tiempo considerable (> 7000 años).

Zona 8 (238 cm a 242 cm)

El estrato 10 consiste de una arena volcánica de alta energía, con flujos piroclásticos como en el estrato 9 pero aún más intenso, indicando una fuerte actividad volcánica local.

Zona 9 (de 243 cm a 284 cm)

El estrato 11 es una arcilla de energía baja terminando así la actividad volcánica, reincorporándose de nuevo el sedimento lacustre.

#### Zona 10 (285 cm a 302 cm)

El estrato 12 marca el deceso de agua por la presencia de concreciones. Sin embargo, el grado de energía permanece alto, esto puede deberse a la alta tasa de precipitación presente en el lago debido al pH y poca profundidad del mismo, de modo que la muestra contiene alta cantidad de concreciones y reducida en arcilla o limos, pero esto no significa que existiera necesariamente una corriente de agua fuerte, esto sugiere que en realidad la energía es baja y con altas tasas de precipitación. Este es el estrato con concreciones de mayor tamaño y con menos matriz, sugiriendo que fue el estrato que más seco estuvo de toda la columna.

#### Zona 11(303 cm a 437 cm)

En el estrato 13 aparece de nuevo una fuerte actividad volcánica con arena de alto grado de energía similar al estrato 10 pero más prolongado.

#### Zona 12 (438 cm a 492 cm)

El estrato 14 consiste del único limo en la columna, el cual indica un aumento en la cantidad de agua que ingresaba al lago sugiriendo un posible incremento en la profundidad comparado con los estratos con arcillas, sin embargo este estrato es de baja energía y el lago sigue considerándose tranquilo y estable. Además contiene restos de diversos fósiles de vertebrados terrestres y de agua dulce.

#### Zona 13 (493 cm a 812 cm)

Los estrato 15 y 16 son estratos con alto grado de energía, indicativos de actividad volcánica fuerte, estas dos facies en conjunto son las más amplias dentro de la columna (320 cm en total) y es el evento volcánico más prolongado de cualquiera de los anteriores. La composición granulométrica sugiere que la actividad volcánica fue mayor en la parte inferior dado que, el tamaño de grano es más grueso al igual

que los clastos en este estrato y va disminuyendo de intensidad al subir en la columna al hacerse más fino. Durante el Plio-Cuaternario sucedieron una serie de eventos tectónicos que dieron lugar al Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato en el que se produjeron una serie de volcanes de cono pequeños al norte del estado de Michoacán (Ferrari, 2000; Hasenaka et al., 2012), lo que concuerda con la temporalidad y los eventos volcánicos locales representados en la columna estratigráfica.

#### Zona 14 (813 cm a 957 cm)

El estrato 17 la última roca sedimentaria de la columna es una arcilla con pequeñas concreciones, indicando una reducción en la columna de agua correspondiendo a un ambiente de tipo somero como en los estratos 9 y 12. También tiene restos de vertebrados fósiles terrestres y acuáticos.

#### *Biofacies*

El fósil índice *Nannippus peninsulatus* presente en el estrato 14 sugiere una edad de Blancano o Plio-Pleistoceno para este estrato (Lystad-Gray, 2018), este taxón nos permite correlacionar con otras localidades dentro del estado de Michoacán como en el caso de La Goleta (Arellano y Azcón, 1949) y el Pirul en el municipio de Charo (López-García, 2008), Uruétaro en el municipio de Tarímbaro (Gutiérrez-Bedolla, 2011), la Cañada de los Cuatro Vientos y Las Encinillas (López-García, 2008; Guzmán, 2015), asociados al lago de Cuitzeo y Misión del Valle en el municipio de Morelia (Plata, 2017) con presencia de fósiles del Blancano. Además de la existencia de *Nannippus peninsulatus* en el estrato se han encontrado fósiles de vertebrados acuáticos como peces, tortugas y aves asociados a cuerpos de agua dulce. La presencia de fósiles en el estrato 17 sugiere que es más reciente que el estrato 14 de edad Blancano de acuerdo con el principio de superposición, en este estrato también se tiene la presencia de taxones de agua dulce como peces y tortugas, aunado a esto el grado de energía que prevalece en el ambiente indica un cuerpo de agua tranquilo, pero las concreciones sugieren que el cuerpo de agua era somero. Dada la cercanía del sistema hidrológico del río Lerma-Chapala es

probable que el paleolago de Santa Fe del Río estuviera asociado a él (Lystad-Gray, 2018).

## **6. Conclusiones**

1. Los patrones en la red hidrológica del paleolago de Santa Fe del Río se vieron afectados por eventos de estabilidad y tranquilidad (arcillas y limos de los estratos 1, 3, 5, 6, 7, 11 y 14), por un evento fluvial cerca de la base de la columna (estrato 2 con matriz arcillosa y grandes clastos), por tres eventos de sequía (estrato 9, 12, 17 con concreciones) y de vulcanismo con ceniza volcánica (estrato 4) y de flujo piroclástico (8, 10, 13, 15 y 16) hasta su desaparición (suelo actual).

2. Mediante el estudio sedimentológico y las diferentes curvas de energía presentes en cada facies fue posible hacer una reconstrucción de los diferentes ambientes, los cambios climáticos y los eventos tectónicos, usando como base las muestras de sedimentos que se tomaron del paleolago de Santa Fe del Río.

3. El ambiente en el que se formaron los sedimentos lacustres de las biofacies inferior y superior son de baja energía. La edad asignada al estrato 14 concuerda con los eventos volcánicos descritos para el CVMG en estudios previos, sugiriendo que también se dieron durante el Blancano o más recientemente. La biofacies superior (estrato 17) no presenta fósiles índice que se hayan encontrado hasta ahora pero podrían ayudar en la asignación de una edad relativa si se llegaran a encontrar. Para los demás estratos no es posible asignar una edad pero puede ser objeto de estudios futuros.



## 7. Literatura citada

- Alvarez, J. 1972 Ictiología Michoacana V. Origen y distribución de la Ictiofauna dulceacuícola de Michoacán, An. Esc. Nac. Cienc. Biol., México, D. F., 19 (1-4) pp 155-161.
- Arche, A. 1992. Sedimentología. Volumen I, nueva edición. Análisis de facies y de cuencas sedimentarias. Instituto de Geología Económica, Consejo Superior de Investigación Científica. Facultad de Ciencias Geológicas, Madrid. pp 13-50.
- Arche, A. (2010). Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria – Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España. Links, 28-33.
- Arellano, A. R. V. y E. Azcón.1949. Pre-Equus horses from Goleta (Morelia) Michoacan, Mexico. Bulletin of the Geological Society of America 60:1871.
- Cremona, M. V., Ferrari, J., & López, S. (2011). Las cenizas volcánicas y los suelos de la región. Revista Presencia, 57, 8-11.
- Coleman, M. L., y Raiswell, R. (1993). Microbial mineralization of organic matter: mechanisms of self-organization and inferred rates of precipitation of diagenetic minerals. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences, 344(1670), 69-87.
- De Buen, F. 1943. Los lagos Michoacanos, I Caracteres Generales el lago de Zirahuén. Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural. Tomo IV. Nos. 3 y 4
- Díaz-Sibaja 2013. Los Rumiantes (Ruminantia: Bovidae y Cervidae) del Pleistoceno (Rancholabreano) de dos sitios del Centro-Occidente de México. Tesis de maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.

- Dietrich, R. V. (1999). Rock chips: Carbonate concretions, part 1. *Rocks & Minerals*, 74(4), 266-269.
- Farooqui, M. Y., Hou, H., Li, G., Machin, N., Neville, T., Pal, A., Shrivastava, C., Wang, Y., Yang, F., Yin, C., y Zhao, J. y Yand, X. (2009). Evaluating volcanic reservoirs. *Oilfield Review*, 21(1), 36-47.
- Flores, D. A., & Mirambell, L. E. 2012. Cambios paleoclimáticos durante el Pleistoceno-Holoceno en un área semidesértica, Cedral. Rancho "La Amapola", Cedral. Un sitio arqueológico-paleontológico pleistocénico-holocénico con restos de actividad humana: México DF, Colección Interdisciplinaria-Serie Memorias-INAH, 87-146.
- García-Zepeda, M. L. 2006. Nuovi dati paleontologici dalla depressione lacustre di Cuitzeo, Michoacán, México. Università degli studi di Firenze, Italia. Tesis doctoral.
- Gutiérrez-Bedolla, M. 2011. Estudio paleontológico y estratigráfico de Uruétaro, municipio de Álvaro Obregón, Michoacán. Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de licenciatura. 81pp.
- Guzmán, A. F. 2015. El registro fósil de los peces mexicanos de agua dulce. *Revista mexicana de biodiversidad*, 86(3), 661-673.
- Hasenaka, T., Ban, M., & Granados, H. D. (2012). Contrasting volcanism in the Michoacan-Guanajuato Volcanic field, central Mexico: shield volcanoes vs cinder cones. *Geofísica Internacional*, 33(1).
- Hedberg, H. D. (Ed.). 1980. *Guía Estratigráfica Internacional: guía para la clasificación, terminología y procedimientos estratigráficos*. Reverté.
- Israde-Alcantara, I. et al., 2002. Paleoambiente lacustre del Cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo. *Hidrología* 2002, 12 (1). pp 61-78.
- Israde-Alcántara, I., Velázquez-Durán, R., Lozano García Ma., Domínguez Vázquez, G., Garduño-Monroy, V. H., 2010, Evolución Paleolimnológica del

- Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 62 (3), pp. 345-357.
- Kardong K.V. 2012. Vertebrates: Comparative Anatomy, Function, Evolution. 6<sup>th</sup> Edition. McGraw Hill.
- López-García, J. R. 2008. Estudio estratigráfico, sedimentológico y paleontológico de la región de Indaparapeo-Charo, Paleolago de Cuitzeo, Michoacán, México 2008. Tesis de maestría: Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.
- Marín-Leyva, A. H. 2011. Caballos del Pleistoceno y sus paleoambientes en dos cuencas de Michoacán, México. Facultad de Biología, PIMCB, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Maestría.
- Nichols, G. 2009. Sedimentology and stratigraphy. John Wiley & Sons. Onida M., Sabatini D., Israde-Alcantara I., Garduño V.H. (1995) -Evoluzione del Bacino Lacustre Neogenico di Charo (Michoacan, Messico). Rendiconti. Istituto Lombardo, Academia di Scienze e Lettere. Vol. 129. Fasc. 2. pp 325-341.
- Onida M., Sabatini D., Israde-Alcantara I., Garduño V.H. 1995. Evoluzione del Bacino Lacustre Neogenico di Charo (Michoacan, Messico). Rendiconti. Istituto Lombardo, Academia di Scienze e Lettere. Vol. 129. Fasc. 2. pp 325-341.
- Plata-Ramírez R.A. 2017. Dieta y el hábitat mastofauna del Blancano. Trabajo de Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Ponce, J. J. Montagna A. O., Carmona N. 2018. Atlas de estructuras sedimentarias inorgánicas y biogénicas: descripción, análisis e interpretación a partir de afloramientos, testigos corona y registros de imágenes de pozo 1a edición para el alumno. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Fundación YPF.

- Robles-Camacho, J., Corona-Chávez, P., Morales-Gómez, M., Guzmán, A. F., Polaco, Ó. J., Domínguez-Vázquez, G. y Oliveros-Morales, A. 2010. Estratigrafía y paleoambiente asociados a un Gomphoteriidae (*Cuvieronius hyodon*) en Tzintzuntzan, Michoacán, México. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 27(3), 530-544.
- Scott, K. M. y Gravlee, G.C., Jr. 1968. Flood surge of the Rubicon River, California-hydrology hydraulics and boulder transport. *US Geol. Survey Prof. Paper*, 422-M, 1-40.
- Suter, M., Quintero, O., y Johnson, C. A. (1992). Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico 1. The Venta de Bravo Fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B8), 11983-11993.
- Taylor, S. R. y McLennan, S. 2009. *Planetary crusts: their composition, origin and evolution*. Cambridge University Press.
- Vera-Torres, J. A. 1994. *Estratigrafía: Principios y Métodos*. Madrid. Rueda
- Van Wagoner, J. C., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M. J., Vail, P. R., Sarg, J. F., Loutit, T. S. y Hardenbol, J. 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions.

## **Capítulo 2. Fauna Fósil e interpretación tafonómica y paleoambiental de Santa Fe del Río.**

**Robert Diego Lystad Gray<sup>1</sup>, Javier Ponce Saavedra<sup>2</sup>, Alejandro H. Marín Leyva<sup>1</sup>, María Luisa García Zepeda<sup>1</sup>, Joaquín Arroyo-Cabrales<sup>3</sup>, Peter Schaaf<sup>4</sup>**

*<sup>1</sup>Laboratorio de Paleontología, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. R 2° Piso, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>2</sup> Laboratorio de Entomología “Biol. Sócrates Cisneros Paz”, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. B4 2° Piso, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>3</sup> Laboratorio de Arqueozoología “M. en C. Ticul Álvarez Solórzano”, Subdirección de laboratorio y Apoyo Académico, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Moneda #16, Col. Centro, 06060, Ciudad de México, México.*

*<sup>4</sup> Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS), Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, 04150, Ciudad de México, México.*

### **Resumen**

Se conocen seis localidades fósiles de la NALMA (edad de mamíferos terrestres de América del Norte) del Blancano en el estado de Michoacán, México, incluyendo el reciente registro de Santa Fe del Río donde se realizó el estudio. En el presente trabajo se lleva a cabo la identificación de restos fósiles provenientes de dos estratos 17 (superior) y 14 (inferior) dentro de la columna estratigráfica de la localidad, aquellos que fueron identificados se analizaron para conocer el grado de intemperismo y fragmentación que poseen. El estudio tiene como objetivo elaborar un listado taxonómico de los restos fósiles identificables que provengan de ambos estratos fosilíferos. Los fósiles identificados de los estratos 17 (superior) y 14 (inferior) suman un total de 46; 11 provenientes del estrato superior y 35 del estrato inferior. Los resultados indican que los fósiles provenientes del estrato 14 poseen un grado bajo de intemperismo y fragmentación, mientras que los fósiles del estrato

17 tienen un grado alto. El estrato superior tiene la presencia de ciprínidos, serpientes, roedores (*Sigmodon* sp.) y proboscídeos, el estrato inferior incluye tres familias de peces (Cyprinidae, Aterinidae e Ictaluridae), anfibios (*Lithobates* sp.), tortugas (*Kinosternon* sp.), serpientes (*Lampropeltis* sp. y *Thamnophis* sp.), lagomorfos (*Hypolagus vetus*), roedores (*Sigmodon minor*) équidos (*Equus* sp. cf. *Equus simplicidens*) y proboscídeos. Se concluye por la escala de intemperismo y fragmentación que los fósiles del estrato inferior no estuvieron expuestos al medio ambiente y tuvieron un enterramiento rápido después de su muerte, por otra parte los del estrato superior fueron arrastrados por corrientes de agua y expuestos al ambiente antes de depositarse. Se registra por primera vez la presencia de serpientes, la familia Cyprinidae y *Sigmodon* sp. en el estrato superior, en el estrato inferior se registran dos taxones de mamíferos nuevos (*S. minor* y *H. vetus*), la presencia de dos géneros nuevos de serpientes (*Thamnophis* sp. y *Lampropeltis* sp.) y dos familias nuevas de peces (Aterinidae e Ictaluridae) en la localidad de Santa Fe del Río.

**Palabras clave:** Blanco, intemperismo, fragmentación, columna estratigráfica.

### **Abstract**

There are six fossil sites belonging to the NALMA (North American Land Mammal Ages) of the Blanco in the state of Michoacan, Mexico, including the recent register of Santa Fe del Río where the study was done. In the present work the identification of fossil remains coming from two fossiliferous strata within the stratigraphic column of the site took place; strata 17 (superior) and 14 (inferior). The fossils that were identified were analyzed to know their degree of weathering and fragmentation. The objective of the study is to elaborate a taxonomic list from the identifiable fossils coming from both of the strata. The fossils identified from the strata 17 (superior) and 14 (inferior) include a total of 46; 11 from the superior strata and 35 from the inferior one. The results indicate that the fossils from the strata 14 possess a low degree of weathering and fragmentation, while the fossils from the strata 17 have a

high degree. The register of the superior strata includes the presence of cyprinids, snakes, rodents (*Sigmodon* sp.) and proboscideans; the register of the inferior strata includes three fish families (Cyprinidae, Aterinidae and Ictaluridae), amphibians (*Lithobates* sp.), turtles (*Kinosternon* sp.), snakes (*Lampropeltis* sp. and *Thamnophis* sp.), lagomorphs (*Hypolagus vetus*), roedents (*Sigmodon minor*), equines (*Equus* sp. cf. *simplicidens*) and proboscideans. It's possible to conclude from the weathering and fragmentation scale that the fossils from the inferior strata were no exposed to the environment and were buried rapidly after death. On the other hand the fossils from the superior strata were dragged by water currents and exposed to weathering conditions before they were deposited. The presence of snakes, the family Cyprinidae and *Sigmodon* sp. are new registers for the superior strata, the inferior strata includes the register of two new mammal taxa (*S. minor* y *H. vetus*), two new snake genus (*Thamnophis* sp. y *Lampropeltis* sp.) and two new fish families (Aterinidae and Ictaluridae) at the Santa Fe del Río fossil site.

**Key words: Blancan, weathering, fragmentation, stratigraphic column.**

## 1. Introducción

En 1941 Wood y colaboradores describen a la NALMA (North American Land Mammal Ages) del Blancano basándose en la fauna del Cerro Blanco en el condado de Crosby, Texas, del cual se conocen cientos de localidades desde Canadá hasta América Central, abarcando desde un aproximado de 4.6-5.2 Ma a 1.35 Ma de acuerdo con la primera aparición del género *Mammuthus* en América del Norte (Bell *et al.*, 2004). Al comienzo del Blancano las temperaturas comenzaban a bajar en el Norte del Continente, esto incrementó la aridez y la expansión de áreas abiertas de vegetación (Potts y Behrensmeyer, 1992; Cerling *et al.*, 1997; MacFadden, 2000), lo que provocó la extinción de muchas especies y la proliferación de otras sobre todo aquellas adaptadas para sobrevivir en zonas abiertas. En México se conocen pocas localidades del Blancano por la disposición geológica del país pero principalmente por la falta de estudios relacionados con esta NALMA. Sin embargo, con el tiempo se han ido descubriendo y describiendo nuevas localidades para el Cenozoico ampliando nuestro conocimiento sobre la evolución de las distintas especies que habitaron dicha zona geográfica, siendo Santa Fe del Río una de estas nuevas localidades, la cual se describe en Lystad-Gray (2018) por primera vez, dando a conocer algunos fósiles para la localidad, en el que se contemplan a los cinco grupos de vertebrados incluyendo un par de hallazgos nuevos, como la presencia del primer *Mammuth americanum* para el Blancano de México y Michoacán, así como la presencia de la familia Cyprinidae, de la cual se tenía la certeza de que existía previamente por la distribución actual de la familia en el estado, sólo que no había ningún registro previo de ella hasta la fecha. La descripción de la fauna presente en la localidad de Santa Fe del Río en este trabajo incluye registros nuevos que no se habían descrito, el estudio de estas faunas resulta importante porque proporciona información de cómo ha ido cambiando el clima a lo largo de los últimos 2 a 3 Ma en Michoacán hasta nuestros días, además del cambio evolutivo y de extinción que han sufrido las diferentes especies nativas de México, como es el caso de los caballos, los proboscidos y los peces donde los cambios han sido más evidentes que en otros grupos presentes en la localidad. Así



los estudios posteriores del yacimiento fosilífero de Santa Fe del Río proporcionarán información valiosa sobre las condiciones ambientales del pasado en el estado.

### **1.1 Procesos tafonómicos**

Los huesos normalmente se descomponen a la intemperie y es un proceso normal que involucra la reincorporación de materia orgánica en el suelo y de nuevo a los ciclos biogeoquímicos, para que un hueso pueda fosilizarse dependerá de diversos factores como la intensidad y tasa destructiva antes de que el hueso sea enterrado por completo en un ambiente óptimo para que se lleve a cabo el intercambio de materiales en dicho hueso (Behrensmeyer, 1987). En términos simples se puede dividir a la tafonomía en dos vertientes, una que sucede previamente a la incorporación de los restos óseos a la litosfera y la otra que sucede posteriormente (Fernández-Jalvo, 2012). Una propuesta que sugiere Behrensmeyer en 1987 pretende clasificar los huesos en categorías tafonómicas de acuerdo a su grado de intemperismo previo al enterramiento de los huesos. Las piezas más afectadas por el intemperismo tienden a romperse con mayor facilidad y muestran un mayor deterioro (Lyman, 1994). El peso y tamaño de los restos óseos también puede aportar información tafonómica, los huesos más pesados como las mandíbulas de animales grandes difícilmente son transportadas por corrientes de baja energía a diferencia de las vértebras, cadera, escapulas, falanges, etc. por lo que requeriría de una gran fuerza en la corriente para ser transportadas, esto implica que la fuerza de la corriente fragmentaría bastante los restos óseos antes de ser enterrados en su sitio de depósito por lo que, generalmente si se encuentra un cráneo de proboscídeo completo o articulado muy probablemente se depositó *in-situ* (Fernández-Jalvo, 2003). En ocasiones cuando se considera a un fósil de tipo alóctono se sedimenta en un sitio y se resedimenta en otro acarreado por una corriente, lo que puede llevar a conclusiones erróneas sobre aspectos paleoambientales y paleoecológicos. El grado de fragmentación de los fósiles también es indicativo de condiciones tafonómicas y paleoambientales, se puede considerar a la fragmentación en términos de supervivencia de elementos óseos con respecto al hueso intacto original, proporciones de elementos articulares, de la

diáfisis del elemento óseo y proporción entre dientes aislados y dientes en la mandíbula (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

## 2. Antecedentes

En México existen registros de diez estados en los que hay localidades del Blanco; Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Jalisco, Querétaro, Guanajuato, Hidalgo, Nayarit, Zacatecas y Michoacán (Carranza-Castañeda, O. 2006). Hasta ahora se conocen seis registros de localidades del Blanco para Michoacán. La Goleta en el municipio de Charo que incluye al proboscídeo *Rhynchotherium falconeri*, la marmota *Paenemarmota barbouri*, los équidos *Nannippus peninsulatus*, *Plihippus*, *Equus simplicidens*, un hiénido, un tapir, un pecarí (*Platygonus* sp.), un camello, y un antilocaprido y la presencia de (*Ailornis*) un ave relacionada con los vultúridos, se registran los géneros de reptiles *Testudo* y *Kinosternon* y la especie de serpiente *Lampropeltis intermedium* (Arellano y Azcón, 1949; Repenning, 1962; Miller y Carranza Castañeda; 1984, Brattstrom, 1995; Arroyo-Cabrales *et al.*, 2008). El Pirul es otra localidad de Charo que también presenta fauna del Blanco (López García, 2008).

La localidad de Uruétaro en el municipio de Tarímbaro fue descrita por Gutiérrez-Bedolla (2011), en la que incluye la presencia de *Cuvieronius* sp., *Nannippus* sp., *Equus* cf. *E. simplicidens*, *Platygonus* sp. y *Odocoileus* sp. El estudio realizado por Plata en 2017 sugiere que para el Centro Occidente de México el ambiente era de tipo heterogéneo con flora ligeramente abrasiva como arbustiva y arbórea y altamente abrasiva constituida por pastos y herbáceas, indicando así la presencia de zonas abiertas como pastizales y praderas, esto de acuerdo con los patrones de micro abrasión e isótopos estables de Oxígeno y Carbono en el esmalte dental de la mastofauna de Uruétaro, El Pirul y Misión del Valle.

Existen 3 localidades en Michoacán con ictiofauna El Pirul, la Cañada de los Cuatro Vientos y Las Encinillas, todas asociadas a la subcuenca del lago de Cuitzeo del río

Lerma las que registran restos articulados de Cyprinodontiformes (López-García, 2008; Guzmán, 2015).

Por último Santa Fe del Río, la localidad más recientemente descrita, incluye peces de la familia (Cyprinidae), anfibios de la familia (Ranidae) y el género (*Lithobates*), reptiles del suborden Serpentes y la familia Kinosternidae del género Kinosternon, aves de los órdenes (Anseriformes y Charadriiformes) y una familia (Scolopacidae), mamíferos con cuatro géneros (*Sigmodon*, *Mammut*, *Equus* y *Nannippus*) y dos especies (*Mammut americanum* y *Nannippus peninsulatus*) (Lystad-Gray, 2018).

### **3. Material y Métodos**

#### **3.1 Colecta y Transporte de Material Fósil**

Se llevaron a cabo salidas de campo para la extracción de restos fósiles en la localidad referida. El material fósil colectado fue extraído del paredón y del suelo los que se encontraban rodados de manera manual, se envolvieron en papel para evitar que se dañasen y puestos en bolsas separadas con una etiqueta individual indicando los datos del colector, localidad, fecha y el estrato al que pertenecían, algunos fósiles debieron tratarse con especial cuidado por el alto grado de intemperización, teniendo que adherir en ocasiones pegamento o moldes de yeso para evitar su posterior deterioro. Los restos obtenidos se concentraron para su posterior identificación y estudio en el laboratorio de Paleontología de la Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

##### **3.1.2 Limpieza y Consolidación del Material Fósil**

Una vez el material fósil en el laboratorio de Paleontología de la Facultad de Biología de la UMSNH, se procedió a retirar el sedimento a las distintas piezas fósiles con distintos materiales como, palillos, agujas, brochas y cepillos, aplicando en ocasiones un poco de agua para hacer más blando el sedimento y poder hacer la remoción mecánica más simple. Para la búsqueda de microfósiles se tamizaron con tamices de distintos tamaños sedimentos que posteriormente se colocaron en cajas de petri para su revisión en un microscopio estereoscópico. Todo el material encontrado se guardó en contenedores pequeños marcados con el número perteneciente a la Colección Paleontológica de la UMSNH más el prefijo UM, lugar donde se encuentran almacenados actualmente. A los fósiles se les tomaron fotos con una cámara digital de 12 Mpx acoplada al microscopio en 10x.

## **3.2 Trabajo de escritorio**

### **3.2.1 Determinación Taxonómica**

Se realizó una búsqueda extensiva de bibliografía especializada en tratados de paleontología enfocada principalmente en la NALMA del Blancano en América del Norte, México y con atención especial para el estado de Michoacán. Para la determinación taxonómica se utilizó la siguiente literatura: Osborn (1936), Holman (2000), Woodburne (2004 y 2006), Bell *et al.* (2004), Hillson (2005), De Pietri, *et al.* (2011). También se compararon los fósiles con ejemplares de la Colección Osteológica del Laboratorio de Arqueozoología “M. en C. Ticúl Álvarez Solórzano del INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia) y de la Colección Paleontológica del Laboratorio de Paleontología de la Facultad de Biología de la UMSNH.

### **3.3 Escala de intemperismo**

Se utilizó una escala de intemperismo propuesta por Behresmeyer (1978) y posteriormente renovada por Lyman (1994) la cual considera en huesos actuales el grado de desgaste que poseen en base a cinco criterios definidos a continuación, la escala es utilizada en el trabajo de tesis de Eng-Ponce (2018), la que se adaptó para la clasificación de restos fósiles. Un análisis similar se ve reflejado en la Figura 1 y la Figura 2 que corresponde al estrato inferior (14) y superior (17) respectivamente.

0. Hueso grasoso, no presenta grietas ni descamación, a veces con tejidos y ligamento/tejido suave adherido. Años transcurridos desde la muerte: 0-1.

1. Grietas paralelas a la estructura fibrosa (grietas longitudinales), superficies articulares con agrietamiento en mosaico cubriendo tejido y hueso. Años transcurridos desde la muerte: 0-3.

2. Descamación de la superficie exterior (exfoliación), grietas presentes, borde de las grietas angulares. Años transcurridos desde la muerte: 2-6.

3. Hueso compacto, rugoso y homogéneamente alterado resultando en una textura fibrosa, el intemperismo penetra el interior del hueso, 1-15 mm como máximo, los bordes de las grietas se han redondeado. Años transcurridos desde la muerte: 4-15.

4. Superficie fibrosa y áspera; desprendimiento de astillas en la superficie, el intemperismo penetra las cavidades interiores; grietas abiertas. Años transcurridos desde la muerte: 6-15

5. El hueso se empieza a desmoronar in situ, esquirlas presentes, material muy frágil. Años transcurridos desde la muerte: 6-15.

### **3.4 Escala de fragmentación**

La escala de fragmentación se basa en el porcentaje de qué tan completa está la pieza ósea o dental (Behresmeyer, 1978 y Lyman, 1994):

1. Menos del 10%. Muy poco conservada (fragmentos muy deteriorados)

2. 10-20%.

3. 20-30%.

4. 30-40%.

5. 40-50%. Parcialmente conservada (la mitad de la pieza)

6. 50-60%.

7. 60-70%.

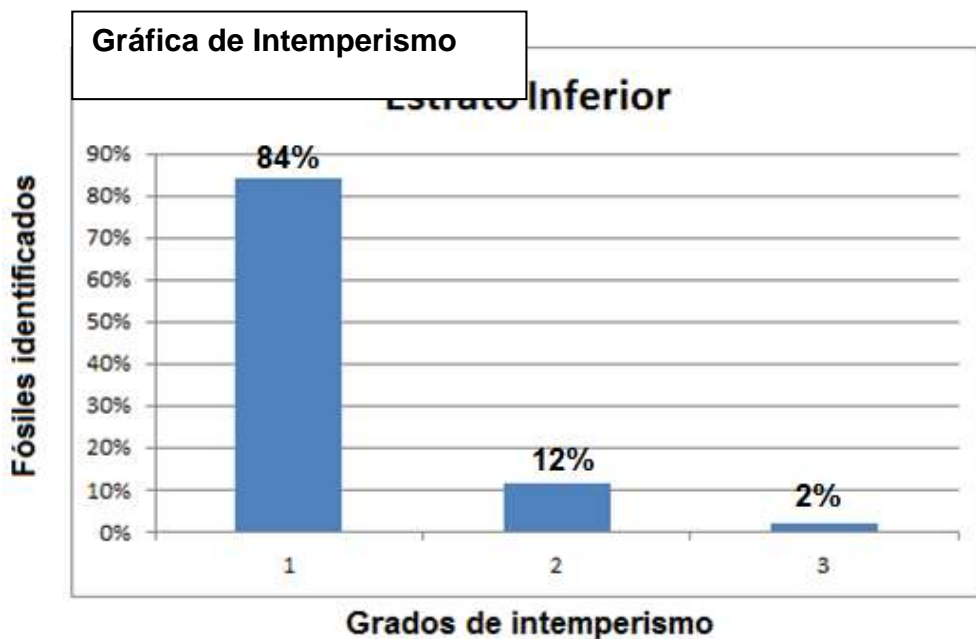
8. 70-80%.

9. 80-90%.

10. 90-100% Conservada (completa).

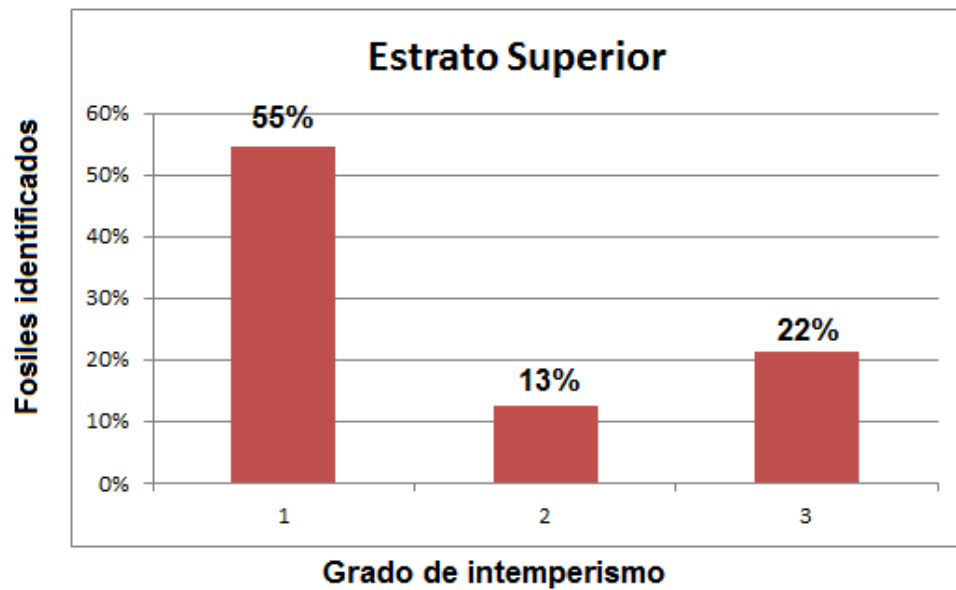
#### 4. Resultados

En la Figura 1 se aprecia el porcentaje de 45 piezas fósiles identificadas sólo en el estrato 14, con sus respectivos grados de abrasión de acuerdo con Behresmeyer (1978) y Lyman (1994). Los fósiles de grado 1 son la mayoría, lo cual implicaría que se sedimentaron rápido antes de pasar mucho tiempo expuestos a la intemperie probablemente porque la mayoría de taxones dentro de esta categoría son acuáticos. En el caso del grado 2 de intemperismo son 6 fósiles los que se encuentran en esta categoría, estuvieron más expuestos a condiciones adversas, y los de grado 3 que es sólo un fósil que presenta el mayor exponente presente del total de fósiles en la localidad. En la **Figura 2** se observa el porcentaje de 11 restos fósiles provenientes del estrato 17 con los grados de abrasión correspondientes.



**Figura 1.** Grado de intemperismo en los fósiles identificados del estrato inferior (14) de Santa Fe del Río.

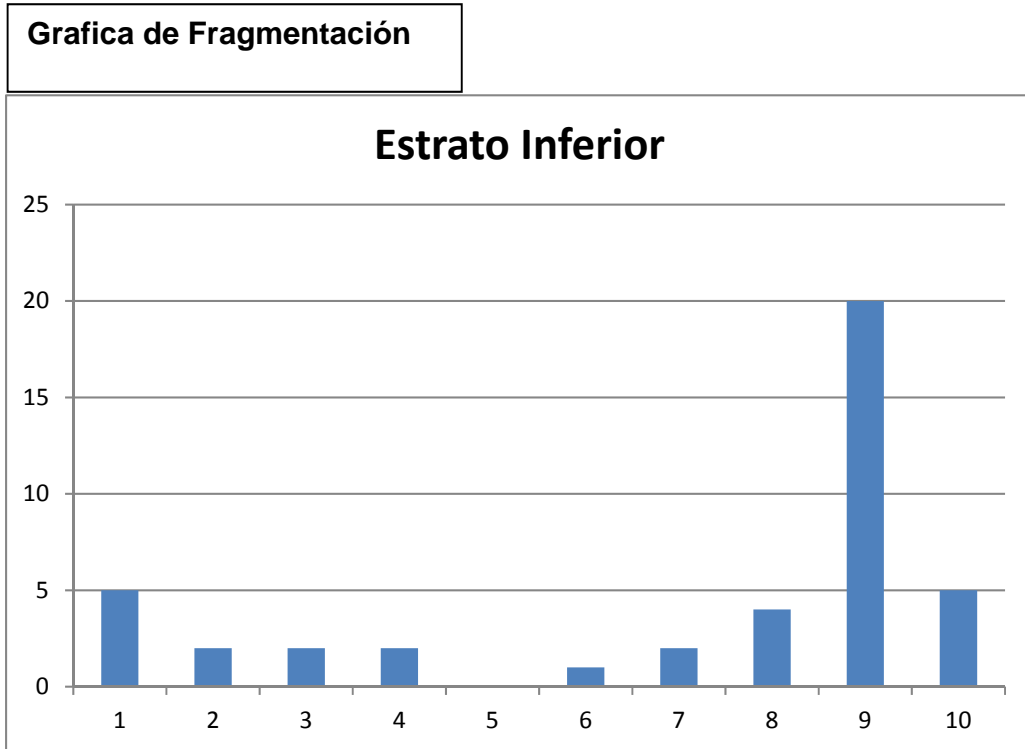
Gráfica de Intemperismo



**Figura 2.** Grado de intemperismo en los fósiles identificados del estrato superior (17) de Santa Fe del Río.



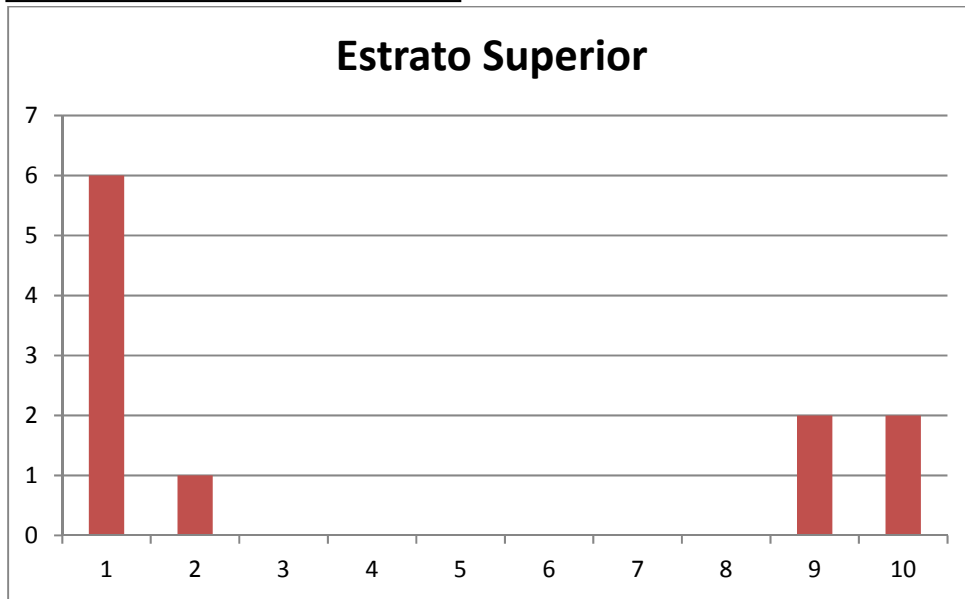
Escala de fragmentación (basado en Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).



**Figura 3.** Tabla de fragmentación de los fósiles del estrato inferior (14) de acuerdo con Fernández-Jalvo y Andrews, 2016.

En la **Figura 3** se puede ver que la mayoría de los porcentajes de fragmentación en individuos se encuentra entre el 80% y el 100%. El resto de fósiles se encuentran en grados entre 50% y menores. Lo cual concuerda con un enterramiento rápido y con poco transporte de los fósiles en el estrato 14.

### Grafica de Fragmentación



**Figura 4.** Tabla de fragmentación de los fósiles del estrato superior (17) de acuerdo con Fernández-Jalvo y Andrews, 2016.

En el caso de la **Figura 4** es posible observar que la mayoría de los fósiles se encuentran con un grado de fragmentación alto entre el 10 y 30%, aunque también hay un número considerable de fósiles con un grado de integridad alto en el estrato 17.

## 4.1 Paleontología Sistemática

### Estrato superior (17)

**Clase:** Osteichthyes (Huxley, 1880)

**Orden:** Cypriniformes (Bleeker, 1859/60)

**Familia:** Cyprinidae (Bonaparte, 1840)

**Material Referido:** UM 3350 (diente faríngeo), UM 3348 (vértebra precaudal), UM 3349 (vértebra precaudal) (**Figura 5**).

**Descripción:** diente faríngeo que termina en una punta con forma de gancho, con la rama inferior ancha (0.7mm) y la rama superior delgada (0.1 mm). Dos cuerpos vertebrales con facetas donde se unen las costillas, ambas presentan una forma de reloj de arena y miden 0.8 mm cada una constreñidas de en medio. La morfología del diente faríngeo y las dos vértebras se describen de acuerdo con del Villar (1975).

**Discusión:** la determinación a género no fue posible aunque las medidas y forma general del diente faríngeo tienen similitudes con ejemplares de *Falcularius* y *Algansea* descritos en del Villar (1975). La forma característica en reloj de arena, constreñida en el medio del cuerpo vertebral se distingue de la de los aterínidos en que son de forma más cilíndrica y alargada (Álvarez, 1976). Los ictalúridos y catostómidos son peces con vértebras de mayor tamaño y de su morfología es diferente.

**Clase:** Sauropsida (Oppel, 1811)

**Orden:** Squamata (Linneo, 1758)

**Suborden:** Serpentes (Cope, 1886)

**Material Referido:** UM 3351 (vértebra de torácica) (**Figura 5**).

**Descripción:** fragmento de vértebra que presenta el cóndilo articular y una porción del cuerpo vertebral que en su mayoría está ausente. La terminología procede a la de Holman (2002).

**Discusión:** no fue posible determinar más allá del suborden debido al daño que posee la pieza y la falta del cuerpo vertebral.

**Orden:** Rodentia (Bowdich, 1821)

**Familia:** Cricetidae (Fisher, 1817)

**Subfamilia:** Sigmodontinae (Wagner, 1843)

**Género:** Sigmodon **sp.** (Say y Ord, 1825)

**Material Referido:** UM 3352 (m3 de roedor) (**Figura 5**).

**Distribución y Rango Temporal:** el género *Sigmodon* se conoce en México desde el Hemisferio sur hasta la actualidad (Pacheco, 2014). Se encuentra en Estados Unidos de América por debajo de la latitud 41° hasta el norte y noroccidente de América del Sur (Voss, 2015).

**Descripción:** fragmento de mandíbula con un molar tercero inferior, mide 1.4 mm de largo 1.2 mm de ancho, con tres cúspides globulares gastadas pero conectadas entre sí en forma de "S". También se registraron incisivos pertenecientes a éste orden (**Figura 5**).

**Diagnóstico:** La figura oclusal del género *Sigmodon* se distingue por presentar conos en forma globular o elíptica lo que permite diferenciarlos entre otros géneros de roedores, aunado a la unión de los lóbulos entre cada uno de los brazos en la figura oclusal (Hillson, 2005).

**Discusión:** los molares inferiores en los roedores del género *Sigmodon* se caracterizan por poseer patrones sigmoidales simples en forma de "S" muy notoria sobre todo en el m2 y m3 inferiores (Mora, 2003).

**Clase:** Mammalia (Linneo, 1758)

**Orden:** Proboscidea (Illiger, 1811)

**Material Referido:** UM 3353 (defensa de proboscídeo) (**Figura 5**).

**Descripción:** Fragmento distal de una defensa de proboscídeo, mide 7.5 cm de largo. A su vez se encontraron fragmentos de escápulas de proboscídeos y fragmentos de lofos que se han podido determinar hasta orden.

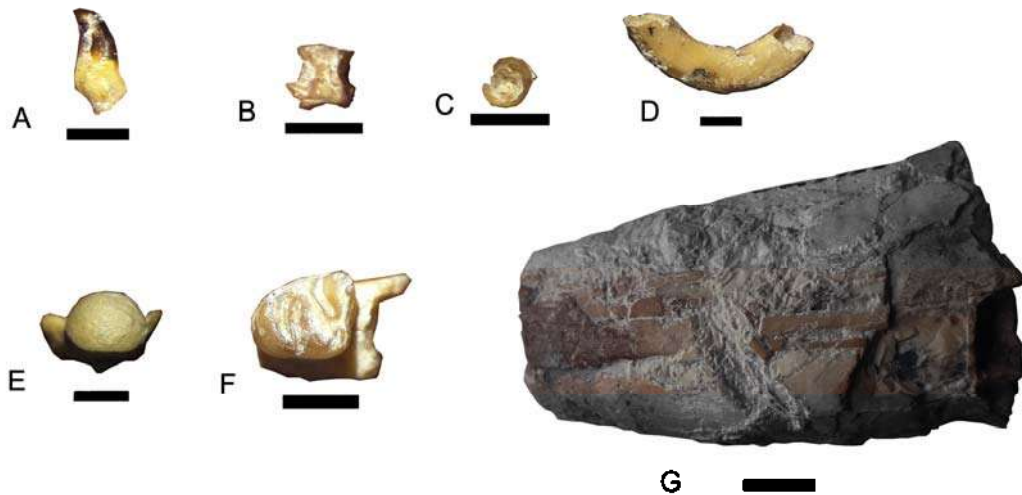


Figura 5. Fósiles del estrato superior de Santa Fe del Río. A) Diente faríngeo de ciprínido (UM 3350). B) Vértebra torácica de ciprínido en vista ventral (UM 3348). C) Vértebra torácica de ciprínido vista craneal (UM 3348). D) Incisivo de roedor. E) Vértebra de serpiente vista craneal (UM 3351). F) Molar de roedor (UM 3352). G) Defensa de proboscídeo (UM 3353). La escala de la defensa está dada en 1 cm, el resto de fósiles en 1 mm.

## **Estrato inferior (14)**

**Clase:** Osteichthyes (Huxley, 1880)

**Orden:** Cypriniformes (Bleeker, 1859/60)

**Familia:** Cyprinidae (Bonaparte, 1840)

**Material Referido:** UM 3324 (vértebra precaudal) (**Figura 6**), UM 3335 (vértebra caudal).

**Descripción:** dos cuerpos vertebrales que se distinguen una por poseer facetas para las costillas y la otra sin facetas, ambas con forma de reloj de arena. La morfología precede a la de del Villar (1975).

**Clase:** Osteichthyes (Huxley, 1880)

**Orden:** Ateriniformes (Rosen, 1966)

**Familia:** Aterinidae (Risso, 1827)

**Material Referido:** UM 3321 (vértebra precaudal), UM 3322 (vértebra precaudal), UM 3325 (vértebra caudal), UM 3327 (vértebra precaudal), UM 3329 (vértebra precaudal), UM 3330 (vértebra precaudal), UM 3331 (vértebra precaudal), UM 3367 (vértebra precaudal), UM 3368 (vértebra precaudal) (**Figura 6**).

**Descripción:** se reconocieron nueve cuerpos vertebrales con las apófisis dañadas ocho de ellas poseen facetas articulares mientras que solo una no las posee. Las vértebras poseen surcos longitudinales en la porción ventral. Son vértebras más grandes que las vértebras fósiles de ciprínidos de Santa Fe del Río pero más chicas que las de los ictalúridos.

**Clase:** Osteichthyes (Huxley, 1880)

**Orden:** Siluriformes (Cuvier, 1817)

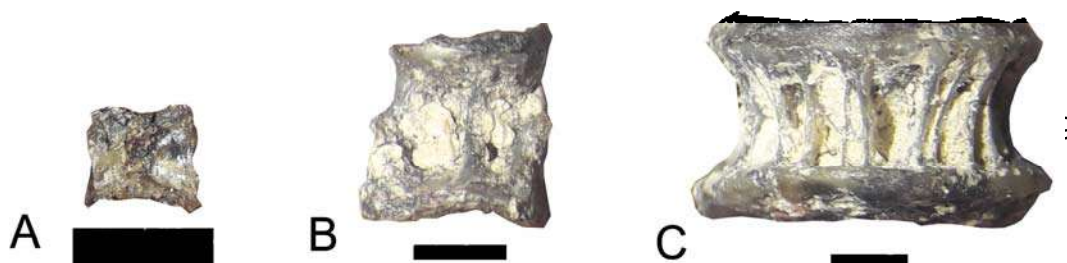
**Familia:** Ictaluridae (Cuvier, 1817)

**Material Referido:** UM 3369 (vértebra caudal), UM 3370 (vértebra caudal) (**Figura 6**).

**Descripción:** dos centros vertebrales sin facetas articulares más anchas que largas, son las vértebras de pez más grandes de Santa Fe del Río, UM 3369 mide 4.5 mm de ancho y 3 mm de largo, UM 3370 mide 4.7 mm de ancho y 2.7mm de largo.

**Discusión:** Sin duda son los restos fósiles más abundantes que se han recuperado de la localidad. Se han colectado decenas de escamas y fragmentos óseos de pez que no han sido identificados. La mayoría de restos encontrados son cuerpos vertebrales con las apófisis dañadas que permiten la distinción de tres tallas distintas de peces en Santa Fe del Río, se hace alusión a los caracteres diferenciales que permitieron su identificación a nivel de familia.

Las vértebras de los ciprínidos son constreñidas y tienen una forma de reloj de arena que las caracteriza, en cambio las de los aterínidos se distinguen por asemejarse más a una forma cilíndrica menos estrangulada en la parte media, en especial aquellas que se acercan más al cráneo, en el caso de fósiles de *Chirostoma humboldtianum* de la cuenca de México, las vértebras poseen surcos y bordos longitudinales en la porción ventral (del Villar, 1975; Álvarez y Moncayo 1976), similar a los descritos en Santa Fe del Río, caracteres que en otras vértebras de *Ch.* no se encuentran presentes. En un ejemplar de *Ictalurus punctatus* actual es posible observar ciertos caracteres en las vértebras que son características de la familia Ictaluridae y que comparadas con las familias Cyprinidae y Aterinidae son muy evidentes, por ejemplo; que las vértebras no se encuentran tan constreñidas en la porción media como en Cyprinidae, ni son tan alargadas como en la familia aterínidae, son notablemente más anchas que largas y con forma cilíndrica.



**Figura 6.** Distintas vértebras de peces del estrato inferior en vista ventral. A) Vértebra de ciprínido (UM 3324). B) Vértebra de aterínido (UM 3368). C) Vértebra de ictalúrido (UM 3370). Escala dada en 1 mm.

**Material Referido:** UM 3369 (vértebra caudal), UM3370 (vértebra caudal).

**Clase:** Amphibia (Linneo, 1758)

**Orden:** Anura (Rafinesque, 1815)

**Familia:** Ranidae (Rafinesque, 1814)

**Género:** *Lithobates* sp. (Fritzing, 1843)

**Material Referido:** UM 3375 (urostilo) (**Figura 7**).

**Distribución y Rango Temporal:** las ranas de agua americanas (*Lithobates*) se encuentran al sur de Estados Unidos de América y México principalmente (Hillis, 2005). El género se encuentra desde hace 4.9 Ma durante el Plioceno temprano hasta la actualidad (Rogers, 1984).

**Descripción:** Porción anterior de un urostilo que posee dos fosas dispuestas una al costado de la otra de manera ventral sin estar separadas, desde la vista anterior por encima de las fosas se forma una figura triangular en posición dorsal desde la cual se da un eje aplanado hacia la diáfisis, no se encuentra presente la porción distal del hueso.

**Diagnosis:** es un hueso largo, delgado y aplanado dorsalmente que termina con dos fosas juntas que forma una figura triangular en la porción anterior del hueso en forma de triángulo isósceles (Ratnikov, 2001).



**Discusión:** Las fosas del urostilo en el género *Rana* no se encuentran separadas normalmente pero pueden estarlo, el canal neural es alto y en la porción anterior del hueso se observa una figura triangular en forma de isósceles, mientras que en el género *Bufo* las fosas son separadas con un canal neural bajo, forman una figura de triángulo equilátero y la superficie del hueso ventral es convexa (Ratnikov, 2001). Se sigue la nomenclatura de Frost et al. (2006) que considera a las ranas del nuevo mundo bajo el género de *Lithobates*.



**Figura 7.** Urostilo de *Lithobates* sp. en vista craneal (UM 3375). Escala dada en 1 mm.

**Clase:** Testudines (Linneo, 1758 o Batsch, 1788)

**Orden:** Cryptodira (Cope, 1868)

**Familia:** Kinosternidae (Baur, 1893)

**Género:** *Kinosternon* sp. (Spix, 1824)

**Material Referido:** UM 3363 (caparazón con dos costales).

**Distribución y Rango Temporal:** La familia Kinosternidae se registra desde hace 20 Ma aproximadamente (Mioceno temprano) (Emry y Eshelman, 1998), es endémica del Nuevo Mundo y su registro fósil se conoce principalmente en América del Norte y México (Fichter, 1969; Hutchison, 1980; Hutchison y Bramble, 1981; Bramble et al., 1984; Hutchison, 1991; Holman, 1998).

**Descripción:** Dos placas costales y un fragmento de caparazón articulados, el fragmento de caparazón posee un pliegue que se forma en los costados del caparazón donde van las patas de la tortuga.

**Diagnosis:** las placas de *Kinosternon* presentan una forma rectangular más ancha que larga, son fragmentos pequeños y delgados comparados con otros géneros de tortugas terrestres del continente americano y poseen una ornamentación visible al microscopio de tipo vermiforme (Mlynarski, 1976; Cruz *et al.*, 2009; (Morgan *et al.*, 2011).

**Discusión:** Presenta una ornamentación de tipo vermicular que es característica del género (Mlynarski, 1976), son placas considerablemente más anchas que largas y delgadas. Además se comparó el fragmento fósil con un esqueleto actual de *Kinosternon* que coincide con la morfología del género solo que las piezas de Santa Fe del Río son más grandes.

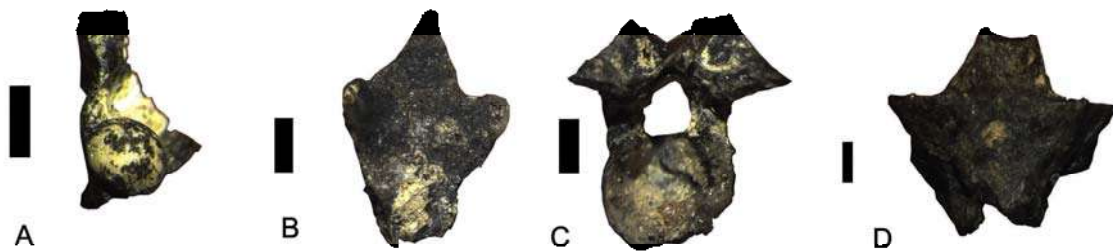
**Clase:** Sauropsida (Oppel, 1811)

**Orden:** Squamata (Linneo, 1758)

**Suborden:** Serpentes (Cope, 1886)

**Material Referido:** UM 3344 (fragmento de vértebra) (**Figura 8A**), UM 3345 (fragmento de vértebra) (**Figura 8B**), UM 3346 (fragmento de vértebra) (**Figura 8C**), UM 3371(fragmento de vértebra) (**Figura 8D**).

**Descripción:** fragmento de vértebra con parte del cuerpo vertebral y el cóndilo presentes, el resto está ausente (UM 3344). Fragmento de vértebra la mayoría está ausente (UM 3345). Fragmento de vértebra con la porción condilar presente (UM 3346). Fragmento de vértebra con la porción ventral presente, es la vértebra más grande en cuanto a largo y ancho de todas las vértebras de serpientes presentes en Santa Fe del Río (UM 3372).



**Figura 8.** Vértebras de serpientes. A) Vértebra de serpiente en vista caudal (UM 3344). B) Vértebra de serpiente en vista ventral (UM 3345). C) Vértebra de serpiente en vista craneal (UM 3346). D) Vértebra de serpiente en vista dorsal (UM 3371).

**Familia:** Colubridae (Oppel, 1811)

**Género:** *Lampropeltis* sp. (Fitzinger, 1843)

**Material Referido:** UM 2064 (vértebra torácica) (**Figura 9**).

**Distribución y Rango Temporal:** el género se distribuye desde el sur de Canadá y llega hasta América del Sur en Colombia, Ecuador y Venezuela (Blaney, 1973). Su registro fósil abarca desde el Mioceno medio hace 13 Ma aproximadamente hasta actualmente (Holman, 2000).

**Descripción:** La vértebra torácica UM 2064 previamente descrita en Lystad-Gray (2017) mide 2.5mm de ancho del cuerpo vertebral, 5mm de largo y 7 mm de ancho (de una precigapofisis a la otra), con un cóndilo redondeado, el cotilo se extiende hacia el exterior, con un arco neural alto, el cigosfeno es ancho y crenado, con una espina neural baja y aplanada.

**Diagnosis:** tiene una espina neural baja y crestas definidas a lo largo de la quilla hemal, es más larga que ancha, el cóndilo es redondeado, el cotilo se extiende hacia la porción caudal y el arco neural se encuentra deprimido pero visible (Holman, 2000).

**Discusión:** Las características que posee el ejemplar UM 2064 corresponden a los del género *Lampropeltis*, se distingue por poseer una espina neural baja y crestas

bien definidas a lo largo de la quilla hemal como en las especies *L. triangulum* y *L. mexicana*. La anatomía de la vértebra se asemeja más a aquella de *L. mexicana* en que es más ancha que larga, el arco neural está deprimido pero evidente, la quilla hemal es visible algo ancha y fuerte. Sin embargo *L. mexicana* se conoce solo para el Pleistoceno y *L. triangulum* si está presente desde el Plioceno. Van Devender y Bradley (1994) advierten que las vértebras de especies de *L. mexicana* del sur de Estados Unidos y norte de México son más difíciles de distinguir entre las de *L. triangulum* más sureñas del continente porque son muy parecidas, esto sugiere que el ejemplar UM 2064 esté más cercano a *L. triangulum* que a *L. mexicana*.



**Figura 9.** Vértebra torácica de *Lampropeltis* sp. (UM 2064). A) Vértebra torácica de *Lampropeltis* sp. en vista caudal. B) Vértebra torácica de *Lampropeltis* sp. en vista lateral). C) Vértebra torácica de *Lampropeltis* sp. en vista craneal.

**Género:** *Thamnophis* sp. (Fitzinger, 1843)

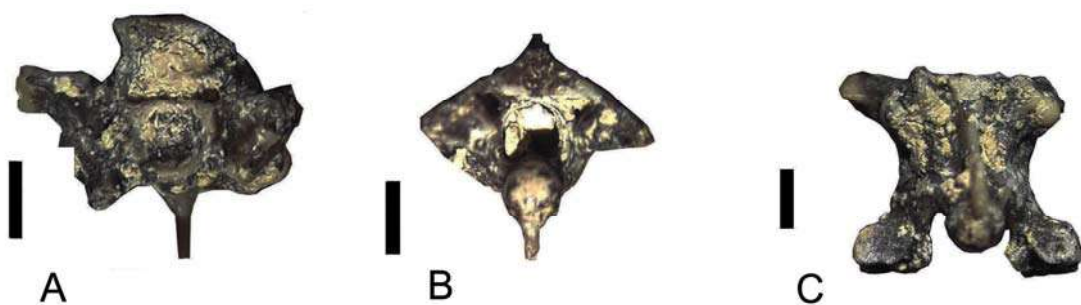
**Material Referido:** UM 3372 (vértebra torácica) (**Figura 10**).

**Distribución y Rango Temporal:** se tienen registros del género *Thamnophis* desde Canadá hasta Costa Rica. Tiene un rango temporal desde el Mioceno medio (13 Ma aproximadamente) hasta la actualidad (Holman, 2000).

**Descripción:** El ejemplar UM 3372 es una vértebra torácica completa, la espina neural está presente aunque algo disminuida y es delgada dispuesta hacia la parte posterior del cuerpo, con una hipapofisis visible y que apunta hacia la porción caudal.

**Diagnosis:** las vértebras torácicas son más largas que anchas, tiene una hipapofisis bien desarrollada y apunta hacia la parte posterior del cuerpo, carácter que no se encuentra presente en otras especies, la espina neural está visible pero no es tan prolongada como aquellas del género *Nerodia* si no que se encuentra más reducida (Holman, 2000).

**Discusión:** las serpientes de agua de la subfamilia Natricinae comprenden los géneros *Thamnophis*, *Nerodia*, *Storeria*, *Tropidoclonion* y *Virginia*. Las serpientes más pequeñas de los géneros *Storeria*, *Tropidoclonion* y *Virginia* poseen hipapofisis que forman angulaciones y visiblemente no son tan redondeadas, se distinguen fácilmente de *Thamnophis* y *Nerodia* porque su hipapofisis si es redondeada, las serpientes del género *Thamnophis* están cercanamente relacionadas con las serpientes de agua del género *Nerodia*, la morfología de sus vértebras es muy parecida excepto que las del género *Thamnophis* son comunmente más elongadas que las del género *Nerodia* y sus espinas neurales más altas. El número elevado de localidades fósiles que describen a *Thamnophis* sp. es un indicativo de lo difícil que es identificar a nivel de especie las vértebras (Holman, 2000). Sin embargo, existen ciertas similitudes con las especies *Thamnophis elegans* y *T. sirtalis* en cuanto a tamaño y morfología solo que los registros fósiles de estas especies son de E.U.A. y Canadá y no para México.



**Figura 10.** A) Vértebra torácica de *Thamnophis* sp. en vista craneal (UM 3372). B) Vértebra de *Thamnophis* sp. en vista caudal (UM 3372). C) Vértebra de *Thamnophis* sp. en vista ventral (UM 3372). La escala está dada en 1 mm.

**Clase:** Mammalia (Linneo, 1758)

**Orden:** Rodentia (Bowdich, 1821)

**Material Referido:** UM 3373 (calcáneo), UM 3378 (calcáneo) (**Figura 11**).

**Descripción:** el ejemplar UM 3373 mide 0.5 mm de largo y el UM 3378 mide 0.6mm. Los calcáneos son alargados y planos en sentido transversal, con dos caras (lateral y medial), dos fases marginales (plantar y dorsal) y dos extremidades (distal y proximal).

**Discusión:** Los trabajos acerca de huesos postcraneales son muy escasos en roedores, sobre todo en sigmodontinos, la mayoría se enfocan en dientes y huesos craneales (Carrizo y Díaz, 20011). El tubérculo del calcáneo es largo, con los procesos lateral y medial evidentes y separados por un surco, el tubérculo plantar es visible, la faceta calcaneoastragalar es triangular y convexa, el cuello del calcáneo forma un ángulo dispuesto al interior de la faceta tibial medial y opuesta a la faceta tibial lateral en roedores sigmodontinos (Carrizo y Díaz, 2011), por el tamaño pequeño y forma es posible determinar que el astrágalo y el calcáneo pertenecen a pequeños roedores. Dada la presencia de molares de roedores sigmodontinos en la localidad es posible que pertenezcan a éste género, sin embargo no se descarta la probabilidad de que pertenezcan a otro tipo de roedor.



**Figura 11.** Calcáneo de roedor (UM 3373).

**Familia:** Cricetidae (Fisher, 1817)

**Subfamilia:** Sigmodontinae (Wagner, 1843)

**Género:** Sigmodon (Say y Ord, 1825)

**Especie:** *Sigmodon minor* (Gidley, 1922)

**Sinonimia:** *Sigmodon medius* (Gidley 1922), *Sigmodon intermedius* (Hibbard 1937).

**Holotipo:** Porción de la mandíbula izquierda con la dentición completa (No. de catálogo 10512, Museo de Historia Natural de los Estados Unidos de América).

**Material Referido:** UM 2068 (fragmento de maxila con molar superior primero izquierdo (M1) (**Figura12**).

**Distribución y Rango temporal:** la especie *S. minor* tiene un rango temporal aproximado de entre 5 Ma a 2 Ma, (Peláez-Campomanes y Martin, 2005). Se registra la especie principalmente para el sur de Estados Unidos de América y México (Peláez-Campomanes y Martin, 2005).

**Descripción:** “El M1 posee un anterocono con una sola cúspide y dos lofos bicúspide en la porción anterior al anterocono. El anterocono se dispone labialmente y se une con el protocono. El paracono en posición labial y en el lado opuesto el protocono, se disponen de modo alternado. En la porción posterior se encuentran el metacono en posición labial y en posición lingual el hipocono unidos por un brazo. Con cúspides altas. Las cúspides tienen forma globular o elipsoidal y se encuentran divididas por flexos (idos) y se conectan entre sí por sus brazos anterior y posterior” (Lystad-Gray 2018). Las medidas del molar son 2.4 mm anteroposteriormente y 1.5 mm de ancho.

**Diagnosis:** arreglo oclusal simple, sin lofos accesorios, el anterocono posee una sola cúspide sin divisiones, las cúspides forman elipses comprimidas y oblicuas, los flexos que separan las cúspides son profundos y rectos (Peláez-Campomanes *et al.*, 2005; Pacheco, 2014).

**Discusión:** El M1 se comparó con medidas de molares y figuras oclusales de los géneros *Sigmodon*, *Baiomys*, *Neotoma* y *Calomys* provenientes de la colección

osteológica del INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia) con el que se encontraron más similitudes con el género *Sigmodon* al cual fue asignado. El género *Sigmodon* se encuentra desde el Henfiliano de México hasta la actualidad, los ejemplares más antiguos son *S. chihuahuensis*, *S. ferrusquiae* y *S. oroscoi*, que se distinguen por tener un anterocono bilobado (Jacobs y Lindsay, 1981; Lindsay y Jacobs, 1985; Carranza-Castañeda y Walton, 1992), el ejemplar UM 2068 sólo posee uno lo cual es indicativo de especies más recientes. Las medidas de *Sigmodon minor* son consistentes con las descritas en Pacheco 2014, además *Sigmodon minor* es asignado a la edad de Blancano por la ocurrencia de fósiles de *Nannippus peninsulatus* y de *Hypolagus vetus* (Bell *et al.*, 2004).



**Figura12.** Molar M1 de *Sigmodon minor* (UM 2068). Escala dada en 1mm. Tomado de Lystad-Gray (2018).

**Orden:** Lagomorpha (Brandt, 1855)

**Familia:** Leporidae (Gray, 1821)

**Material Referido:** UM 3335 (fragmento de porción distal del húmero derecho) (**Figura 13B**), UM 3337 (falange distal) (**Figura 13C**), UM 3338 (falange distal) (**Figura13D**), UM 3341 (metatarsal III).



**Descripción:** las dos falanges distales completas (UM 3337 y UM 3338) tienen solo una faceta articular en la porción proximal con una concavidad simple que termina en su porción distal en una punta porosa y afilada. El metatarsal III (UM 3341) tiene la porción proximal completa con una cabeza en la que articulan con los huesos pequeños del pie (tarsales) y la mitad de la diáfisis está dispuesta de manera recta y delgada.

**Discusión:** Dada la falta de trabajos postcraneales en las que se describan falanges solo es posible determinar que las falanges descritas para Santa Fe del Río pertenecen a la familia Leporidae. Lo mismo ocurre para el metatarsal III la variación que ocurre entre los diferentes taxones depende de lo delgadas y largas que son (Fostowicz-Frelik, 2007), lo que dificulta asignar a género al ejemplar del metatarsal de Santa Fe del Río ya que está ausente la porción distal del ejemplar por lo que se asigna a la familia Leporidae.

**Género:** *Hypolagus* (Dice, 1917)

**Especie:** *Hypolagus vetus* (Kellogg, 1910)

**Sinonimia:** *Lepus vetus* (Kellogg, 1910)

**Holotipo:** mandíbula izquierda incompleta con incisivo y P3-M2, U.C.M.P. No. 12565, del Plioceno medio, localidad U.C. No. 1100, formación de Thousand Creek, en el condado de Humboldt, Nevada.

**Material referido:** UM 3364 (premolar superior izquierdo P2) (**Figura 13F**), UM 3347 (molar inferior derecho m3) (**Figura 13E**), UM 3335 (fragmento de porción distal de húmero derecho) (**Figura 13A**), UM 3340 (astrágalo derecho) (**Figura 13G y H**).

**Distribución y Rango Temporal:** en el continente americano el género *Hypolagus* se distribuyó principalmente en la parte oeste de América del Norte desde el Mioceno tardío (Hermingfrodiano) hasta el Pleistoceno temprano. La especie *H.*

*vetus* se distribuye desde el Hemfiliano hasta finales del Blancano (Dawson, 1958; Dalquest, 1979; White, 1991).

**Descripción:** El P2 superior izquierdo (UM 3362) es un premolar aislado con forma de gajo o de media luna y con una figura oclusal simple, en vista superior mide 1.5 mm de largo (anteroposteriormente) y 2.5mm de ancho. El m3 inferior derecho (UM 3347) es un molar aislado pero completo, largo y delgado hacia la base, en la superficie oclusal mide 1.8 mm anteroposteriormente, el trigónido mide 1.9 mm de ancho y el talónido mide 1.2 mm de ancho. Fragmento de porción distal de húmero derecho de conejo (UM 3335), la cabeza humeral está presente, el capitellum se encuentra deprimido contra la tróclea dispuesta paralelamente a esta, la diáfisis y la porción proximal se encuentran ausentes, mide 7.5 mm de ancho. Fragmento de porción distal de húmero izquierdo de conejo igualmente deprimido contra la tróclea paralelamente como en el fósil anterior (UM 3336), parte de la cabeza humeral presente, la diáfisis y la porción proximal ausentes. El astrágalo está completo (UM 3340) mide 13 mm anteroposteriormente, 9 mm de largo en la porción del cuello y 7 mm de ancho en la porción proximal.

**Diagnosis:** El género *Hypolagus* se distingue por tener un P2 superior con un reentrante anterior bien desarrollado posicionado medialmente que se extiende hasta la mitad de la superficie oclusal que es ancha y direccionada de modo posteroexterior (Dawson, 1958; Miller y Carranza Castañeda, 1982).

**Discusión:** P2: La morfología dental del molar de Santa Fe del Río es consistente con la descripción propuesta por Carranza Castañeda (1982) de *Hypolagus*. Del género *Hypolagus* en México se tiene el registro de las especies *H. mexicanus* e *Hypolagus vetus* para el Blancano, los cuales tienen una morfología dental en el P2 similar pero difieren en tamaño (Polaco *et al.* 2013). Las medidas del ejemplar (UM 3362) son un poco más pequeñas que las descritas para *H. mexicanus* asemejándose más a las medidas descritas por Dawson (1958) para *H. vetus*, lo que sugiere la presencia de un lepórido más pequeño que *H. mexicanus* para Santa Fe del Río. La figura oclusal es simple en comparación con los lagomorfos más modernos con figuras oclusales más complejas. A menudo se encuentra registrada

la presencia de *H. vetus* junto con la de *Nannippus peninsulatus* y *Sigmodon minor* (Bell *et al.*, 2004).

m3: las medidas del m3 son correspondientes a las sugeridas por Dawson (1958) de *Hypolagus vetus* tanto en el ancho del talónido, el trigónido y el largo anteroposterior. Los ejemplares de *H. mexicanus* son muy grandes para coincidir con el ejemplar de Santa Fe del Río aunque su morfología si sea similar.

Húmero: las liebres tienen una disposición en el epicóndilo medial oblicua respecto al eje principal del hueso, en conejos este se dispone de manera transversal como en el género *Oryctolagus* (Sanchis y Fernández, 2011). Los húmeros en la porción distal son más grandes en tamaño en los géneros *Lepus* y *Megalagus* que en conejos más modernos como *Hypolagus vetus* y lepóridos recientes. En *Hypolagus vetus* y *Romerolagus* el cóndilo medial es ligeramente más ancho en proporción que con el género *Lepus* (Dawson, 1958). El ejemplar de Santa Fe del Río tiene una disposición del epicóndilo medial oblicua respecto al eje principal del húmero similar al género *Lepus*, sin embargo, el cóndilo medial es ancho como en *H. vetus*, comparado con conejos actuales y con *Lepus*, las medidas que corresponden a *Lepus* y *Megalagus* en cuanto al ancho transversal de la porción distal son demasiado grandes comparadas con las del ejemplar UM 3335, además la porción del cóndilo medial está adaptado con inserciones musculares más detalladas que en el género *Lepus*, con una morfología más parecida a la de *H. vetus*. El ejemplar (UM 3336) se parece en morfología y medidas a las del ejemplar UM 3335 pero carece de las porciones óseas que permiten corroborarlo, motivo por el cual se asigna hasta el nivel taxonómico de familia (Leporidae).

Astrágalo: El trabajo realizado por Fostowicz-Frelik (2007) compara astrágalos de especies Plio-Pleistocénicas de Polonia que permite determinar caracteres y medidas de distintos géneros de lagomorfos. En primer instancia es posible discernir del género *Lepus* ya que las medidas son demasiado grandes, las medidas de *Oryctolagus* y *Sylvilagus* son muy pequeñas, las medidas son similares a las de *Hypolagus* y *Pentalagus* que se traslapan pero *Pentalagus* no es un género que se distribuya en México, lo que indica que el astrágalo es más parecido en medidas al

género *Hypolagus*. En cuanto a la morfología del astrágalo *Syvilagus* e *Hypolagus vetus* son muy parecidos, poseen una cresta en la faceta medial que se divide en dos superficies distintas, en *Lepus* estas dos superficies se separan por una cresta más aguda y en *Romerolagus* es más redondeado, los procesos trocleares de *H. vetus* y *Syvilagus* se encuentran más juntos entre sí y se extienden más hacia la superficie plantar (Dawson, 1958) como en el ejemplar (UM 3340), *Romerolagus* tiene quillas más pequeñas en el astrágalo que *H. vetus*. De acuerdo con las medidas y la morfología del astrágalo estas son más parecidas a las de *Hypolagus vetus*.



**Figura 13.** Fósiles de lagomorfos. A) Húmero derecho de *Hypolagus vetus* (UM 3335). B) Húmero izquierdo (UM 3340). C y D) falanges distales (UM 3337 y UM 3338). E). m3 derecho de *Hypolagus vetus* (UM 3347). F) P2 izquierdo de *Hypolagus vetus* (UM 3364). G) Astrágalo derecho de *Hypolagus vetus* en vista

dorsal (UM 3340). H) Astrágalo derecho en vista ventral (UM 3340). De la A a la F la escala está dada en 1 mm, la G y H está dado en 1 cm.

**Orden:** Perissodactyla (Owen, 1848)

**Familia:** Equidae (Gray, 1821)

**Género:** *Equus* **sp. c.f.** *Equus simplicidens* (Cope, 1892)

**Sinónimias:** *Amerhippus occidentalis* (Leidy, 1865), *Asinus cumminsii* (Cope, 1893), *Dolichohippus simplicidens* (Kurten y Anderson, 1980), *Equus (Hemionus) tau* (Owen, 1869), *Equus achates* (Hay y Cook, 1930), *Equus cumminsi* (Cope, 1893), *Equus occidentalis* (Leidy, 1865), *Plesippus simplicidens* (Matthews, 1992), *Plesippus shoshonensis* (Gidley, 1930), *Pliohippus cumminsii* (Cope, 1893).

**Holotipo:** molar superior procedente de la PAPS (Proceedings of the American Philisophical Society) de la formación Blanco de Texas.

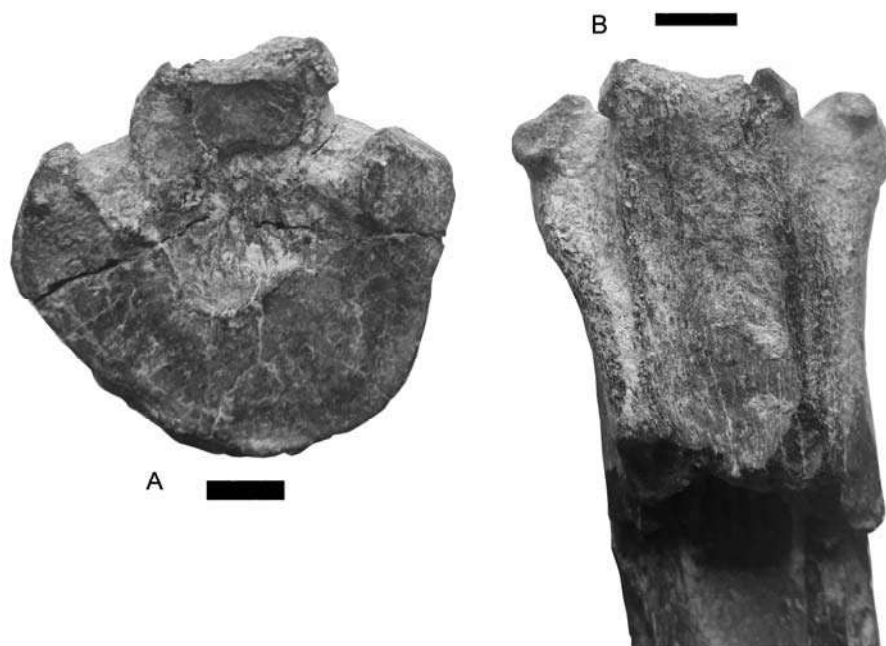
**Material Referido:** UM 3374 (metatarsal III) (**Figura 14**).

**Distribución y Rango Temporal:** Se conoce para el sur de Estados Unidos de América y México. En México vivió durante el Blancano tardío y se extinguió al comienzo en el Pleistoceno temprano (Carranza-Castañeda, 2006).

**Descripción:** metatarsal III con la porción proximal completa, la porción distal y cerca de la mitad de la diáfisis se encuentran ausentes. El diámetro máximo de la faceta articular del tercer tarsal es de 5 cm, el ancho de la faceta articular es de 5.5 cm, el ancho articular proximal es de 3.5 cm, el diámetro articular de la faceta del segundo tarsal es de 0.8 cm y el diámetro articular de la faceta del cuarto tarsal es de 1.4 cm.

**Diagnosis:** es cilíndrico en dos tercios de la porción proximal, la superficie articular es casi circular y plana en la que articulan los cuneiformes y el cuboides, tiene una concavidad en el centro para la inserción de los ligamentos y dos focetas en posición plantar para la inserción de los metacarpales II y IV vestigiales.

**Discusión:** en la porción proximal del metatarsal III se forman distintitas facetas que articulan con los huesos del ectocuneiforme, cuboide y los metatarsales II y IV, estas facetas son claramente más desarrolladas en caballos más modernos (*Equus* e *Hipparion*) que en caballos más primitivos (*Nannippus*), sobretodo porque el peso del pie se fue apoyando directamente en este dígito más que en el resto y las medidas son considerablemente mayores. La faceta del ectocuneiforme en el género *Equus* se encuentra separada por una cresta entre la faceta del metatarsal IV, dicha cresta no se encuentra presente en el metatarsal III en el género *Hipparion*, la cual se encuentra unida y de forma más curvada hacia el interior del metatarsal III (Taseer, 1975; Eisenmann *et al.*, 1988).



**Figura 14.** Metacarpal III de *Equus* sp (UM 3374). A) Vista proximal. B) Vista lateral. Escala dada en 1 cm.

## 5. Discusión

La escala de intemperismo de Behresmeyer (1978) y Lyman (1994) nos dan una visión del tiempo que estuvieron expuestos los restos óseos o fósiles a condiciones externas que pudieran afectar su estructura y conformación, en el caso de los fósiles del estrato inferior existen algunos que presentan rasgos de haber estado expuestos a condiciones de intemperismo (16%), sin embargo, el porcentaje de dichos fósiles es mínimo en comparación con aquellos que se encuentran condiciones de intemperismo bajas (84%), lo que indica que la mayoría de los fósiles del estrato inferior se depositaron muy pronto después de su muerte y que los agentes externos no tuvieron oportunidad de provocarles tanto daño en comparación con los del estrato superior. Los fósiles del estrato superior presentan un porcentaje más elevado de intemperismo (45%), lo que sugiere que estuvieron expuestos al medio ambiente considerablemente más tiempo que los fósiles del estrato inferior, esto puede deberse a las condiciones cambiantes que sufría en ese entonces el paleolago posiblemente cerca de su extinción.

Por otra parte la escala de fragmentación en los fósiles del estrato inferior de acuerdo con la escala de Fernández-Jalvo y Andrews (2016), nos permite conocer el grado de daño mecánico que sufrieron los restos fósiles, al ser transportados por una corriente de agua hasta el sitio de depósito, que en el caso del estrato inferior parece ser que la mayoría de los fósiles están poco fragmentados, lo cual es indicativo de que no estuvieron por un tiempo prolongado siendo arrastrados por la corriente. La mayor parte de los fósiles que se encuentran fragmentados son los de mamíferos terrestres, mientras que los más completos corresponden a taxones que habitan cerca de o dentro de la corriente de agua, como peces, tortugas, serpientes y aves acuáticas.

En el estrato superior se confirma la presencia de la familia Cyprinidae por el diente faríngeo y las vértebras que se encuentran en el estrato, desafortunadamente no ha sido posible determinar el género de los peces del estrato 17, también se amplió el registro de reptiles para este estrato, con la presencia de la vértebra de serpiente

que dado su grado de fragmentación no ha sido posible determinar el género. La presencia de molares de roedores en el estrato superior es bastante prometedora para poder asignar una NALMA, ya que son taxones índice para gran parte del Neógeno, sin embargo, uno de los molares menos diagnósticos para el género *Sigmodon* son los m3 por lo que, hasta el momento ha sido imposible determinar una temporalidad, sin duda con estudios futuros y tamizados del sedimento sería posible llegar a determinar una edad recuperando más de estos ejemplares. En Lystad-Gray (2017) se había registrado previamente fósiles de proboscídeos para este estrato, mayormente fragmentos de escapulas y algunos lofos que no han podido ser diagnosticados más allá de orden.

El registro de los peces fósiles del estrato inferior es mucho mayor de lo que se tenía previamente registrado, se registran por primera vez las familias Ictaluridae y Aterinidae y se amplía el registro con más ejemplares de la familia Cyprinidae. La familia Aterinidae es la que más ejemplares presenta de todos los fósiles identificados para Santa Fe del Río, quizá con estudios más especializados puedan llegar a identificarse con mayor precisión hasta género y especie, debido a que las vértebras son diagnósticas, además de que existen numerosos fragmentos que no han sido identificados todavía. El género *Lithobates* ya se tenía registrado previamente en Lystad-Gray (2017), así como el género *Kinosternon*, ambos ejemplares se asocian también a cuerpos de agua dulce, otro taxón que está asociado a cuerpos de agua dulce es el género *Thamnophis* que frecuentemente se alimenta de peces, del cual no se tenía registro previo para la localidad. El ejemplar UM 2264 es un fósil que ya se tenía registrado previamente para Santa Fe del Río, pero no se había identificado hasta el nivel de género, *Lampropeltis* es un género que no se encuentra tan asociado a cuerpos de agua dulce como *Thamnophis*, pero si acostumbran a alimentarse de pequeños mamíferos, aves y otras serpientes, taxones fósiles presentes en Santa Fe del Río. La especie *Sigmodon minor* solamente vivió durante el Blancano, razón por la cual es un taxón índice para esta NALMA, a pesar de que solo se tenga un ejemplar las medidas de la pieza y la morfología coinciden con la especie y el rango de tiempo, aunado a esto son taxones fósiles que se encuentran generalmente junto con otros que



también se encuentran en el Blancano como *Hypolagus vetus* y *Nannippus peninsulatus*, los calcáneos e incisivos entre otros fragmentos indeterminados de roedores no han sido posible identificarse por el hecho de que no hay trabajos postcraneales que describan su taxonomía para poder compararlos, por lo tanto es posible que pertenezcan a la especie *S. minor* o a cualquier otro roedor no identificado de talla pequeña, sin embargo se hace un esfuerzo por describir su morfología para poder ser comparados en trabajos posteriores. Los lagomorfos no se había registrado previamente para Santa Fe del Río, lo que pone de manifiesto la importancia de continuar extrayendo fósiles, a pesar de no haber estado registrado para Santa Fe del Río hoy es el taxón de mamíferos fósiles para el sitio que más ejemplares tiene. Los trabajos de lagomorfos y roedores sigmodontinos fósiles se enfocan principalmente en la descripción de piezas craneales, lo que dificultó la asignación de algunas de las piezas postcraneales y se decidió dejarlas solamente hasta el nivel de familia. Aquellos fósiles que si se pudieron identificar se asignaron a la especie *H. vetus* que coinciden con la morfología y medidas descritas en literatura pasada, esta especie está asociada a espacios de pastizales abiertos como *N. peninsulatus* y el género *Equus* sp. cf. *Equus simplicidens* por el tipo de locomoción y dieta que tenían, taxones que se tenían previamente registrados para el sitio en Lystad-Gray (2017).

## **6. Conclusiones**

1. Los fósiles del estrato inferior (14) tienen un grado bajo de intemperismo y fragmentación lo que indica que la mayor parte de ellos no estuvieron expuestos al medio ambiente y tuvieron un enterramiento rápido después de su muerte.
2. Los fósiles del estrato superior (17) tienen un alto grado de intemperismo, indicando que cerca de la mitad estuvieron expuestos a agentes externos antes de depositarse. El alto grado de fragmentación de los fósiles, indica que estuvieron expuestos a corrientes de agua y acarreados hasta al sitio de depósito.

3. Se registra por primera vez a la familia Cyprinidae en el estrato superior, así como la presencia de serpientes y un roedor sigmodontino, a pesar de la presencia de dicho roedor no se ha asignado una temporalidad para este estrato.
4. Se amplía el registro de los fósiles del estrato inferior con la presencia de dos taxones índice nuevos (*S. minor* y *H. vetus*), además de la presencia de dos géneros de serpientes (*Thamnophis* y *Lampropeltis*) y dos familias de peces (Aterinidae e Ictaluridae).
5. Se confirma la presencia de un lago antiguo en Santa Fe del Río por los registros fósiles de las familias de peces Aterinidae, Cyprinidae e Ictaluridae, el género de anfibios *Lithobates*, el género de tortugas *Kinosternon*, los géneros de serpientes *Thamnophis* y *Lampropeltis* y los registros de aves acuáticas de un escolopacido y un anseriforme.

## 7. Literatura citada

- Álvarez, T. 1976. Restos óseos rescatados del cenote sagrado de Chichén Itzá, Yucatán. Cuadernos de trabajo del INAH, 15, 19-39.
- Arellano, A. R. V. y E. Azcón. 1949. Pre-Equus horses from Goleta (Morelia) Michoacan, Mexico. Bulletin of the Geological Society of America 60:1871.
- Arroyo-Cabral, J., Carreño, A. L., Lozano-García, S., Montellano-Ballesteros, M., Cevallos-Ferriz, S., y Corona, E. 2008. La diversidad en el pasado. Capital natural de México, 1, 227-262.
- Barone, R. 1995. Anatomia comparata dei mammiferi domestici. Vol. 1° Osteologia. Edagricole – Edizioni Agricole della Calderini s.r.l. Bologna, Italia 690pp.
- Batsch, A. J. 1788. Versuch einer Anleitung zur Kenntniß und Geschichte der Thiere und Mineralien: Allgemeine Geschichte der Natur, besondre der Säugthiere, Vögel, Amphibien und Fische (Vol. 1). Akademische Buchhandlung.
- Baur, G. 1893. Notes on the classification and taxonomy of the Testudinata. Proceedings of the American Philosophical Society, 31(141), 210-225.
- Bell, C. J., E. L. Lundelius, JR., A. D. Barnosky, R. W. Graham, E. H. Lindsay, D. R. Ruez, JR., H. A. Semken, JR., S. D. Webb, y R. J. Zakrzewski. 2004. The Blancan, Irvingtonian, and Rancholabrean Mammal Ages, Pags. 232-314 en M. O. Woodburne (ed.), Late Cretaceous and Cenozoic Mammals of North America. Columbia University Press, New York.
- Behrensmeyer, A. K. 1978. Taphonomic and ecologic information from bone weathering. Paleobiology, 4 (02): 150-162.
- Blaney, R. M. (1973). Lampropeltis. Catalogue of American Amphibians and Reptiles (CAAR).
- Bleeker, P. 1860. 1859. Conspectus systematis Cyprinorum. Natuurkundig tijdschrift voor Nederlandsch-Indië 20:421-441.
- Bonaparte, C. L. 1840. Prodromus systematis ichthyologiae. Nuovi Annali delle Scienze Naturali, Bologna 4
- Bowdich, T. E. 1821. An analysis of the natural classifications of Mammalia: for the use of students and travellers. J. Smith.

- Brandt, J. F. 1855. Beiträge zur nähern Kenntniss der Säugethiere Russland's (Vol. 7). Kaiserl. Academ. d. Wiss.
- Brattstrom, B. H. 1995. Record of some Pliocene and Pleistocene reptiles and amphibians from Mexico. Bulletin of the Southern California Academy of Sciences. 54(1). 1-4.
- Carranza-Castañeda, O. y A. Walton. 1992. Cricetid rodents from the Rancho El Ocote Fauna, late Hemphillian (Pliocene), state of Guanajuato. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 10(1):71-93.
- Carranza-Castañeda, O. 2006. Late Tertiary fossil localities in central México between 19° 23°N. In O. Carranza-Castañeda & E. H Lindsay (Eds.), Advances in late Tertiary vertebrate paleontology in Mexico and the Great American Biotic Interchange (pp. 45–60). México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología and Centro de Geociencias.
- Cerling, T. E., Harris, J. M., MacFadden, B. J., Leakey, M. G., Quade, J., Eisenmann, V., y Ehleringer, J. R. 1997. Global vegetation change through the Miocene/Pliocene boundary. Nature, 389(6647), 153–158.
- Cope, E. D. 1868. On the origin of genera. Proceedings of the Academy of natural Sciences of Philadelphia, 242-300.
- Cope, E. D. 1885. On loup fork in Mexico: American Naturalist. v 19, p. 494-495.
- Cope, E. D. 1892. "A Contribution to the Vertebrate Paleontology of Texas". Proceedings of the American Philosophical Society. 30 (137): 124–125.
- Cope, E.D. 1893. Second addition to the knowledge of the Batrachia and Reptilia of Costa Rica. Proceedings of the American Philosophical Society 31: 333–347.
- Cruz, J. A., Arroyo-Cabrales J., Viñas-Vallverdú R. 2009. Tortugas fósiles del Pleistoceno tardío de Santiago Chazumba, Oaxaca Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen 61, núm. 2, p. 225-232.
- Cuvier, G. (1817). Le règne animal distribué d'après son organisation, pour servir de base á l'histoire naturelle des animaux et d'introduction á l'anatomie comparée (No. QL45 C94).
- Dawson, M. R. 1958. Later Tertiary Leporidae of North America. UNIVERSITY OF KANSAS, PALEONTOLOGICAL CONTRIBUTIONS, VERTEBRATA, ARTICLE 6 Pages 1-75

- De Pietri, V.L., Costeur, L., Güntert, M., Mayr, G. 2011 A revision of the Lari (Aves, Charadriiformes) from the early Miocene of Saint-Gérard-le-Puy (Allier, France) *Journal of Vertebrate Paleontology* 31(4), 812-828.
- Dice, L. R. 1917. Systematic position of several American Tertiary lagomorphs (Vol. 10, No. 12). University of California Press.
- Eisenmann, V., y PY, V. E. M. O. W. (1988). *Studying Fossil Horses: Collected Papers After the New York International Hipparion Conference, 1981* (Vol. 1). Brill Archive.
- Fernández-Jalvo, Y. y P. Andrews, 2016. *Atlas of Taphonomic Identifications: 1001+ Images of Fossil and Recent Mammal Bone Modification*. Springer. 359 pp.
- Fischer, G. 1817. *Adversaria zoologica*. Mémoires de la Société impériale des naturalistes de Moscou, 5, 357-472.
- Fitzinger, Leopoldo Josef Franz Johann. 1843. *Systema reptillum. Fasciculus primus. Amblyglossae*. Vindobonae, Braumüller und Seidel. 106, x pp. (Dec. 31, 1843, by arbitrary fixation: Smith and Grant, 1958: 221).
- Fostowicz-Frelik, L. 2007. The hind limb skeleton and cursorial adaptations of the Plio-Pleistocene rabbit *Hypolagus beremendensis*. *Acta Palaeontologica Polonica*, 52(3).
- García-Zepeda, M. L. 2006. *Nuovi dati paleontologici dalla depressione lacustre di Cuitzeo, Michoacán, México*. Università degli studi di Firenze, Italia. Tesis doctoral.
- Gidley, J. W. 1922. Preliminary report on fossil vertebrates of the San Pedro Valley, Arizona, with descriptions of new species of Rodentia and Lagomorpha. *United States Geological Survey, Professional Paper*, 131E:119–131. Gray, J. E. 1821. On the natural arrangement of vertebrate animals. *London Med. Repository Rev.* 15:296-310.
- Gutiérrez-Bedolla, M. 2011. *Estudio paleontológico y estratigráfico de Uruétaro, municipio de Álvaro Obregón, Michoacán*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. pp. 102.
- Guzmán, A. F. 2015. El registro fósil de los peces mexicanos de agua dulce. *Revista mexicana de biodiversidad*, 86(3), 661-673.
- Hay, O. P., y Cook, H. J. 1930. *Fossil Vertebrates Collected Near, Or in Association with Human Artifacts at Localities Near Colorado, Texas, Frederick, Oklahoma and Folsom, New Mexico*. Colorado Museum of Natural History.

- Hillson, S. 2005. *Teeth*. Institute of Archeology. Cambridge university press. Second edition.
- Holman J. A. 2000. *Fossil snakes of North America: origin, evolution, distribution, paleoecology*. Indiana University Press.
- Huxley, T. H. 1880. *The crayfish: an introduction to the study of zoology* (No. 28). C. Kegan Paul.
- Illiger, J.K.W, 1811. *Prodromus Systematis Mammalium et Avium: additis terminis zoographicis utriusque classis, eorumque versione germanica*: Berlin, Berolini: Sumptibus C. Salfeld, 301 p.
- Jacobs, L. L. y E. H. lindsay. 1981. *Prosigmodon oroscoi*, a new Sigmodon rodent for the LateTertiary of Mexico. *Journal of Paleontology*, 5(2):425-430.
- Jacobs, L., y E. H. Lindsay. 1984. Holartic radiation of Neogene muroid rodents and the origin of South American cricetids. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 4:265-272.
- Kellogg, L. 1910. Rodent fauna of the late Tertiary beds at Virgin Valley and Thousand Creek, Nevada. *Univ. California Pub., Bull. Dept. Geol.*, v. 5, no. 29, p. 421-437, fig. 1-20.
- Kurten y Anderson. 1980. *Pleistocene mammals of North America*. Columbia University Press, New York.
- Leidy, J. 1865. Bones and teeth of horses from California and Oregon. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 17(2), 94.
- Lineo, C. 1758. *Systema Naturae per Regna Tria Naturae. Secundum Classes, Ordines, Genera, Species, cum Characteribus Differentiis Synonymiis Locis*. Editia decima, reformata. Laurentii, Stockholm, Salvi, 1:824p.
- Lindsay, E. H. y L. Jacobs. 1985. Pliocene small mammals fossils from Chihuahua, México. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana*, 51-53.
- López-García, J. R. 2008. *Estudio estratigráfico, sedimentológico y paleontológico de la región de Indaparapeo-Charo, Paleolago de Cuitzeo, Michoacán, México 2008*. Tesis de maestría: Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.
- Lyman, R. L. 1994. *Vertebrate taphonomy*. Cambridge University Press. 527 pp.

- Lystad Gray R. D. 2018. Vertebrados del Blancano de Santa Fe del Rio, Municipio de Penjamillo, Michoacán, México. Trabajo de Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- MacFadden, B. J. 2000. Cenozoic Mammalian herbivores from the Americas: reconstructing ancient diets and terrestrial communities. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 31, 33–59.
- Matthew, W. D. 1924. The evolution of the horse: A record and its interpretation. *Quart. Rev. Biol.* 1:139-185.
- Miller, W. E., y Carranza-Castañeda, O. 1982. New lagomorphs from the Pliocene of central Mexico. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 2(1), 95-107.
- Miller, W. E. y O. Carranza-Castañeda. 1984. Late Cenozoic mammals from central Mexico. *Journal of Vertebrate Paleontology* 4:216–236.
- Mlynarski, M. 1976. *Handbuch der Paläoherpetologie*. Part 7. Testudines. Stuttgart: Gustav Fischer.
- Mora, C. L. 2003. Roedores fósiles del Pleistoceno superior de la localidad La Palmera de San Carlos, provincia de Alajuela, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*.
- Morgan, G. S., Sealey, P. L., y Lucas, S. G. 2011. Pliocene and early Pleistocene (Blancan) vertebrates from the Palomas Formation in the vicinity of Elephant Butte Lake and Caballo Lake, Sierra County, southwestern New Mexico. *Fossil Record*, 3, 664-736.
- Osborn, H. F. 1936. *Proboscidea* (Vol. 1). Рипол Классик.
- Owen, R. 1848. Description of teeth and portion of jaws of two extinct anthracotheroid quadrupeds (*Hypotamus uectianus* and *H. bouinus*) discovered by the Marchioness of Hastings in the Eocene deposits on the N. W. coast of the Isle of Wight, with an attempt to develop Cuvier's idea of the classification of pachyderms by the number of toes. *Quart. J. Geol. Soc.* 5:380-383.
- Owen, R. 1869. On fossil teeth of equines from Central and South America, referable to *Equus conversidens*, *Equus tau*, and *Wquus arcidens*. *Proceedings of the Royal Society of London*, 17:267-268. London.
- Peláez-Campomanes, P., y Martin, R. A. 2005. The Pliocene and Pleistocene history of cotton rats in the Meade Basin of southwestern Kansas. *Journal of Mammalogy*, 86(3), 475-494.

- Plata-Ramírez R.A. 2017. Dieta y el hábitat mastofauna del Blancano. Trabajo de Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Polaco, J. Guzmán-Gutierrez, Aguilar J. 2013. La Paleodiversidad de Guanajuato, una Síntesis del Desarrollo de su Paleontología de Vertebrados.
- Potts, R., y Behrensmeyer, A. K. 1992. Late Cenozoic terrestrial ecosystems. In A. K. Behrensmeyer, J. D. Damuth, W. DiMichele, R. Potts, S. Sues Hans-Dieter, & J. L. Wing (Eds.), *Terrestrial ecosystems through time. Evolutionary paleoecology of terrestrial plants and animals* (pp. 419–519). Chicago: University Chicago Press.
- Rafinesque, C. S. 1814. *Precis des Decouvertes et Travaux Somnologiques*. Palermo. 55 pp.
- Rafinesque, C. S. 1815. *Analyse de Nature, ou Tableau de l'Univers et des Corps Organisés*. Palermo: Jean Barravecchia.
- Ratnikov, V. Y. 2001. Osteology of Russian toads and frogs for paleontological researches. *Acta zool. cracov*, 44(1), 1-23.
- Risso, A. (1826). *Histoire naturelle des principales productions de l'Europe méridionale et particulièrement de celles des environs de Nice et des Alpes Maritimes* (Vol. 3). Levrault.
- Rogers, K. 1984. Herpetofauna of the Big Springs and Hornet's Nest Quarries (Northeastern Nebraska, Pleistocene: Late Blancan). *Transactions of the Nebraska Academy of Sciences* 12: 81-94.
- Rosen De. 1964. The relationships and taxonomic position of the halfbeaks, killifishes, silversides, and their relatives. *Bulletin American Museum Natural History* 127(5): 217-267.
- Sanchis, A. S., y Fernández, J. P. 2011. Nuevos datos sobre la presencia de *Lepus* en el Pleistoceno medio y superior del Mediterráneo ibérico: la Cova del Bolomor (Valencia).
- Say, T., y Ord, G. 1825. Description of a new species of Mammalia, whereon a genus is proposed to be founded. *Journal of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 4, 352-356.
- Taseer Hussain, S. 1975. Evolutionary and functional anatomy of the pelvic limb in fossil and recent Equidae (*Perissodactyla*, Mammalia). *Anatomia, Histologia, Embryologia*, 4(3), 193-222.



- Villar, J. A. 1975. Contribución al conocimiento de los peces fósiles de Chapala y Zacoalco (Aterinidos y ciprinidos). In *Anales del Museo Nacional de México* (No. 4, pp. 191-209). Museo Nacional de México.
- Voss RS. 2015. Tribe Sigmodontini Wagner, 1843. En: Patton JL, Pardiñas UFJ y D'Elía G (eds) *Mammals of South America. Volume 2: rodents: 566–571*. The University of Chicago Press. Chicago y Londres.
- Wagner J. 1843. *Handbuch der Naturgeschichte: zum Gebrauche für Studienanstalten und Gewerbschulen. Naturgeschichte des Pflanzenreichs, vol. 2, con Johann Nepomuk von Fuchs*. Ed. Dannheimer, 322 pp.
- White, J. A. (1991). North American Leporinae (Mammalia: Lagomorpha) from late Miocene (Clarendonian) to latest Pliocene (Blancan). *Journal of Vertebrate paleontology*, 11(1), 67-89.
- Wood, H. E. II, R. W. Chaney, J. Clark, E. H. Colbert, G. L. Jepsen, J. B. Reeside Jr., y C. Stock. 1941. Nomenclature and correlation of the North American continental Tertiary. *Bulletin of the Geological Society of America* 52:1–48, Plate 1.
- Woodburne, M. O. 2004. *Late Cretaceous and Cenozoic mammals of North America: biostratigraphy and geochronology*. Columbia University Press.
- Woodburne, M. O. 2006. *Late Cretaceous and Cenozoic Mammals of North America*. Columbia University Press. Pp 391.

### **Capítulo 3. Inferencias paleoambientales y tafonómicas con el uso de Elementos de Tierras Raras (ETR) de Santa Fe del Río.**

**Robert Diego Lystad Gray<sup>1</sup>, Javier Ponce Saavedra<sup>2</sup>, Alejandro H. Marín Leyva<sup>1</sup>, María Luisa García Zepeda<sup>1</sup>, Joaquín Arroyo-Cabrales<sup>3</sup>, Peter Schaaf<sup>4</sup>**

*<sup>1</sup>Laboratorio de Paleontología, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. R 2º Piso, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>2</sup>Laboratorio de Entomología “Biol. Sócrates Cisneros Paz”, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edif. B4 2º Piso, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.*

*<sup>3</sup>Laboratorio de Arqueozoología “M. en C. Ticul Álvarez Solórzano”, Subdirección de laboratorio y Apoyo Académico, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Moneda #16, Col. Centro, 06060, Ciudad de México, México.*

*<sup>4</sup>Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica (LUGIS), Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, 04150, Ciudad de México, México.*

#### **Resumen**

Los Elementos de Tierras Raras (ETR) forman óxidos estables e insolubles que son transportados en las corrientes de agua hasta incorporarse en el sitio de depósito y posteriormente en los restos óseos que con el tiempo llegan a fosilizarse. Una vez que estos elementos saturan los fósiles, su composición no cambiará más, funcionando como un registro único del sitio en que fosilizaron. La columna estratigráfica de Santa Fe del Río, Michoacán, México, posee 17 estratos con sedimentos variados (arcillas, limos, grandes clastos y arenas volcánicas) que corresponden a un antiguo lago, dos de ellos tienen restos fósiles; el estrato 17 (superior) y el 14 (inferior). El estrato 14 posee fósiles índice que corresponden a la edad de mamíferos terrestres de América de Norte (NALMA) del Blancano (Plioceno

tardío-Pleistoceno temprano), que abarca aproximadamente entre 4.6 Millones de años (Ma) hasta 1.35 Ma. En este trabajo se analiza la composición de ETR en sedimentos y fósiles, con el objetivo de determinar su composición en las muestras para inferir las condiciones tafonómicas y paleoambientales del sitio. Se analizan un total de 27 muestras, 17 en rocas sedimentarias y diez en fósiles de ambos estratos fosilíferos; cinco del estrato 17 y cinco del 14, dentro del análisis se consideraron las anomalías de Cerio (Ce) y Europio (Eu), que permitieron conocer las condiciones de óxido-reducción en los sedimentos y fósiles. Los resultados de los patrones de ETR en los sedimentos volcánicos sugieren un origen magmático similar, provenientes de campos volcánicos dentro del estado, los valores de ETR en los fósiles del estrato 14 sugieren una fósil diagénesis temprana con condiciones similares, lo que indica que no sufrieron movimiento post-deposicional, los del nivel 17 sugieren una diferencia en la fósil diagénesis temprana, implicando diferentes ambientes de depósito y movimiento post-deposicional. De acuerdo con las anomalías de Ce y Eu se concluye que las condiciones de fosilización en el sitio eran oxidantes.

**Palabras clave: rocas sedimentarias, fósiles, Blancano, lago.**

### **Abstract**

The Rare Earth Elements (REE) form stable and insoluble oxides that are carried by water currents until they get incorporated into the depositional site and afterwards to the bone remains that will eventually become fossils over time. Once these elements saturate the fossils their composition will never change, working as a unique register of the place they fossilized in. The stratigraphic column of Santa Fe del Río, Michoacan, Mexico possess 17 strata with varied sediments (clay, silt, great sized clasts and volcanic sands) belonging to an ancient lake, two of which have fossils remains in them; strata 17 (superior) and 14 (inferior). Strata 14 has index fossils that belong to the North American Land Mammal Age (NALMA) called Blancan (late Pliocene-early Pleistocene) that has an approximate duration of 4.6 Million years (Myr) to 1.35 Myr. In the present work the analysis of Rare Earth Elements (REE)

was done in sediments and fossils with the objective of determining their composition to infer taphonomic and paleoenvironmental conditions in the site. A total of 27 samples were analyzed, 17 in sedimentary rocks and ten in fossils of both fossiliferous strata; five from strata 17 and five from 14. The analysis considered the Cerium (Ce) and Europium (Eu) anomalies that allowed to infer the oxide-reduction conditions in the sediments and fossils. The results in the patterns of REE in the fossils from the strata 14 suggest an early fossil diagenesis with similar conditions, implying that they didn't suffer post-depositional movement. On the other hand the fossils from strata 17 indicate a difference in their early fossil diagenesis, implying that there were different depositional environments and post-depositional movement. According to the Ce and Eu anomalies it's possible to infer that the conditions of fossilization were oxic.

**Key words: sedimentary rocks, fossils, Blancan, lake.**

## 1. Introducción

La localidad de Santa Fe del Río está ubicada en un banco de materiales al norte del estado de Michoacán en el municipio de Penjamillo, en la columna estratigráfica realizada para el sitio se distinguen 17 estratos, dos de ellos con restos fósiles de los que se pretende corroborar su procedencia; estrato 14 (inferior) y 17 (superior), la presencia del fósil índice *Nannippus peninsulatus* en el estrato inferior indica que pertenece a la NALMA (North American Land Mammal Ages) del Blancano. La identificación de taxones de agua dulce como peces, tortugas, ranas y aves acuáticas sugiere la presencia de sedimentos de un antiguo paleolago. Los sedimentos lacustres se intercalan con eventos volcánicos que se cree se produjeron por medio de eventos volcánicos locales (estratos 4, 8, 10, 13, 15 y 16).

Aproximadamente la mitad de las localidades fosilíferas conocidas hasta la fecha, se encuentran en ambientes continentales dadas por corrientes fluviales y lacustres, lo que indica que estos tipos de ambientes son frecuentes y muy favorables para el enterramiento de huesos y su preservación (Rogers, 2007), los sedimentos de lagos por ejemplo, se componen de materiales que se transportan por corrientes derivadas de zonas aledañas como productos resultantes de la diagénesis y meteorización y restos fósiles que registran la evolución de cambios ambientales en la zona (Ng y King, 2004), similar al caso de Santa Fe del Río.

Las características geoquímicas de las rocas sedimentarias pueden utilizarse para conocer la fuente de origen de la roca y la historia del transporte de los sedimentos (Silva *et al.*, 2014). Los estudios de elementos traza se han convertido en una herramienta útil para la geología moderna, ya que son mejores para discriminar procesos geológicos que los elementos mayoritarios, los más utilizados son los lantánidos también conocidos como Elementos de Tierras Raras (ETR) (Rollinson, 1994). Los Elementos de Tierras Raras en los sedimentos y fósiles, forman óxidos muy estables e insolubles y son transportadas primordialmente como partículas suspendidas por corrientes de agua (Rollinson, 1994). El efecto de diagénesis y meteorización son mínimos en ellas (Nesbitt, 1979). Es por eso que el contenido de

ETR en el sedimento refleja bien la erosión y transporte de partículas que entran en una corriente de agua que los lleva hasta el sitio de depósito de la roca original (Ng y King, 2004), mientras que en los fósiles aporta información sobre el ambiente de depósito y la posible reelaboración tafonómica (Rollinson, 1994). Los ETR se incorporan en los huesos de los animales al ser ingeridos en su consumo de agua en cantidades poco significativas que se pueden medir en ppb (partes por billón), sin embargo, al fosilizar se incorporan en proporciones mucho mayores a través de los sedimentos en los que son enterrados junto con la ayuda del agua disponible en el suelo (Trueman et al., 2006; Tütken *et al.*, 2011).

Las concentraciones de ETR en rocas se normalizan de acuerdo con un estándar de referencia, que comúnmente comprende a los valores de condritas, porque se consideran como muestras relativamente poco fraccionadas del sistema solar. La normalización de la condrita permite identificar el grupo al que pertenece la firma de ETR de la muestra analizada, las distintas concentraciones de ETR en los sedimentos eventualmente se incorporan a los restos óseos que funcionan como huellas digitales del sitio de depósito, los cuales no cambiarán una vez que el hueso se sature de ETR durante la diagénesis temprana, las similitudes o diferencias entre las firmas de ETR en los fósiles pueden usarse para identificar el grado de retrabajamiento que existe en un yacimiento (Rollinson, 1994; Domingo *et al.*, 2011). Los elementos Ce y Eu pueden presentar anomalías visibles en las firmas de ETR por su configuración química, que aportan información sobre ciertas condiciones de depósito (Rollinson, 1994; Trueman y Tuross, 2002).

Dadas las consideraciones previas en este estudio se analizaron los Elementos de Tierras Raras, por medio del uso de Espectrometría de Masas Acoplado Inductivamente (ICP-MS), los sedimentos volcánicos se normalizaron con los valores de Condrita C1 y se compararon con firmas de ETR disponibles de volcanes cercanos, los fósiles provenientes de dos estratos dentro de una misma columna se normalizaron con valores de NASC (North American Shale Composite), se tomaron muestras de cinco fósiles del estrato inferior y cinco del estrato superior, con la

finalidad de elaborar una reconstrucción tafonómica y paleoambiental del yacimiento fosilífero de Santa Fe del Río.

## **2. Antecedentes**

Los lantánidos son el grupo de elementos traza comúnmente denominados como Elementos de Tierras Raras, estos metales con número atómico de entre 57 y 71 son el Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Prometio (Pm), Samario (Sm), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disproso (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb) y Lutecio (Lu), todos ellos poseen propiedades físicas y químicas similares que forman iones estables (Rollinson, 1994). Los patrones de ETR que posee una muestra pueden ser clasificados a su vez en ETRL (Elementos de Tierras Raras Ligeros) que incluye desde el Lantano (La) al Neodimio (Nd), ETRM (Elementos de Tierras Raras Medios) del Samario (Sm) al Disproso (Dy) y en ETRP (Elementos de Tierras Raras Pesados) del Terbio (Tb) al Lutecio (Lu) (Trueman, 1999). Los elementos de ETR deben normalizarse de acuerdo con ciertos valores estándar, esto se debe a la configuración electrónica que posee cada elemento, los elementos con número atómico par son más estables que los que tienen números impares, lo que hace que presenten un patrón en zigzag en la gráfica si no se encuentran normalizados, en el caso de los sedimentos de origen volcánico se usa la Condrita C1 los cuales sirven como punto de comparación para los valores obtenidos de la muestra o los valores de NASC (North American Shale Composite) que se usan para otros sedimentos (Rollinson, 1994). Los iones de la mayoría de los ETR están en estado de oxidación 3+, sin embargo en los elementos Ce y Eu existen también iones  $Ce^{4+}$  y  $Eu^{2+}$  generando un ion más pequeño y más grande respectivamente, lo cual da lugar a lo que se denomina como anomalías. Los valores de Ce y Eu por encima del 1.0 se definen como una anomalía positiva y los que se encuentran por debajo del 1.0 como negativa comparados con los valores de la Condrita C1 o de NASC (Rollinson, 1994). Durante la meteorización los ETRL se adsorben sobre la superficie de minerales y restos óseos, mientras que los ETRP forman complejos acuosos más estables y no

se incorporan permaneciendo en solución en la mayoría de los casos. Un sistema fluvial asociado a llanuras de inundación o suelos pueden tener concentraciones bajas de ETRP comparado con un sistema asociado al canal de un río en el que se esperaría una cantidad de ETRP más elevada (Trueman, 1999). Fósiles que tienen patrones de ETRP elevados y ausentes de ETRM son indicativos de ambientes con pH alto y los que tienen una alta riqueza de ETRL aunada a una anomalía positiva del elemento Ce son indicativos de ambientes con pH de condiciones reductoras (Suarez *et al.*, 2010).

Los estudios de ETR pueden ser una herramienta de gran ayuda en reconstrucciones paleoambientales y tafonómicas en ambientes sedimentarios. Los análisis geoquímicos de las muestras óseas brindan información relevante sobre los cambios composicionales que los fósiles han sufrido después de su enterramiento, estos cambios afectan al contenido de la mayoría de los elementos que los forman (Merino *et al.*, 2006), también nos dan un registro adicional de cómo fueron cambiando las condiciones físico-químicas de los fluidos intersticiales del cuerpo de agua en cuestión (Barker *et al.*, 1997). Este hecho se debe a que durante el proceso de fosilización en su fase más temprana los huesos incorporan elementos del ambiente sedimentario en el que fueron depositados (Henderson *et al.*, 1983). Los ETR no son esenciales en las funciones fisiológicas de los animales, al ser ingeridas se incorporan en concentraciones poco significativas en huesos y dientes que se puede medir en ppb (ng/g), pero al fosilizarse se incorporan en una proporción mucho mayor de hasta tres a cinco ordenes de magnitud a través de los sedimentos en los que son enterrados junto con la ayuda de la humedad presente en el suelo (Trueman *et al.*, 2006; Tütken *et al.*, 2011). La concentración de ETR se enriquece más durante el proceso de diagénesis y recristalización de la apatita de los huesos por la afinidad química que poseen, la concentración original se llega a preservar en la corteza interior de los huesos fosilizados o en el esmalte de los dientes (Tütken *et al.*, 2011), lo que implica que la composición de ETR pudiera variar incluso en un mismo fósil, generalmente la concentración de ETR en la parte exterior es mayor y a medida que se profundiza en él la concentración disminuye dado que está menos



expuesto a los agentes externos. Por éste motivo generalmente se utiliza hueso cortical para la toma de las muestras (Suarez *et al.*, 2010).

La recristalización que se da en los huesos en los distintos ambientes de depósito contienen una composición de elementos traza diferente y única, una vez que el hueso se satura de ETR su composición se mantendrá estable y no cambiará más, los fósiles registran de manera permanente esta firma de ETR que es diagnóstica de la roca original o del ambiente acuático en el que fosilizaron (Trueman, 1999). En muchas de las localidades arqueológicas y paleontológicas existen huesos y dientes que están dentro de un contexto estratigráfico incierto debido a que se encuentran retrabajados o que sufrieron movimiento post-deposicional, lo que genera confusión espacial y temporal, pero mediante el uso de ETR se puede llegar a resolver esta problemática (Trueman y Benton en 1997). Las variaciones en los ETR puede ayudar a inferir si los fósiles fueron transportados y/o mezclados con otros ensambles de vertebrados o si el ambiente de depósito es el original (Trueman, 1999). Trueman y Benton (1997) y Trueman *et al.* (2006) consideran que si la composición de elementos de tierras raras es igual en los fósiles que en el sitio de depósito se denomina autóctono y si la composición de ETR varía entre la muestra del depósito con la del fósil se considera alóctono.

En el Cerro de los Batallones, España una localidad miocénica con abundantes ejemplares se realizó un estudio por Domingo y colaboradores en 2011 en fósiles provenientes de dos estratos fosilíferos distintos dentro de una misma columna estratigráfica, en el que concluyeron por medio de análisis de tierras raras que el sitio de depósito en que se encontraron era el sitio original donde se habían fosilizado por la coincidencia de las firmas de ETR con los sedimentos y que por ende eran faunas cronológicamente sucesionales, dado que no estaban retrabajados, solo uno de los fósiles a los que se les realizó el estudio poseía una firma de ETR diferente del resto, sugiriendo que este sí era retrabajado, en otras palabras se había fosilizado en un sitio distinto y vuelto a redepositar en el sitio donde originalmente fosilizaron los restos autóctonos.

Tanto en Florida como en Texas existían localidades con restos fósiles de una ave del terror llamada *Titanis walleri* que presentaban una fauna mezclada, perteneciente tanto al Pleistoceno tardío (ca. 15 ka) de Texas y Florida como al Plioceno tardío (ca. 2.2 Ma) en Florida y Plioceno temprano (ca. 5 Ma) de Texas, MacFadden y colaboradores en 2007 resuelven este problema por medio del estudio de ETR en los restos fósiles, en el que distinguen al ave del terror del resto de fósiles pleistocénicos asignándoles una edad de Plioceno tardío por la similitud entre las firmas de ETR entre el fósil y el estrato, descartando la evidencia de que existían aves del terror para el Pleistoceno del estado en América del Norte.

Un estudio realizado por Trueman y colaboradores en 2005 en Cuddie Springs, Australia, contiene un registro abundante de megafauna pleistocénica junto con restos humanos dentro de un mismo contexto estratigráfico. Razón por la cual se creía que los humanos habían tenido una fuerte influencia en la extinción de la megafauna en Australia. Sin embargo, por medio del uso de ETR se distinguieron dos temporalidades de acuerdo con sus respectivas firmas; una en la que sólo había megafauna hace aproximadamente 46.5 ka, fechamiento que coincide con eventos de cambios climáticos, y en la segunda se mezcla megafauna con restos humanos de entre 36 a 30 ka. Lo que indica que la coexistencia entre humanos y megafauna se dio posterior a eventos significativos de cambios climáticos que fueron afectando a la megafauna de manera gradual miles de años antes de la presencia de humanos. Otro estudio realizado por Trueman y colaboradores en 2006 en una localidad pleistocénica en la Formación Olorgesailie al sur de Kenia, distingue 396 fósiles en cuatro columnas estratigráficas. Cada columna y ubicación influenciaron significativamente las composiciones de ETR presentes en los fósiles. De las cuatro columnas se asignó más del 90% de los fósiles a su respectivo estrato por medio de un análisis discriminante de tierras raras.

### **3. Material y Métodos**

#### **3.1 Trabajo en Campo**

Se tomaron 100 gramos de muestra de sedimento de cada uno de los estratos presentes en la columna estratigráfica. Las muestras se separaron herméticamente en bolsas individuales con el número de estrato, fecha, y la localidad. También se colectaron distintos fósiles que a su vez fueron etiquetados y separados para poder ser transportados al laboratorio de Paleontología de la Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) para su posterior análisis geoquímico.

#### **3.2 Trabajo en Laboratorio**

##### **3.2.1 Preparación de las muestras de sedimentos**

El material de laboratorio (el mortero de ágata, la balanza, la piceta de medio litro, la espátula y los viales) que se utilizó para la preparación de las muestras se lavó con jabón Hyclin Plus Neutro y se enjuagó con agua desionizada para evitar cualquier tipo de contaminante. Entre la preparación de cada muestra se volvió a lavar todo el material. Las 17 muestras previamente separadas y secadas de sedimento (100 gramos) se dividieron mediante el método de cuarteo, el que consiste en dividir en cuatro porciones aproximadamente iguales los 100 gramos de muestra para la obtención de 25 gramos de manera aleatoria. Estos 25 gramos se pulverizaron en el mortero de ágata. Este polvo se cuarteó una vez más y se siguió pulverizando hasta obtener un polvo fino. Del polvo homogéneo se obtuvo un gramo de muestra que se colocó en un vial limpio con su respectiva etiqueta (**Figura 1**). Las muestras se pesaron con una Balanza Electrónica de Bolsillo de la marca Rhino con precisión de 0.01 gramos.



**Figura 1.** Preparación de las muestras de sedimento. A la izquierda se tiene el mortero con el que se realizó el pulverizado y la balanza con el polvo pesado. A la derecha se tiene el contenedor del polvo de ETR con su etiqueta correspondiente.

### 3.2.2 Preparación de las muestras de los fósiles

Se seleccionaron cinco fósiles de cada estrato fosilífero dando un total de diez para las muestras de ETR, los fósiles se encuentran almacenados actualmente en la Colección Paleontológica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y corresponden a los números UM3354-UM3358 del estrato superior y los números UM3359-UM3363 del estrato inferior. Los fósiles se libraron de sedimento con un Micro Drill eléctrico de la marca DRILLCO con una fresa de diamante y se enjuagaron con agua desionizada antes de tomar la muestra para limpiarlos y evitar que se contaminara. De igual modo que con los sedimentos todo el material fue lavado previamente con jabón Hyclin Plus Neutro y enjuagado con agua desionizada, también se lavó de nuevo entre la preparación de cada muestra. Una vez que se limpiaron los fósiles se procedió a obtener 200 mg de muestra pulverizada ya sea, con el Micro Drill eléctrico, o en caso de ser muy pequeños con el mortero de ágata similar a las muestras de sedimentos, se colocó el pulverizado de la muestra en un vial con su respectiva etiqueta para ser analizados en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI) Centro de Geociencias (CGEO) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Juriquilla.



**Figura 2.** Preparación de las muestras con el Micro Drill eléctrico.

### **3.3 Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente ICP-MS**

El ICP-MS (Inductively Couple Plasma Mass Spectrometry) es un análisis con gran potencial geoquímico que puede medir la mayoría de los elementos dentro de la tabla periódica con límites de detección bajos y buena precisión. Los elementos se miden simultáneamente y un análisis completo de la muestra puede realizarse en un aproximado de dos minutos. La muestra se somete a una flama con un rango de temperatura de 6 000- 10 000 K, que excita los elementos y estos reflejan una intensidad que después es convertida en concentraciones que son medibles por medio de un fotomultiplicador (Rollinson, 1994), por medio del análisis de espectrometría en masas es que se determinarán los elementos de tierras raras.

Al graficar las concentraciones de ETR estas se deben estandarizar de acuerdo con un estándar internacional. En este estudio se usan los valores del NASC (North American Shale Composite) de Gromet et al. (1984) para sedimentos y fósiles y los valores de la condrita C1 en sedimentos volcánicos utilizado para la normalización de datos. Los resultados se presentan con respecto a la concentración y el número atómico expresado con logaritmo base 10 en un diagrama Masuda-Coryell en el que se unen con una línea los puntos que representan los valores de ETR de cada elemento.

La anomalía de Ce se expresa de la siguiente manera  $Ce/Ce^*$ , en la que  $Ce^*$  equivale a un valor interpolado de Ce basado en las concentraciones del La y el Pr o el La y el Nd y se usa como indicativo de condiciones oxidantes o reductoras

(Rollinson, 1994). Se calculó la anomalía de Ce utilizando la siguiente fórmula (se utilizó la metodología de Baar *et al.*, 1985):

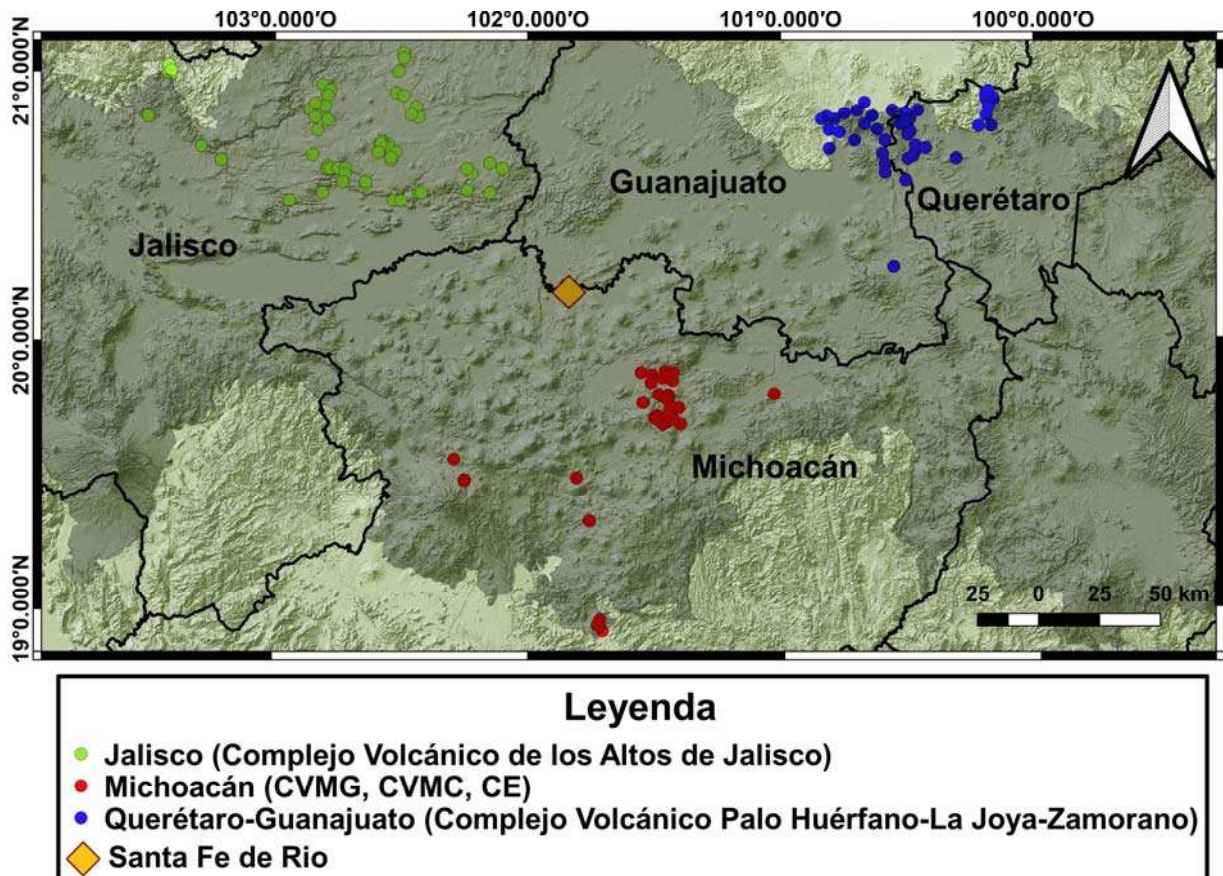
$$Ce/Ce^* = 2(Ce/Ce_{shale}) / (La/La_{shale} + Pr/Pr_{shale})$$

Las anomalías de Eu se pueden calcular comparando la concentración de la muestra con una concentración esperada obtenida de la interpolación entre los valores normalizados de Sm y Gd. De modo que la anomalía positiva de Eu se considera si sobre pasa el valor de 1 y negativa si es menor a uno. Para la anomalía de Eu se calculó mediante la siguiente fórmula (se utilizó la metodología de Rollinson, 1994):

$$Eu/Eu^* = Eu_N / \sqrt{[(Sm_N) * (Gd_N)]}$$

### 3.4 Análisis de las muestras

Los Elementos de Tierras Raras se obtuvieron por medio de un análisis de ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), en el que se usó el instrumento Thermo Series XII. Se siguió la metodología descrita por Mori *et al.* (2007). Los valores de las muestras se normalizaron de acuerdo con los valores de NASC (North American Shale Composite) en sedimentos y fósiles, mientras que los sedimentos de origen volcánico se normalizaron de acuerdo con valores de condrita C1 usando el programa de Excel con el que se obtuvieron los resultados y gráficas de los sedimentos y los fósiles. Las firmas de ETR de Santa Fe del Río de los sedimentos volcánicos se compararon con rocas ígneas de diferentes campos volcánicos de los estados de Querétaro, Michoacán, Jalisco y Guanajuato obtenidos de Gómez-Tuena *et al.* (2018) (Anexo 1) representados en el siguiente mapa (**Figura 3**).



**Figura 3.** Ubicación de Santa Fe del Río y las localidades de comparación de Querétaro, Guanajuato, Jalisco y Michoacán de ETR tomados de Gómez-Tuena *et al.* (2018). Realizado en ArcGIS versión 10.3.

#### 4. Resultados

La firma de ETR en las muestras de sedimentos (**Figura 4**) muestra claramente que todos los estratos de origen volcánico (arenas y cenizas) presentan un patrón de ETR similar que posee un enriquecimiento de ETRL y una disminución en la concentración de ETRP, no tienen anomalías significativas de Ce y Eu exceptuando el estrato 8 (SF19-08) que tiene una disminución visible de Eu, mientras que para los sedimentos SF19-14 (el estrato inferior con fósiles) tiene una firma que enriquecida de ETRL con un pico negativo de Eu y valores de ETRP más elevados que lo distingue de los estratos volcánicos, el SF19-17 (nivel superior con fósiles)

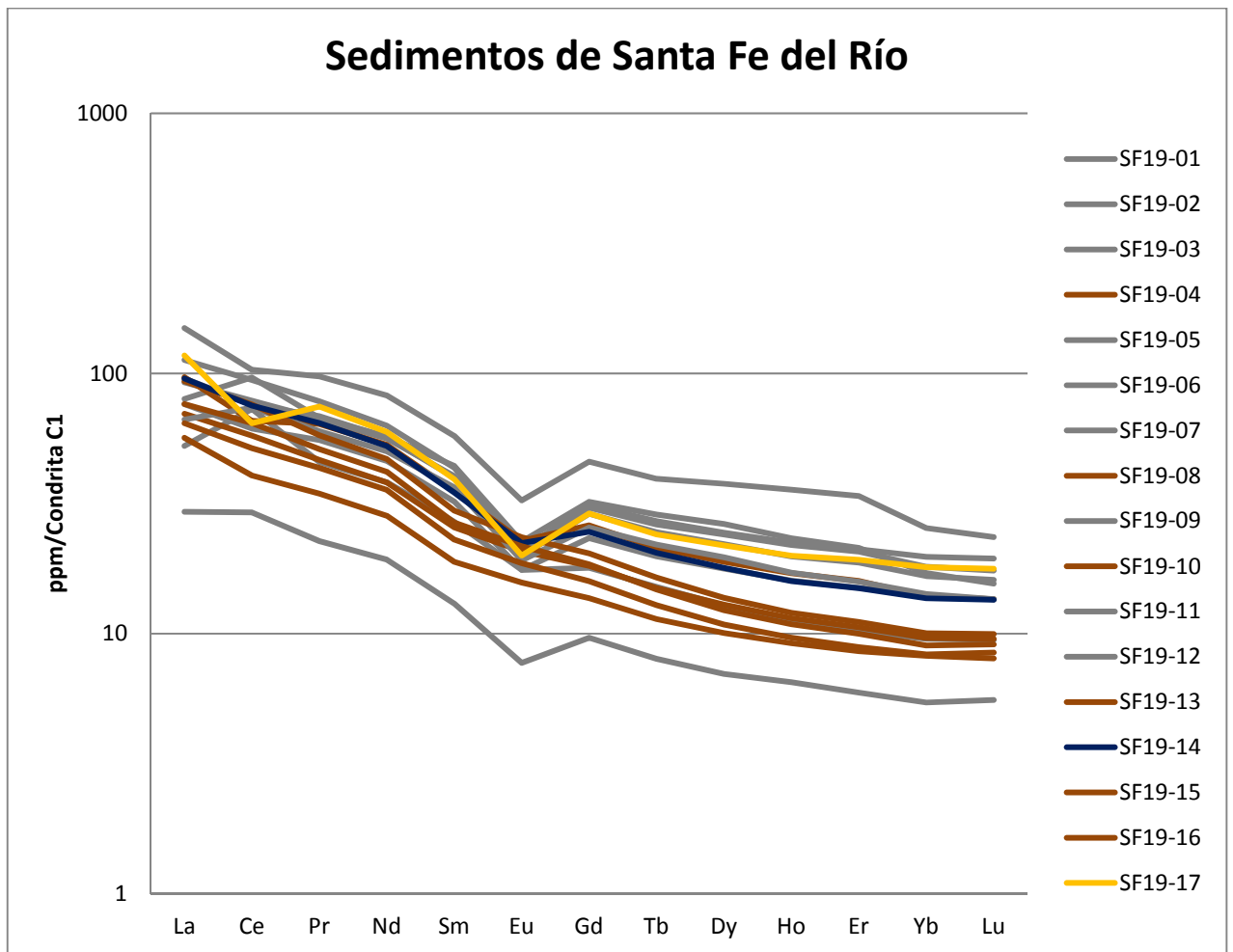
presenta una firma enriquecida de ETRL pero tiene un pico negativo de Ce y de Eu distinto a los estratos volcánicos y el estrato inferior.

Las firmas de ETR de los Altos de Jalisco (**Figura 5**) son similares a los de Santa Fe del Río en que tienen un enriquecimiento de ETRL y una disminución en ETRP, pero difieren en que los estratos volcánicos de los Altos de Jalisco tiene un pico negativo de Ce y la concentración de ETRP es ligeramente mayor. Las firmas de ETR de Querétaro y Guanajuato (**Figura 6**) tienen una cantidad más elevada de ETR ligeros, una disminución de Ce y después disminuyen ligeramente en la concentración de ETR pesados. Por último las muestras de ETR de Michoacán (**Figura 7**) poseen una cantidad de ETRL enriquecida, no tienen anomalía de Ce y tienen una reducción en la concentración de ETRP. La **Figura 8** presenta las firmas de ETR de los sedimentos de cada estrato fósil comparado con las muestras de ETR de los fósiles normalizados con valores de condrita C1.

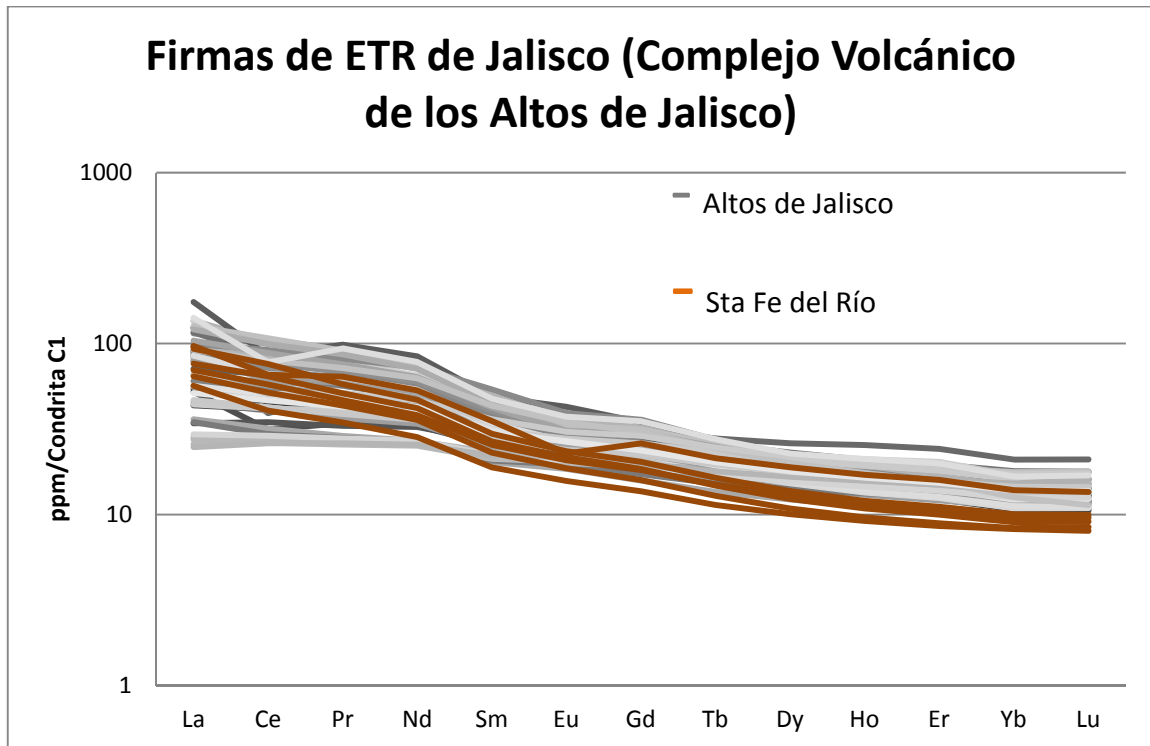
Los fósiles del nivel inferior (Estrato 14, SF19-14) normalizados con NASC presentan patrones relativamente similares, una anomalía negativa de Ce y una tendencia hacia el enriquecimiento de ETR pesados (**Figura 9**), los sedimentos no presentan esta misma anomalía de Ce.

Los restos de vertebrados del nivel superior (Estrato 17, SF19-17) muestran dos diferentes patrones de ETR (19-S01) y (19-S02 al 19-S05). Donde el fósil 19-S01 tiene una anomalía positiva de Eu y un enriquecimiento de ETR pesadas. El grupo de los otros fósiles muestran patrones similares (anomalía negativa de Ce y elevadas concentraciones de ETR pesadas) (**Figura 10**).

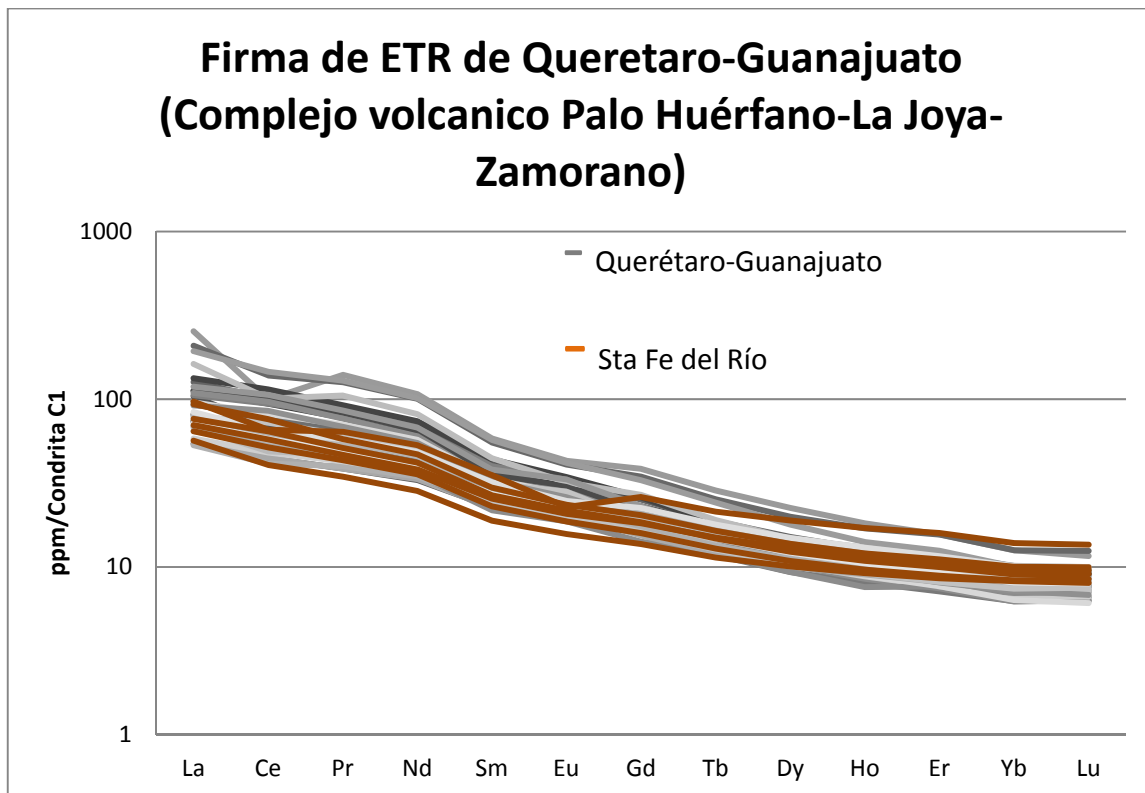




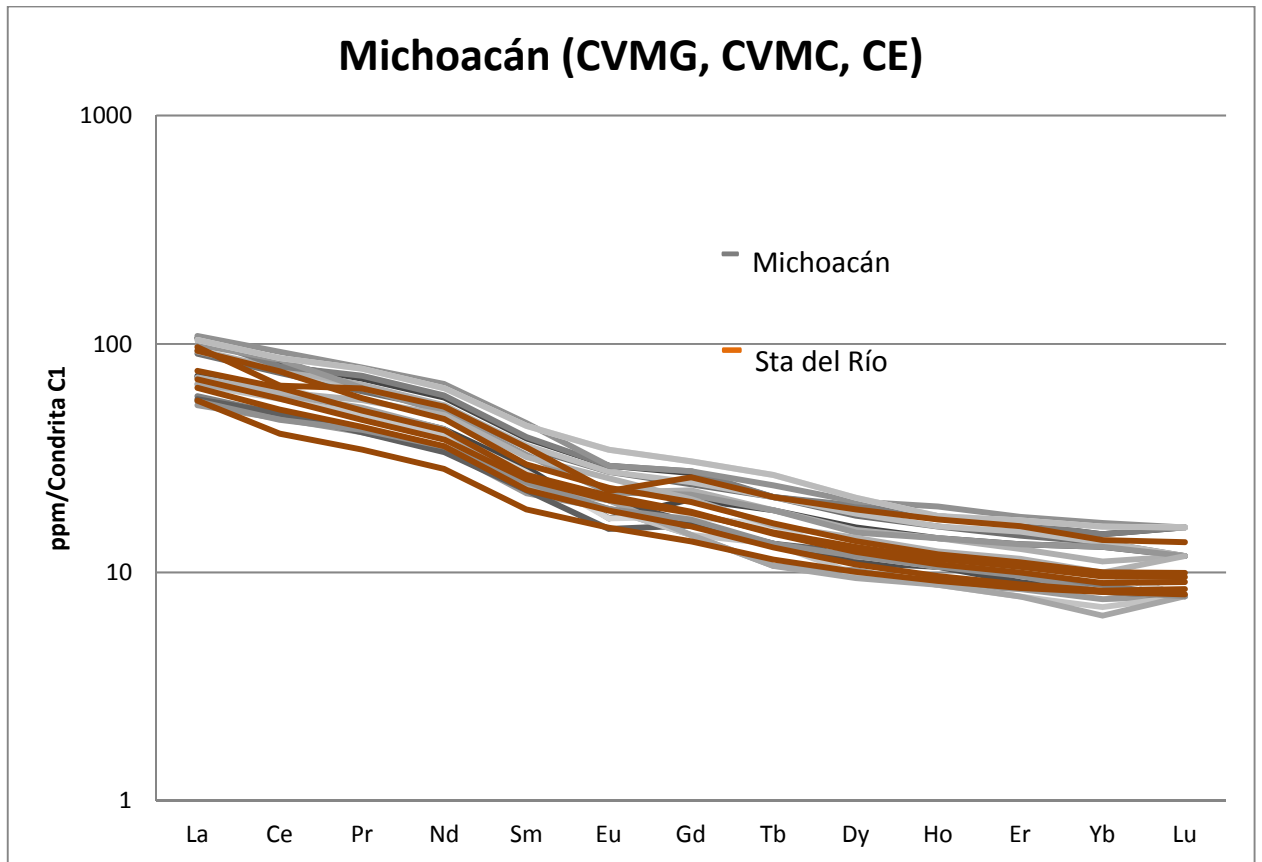
**Figura 4.** Firmas de elementos de tierras raras en los sedimentos de la columna estratigráfica de Santa Fe del Río.



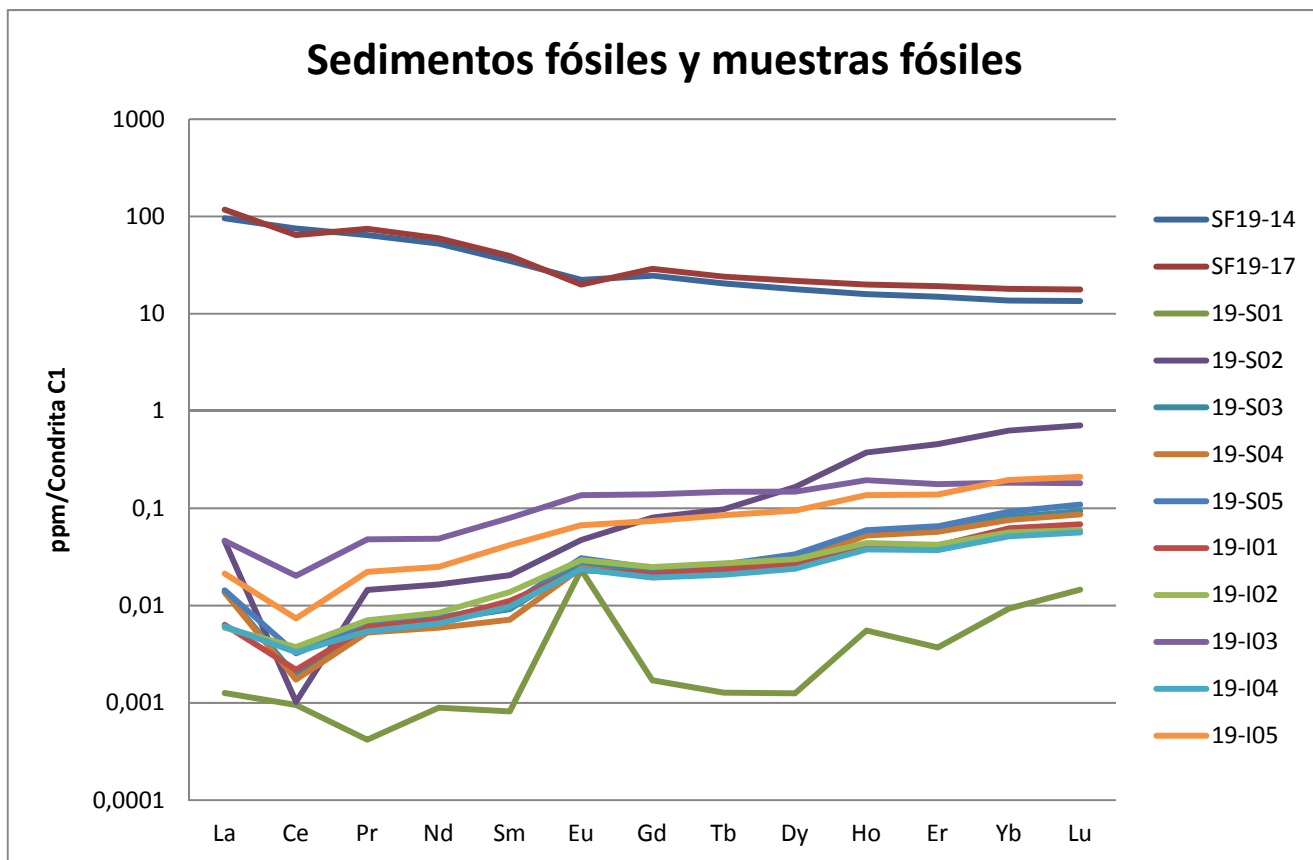
**Figura 5.** Firmas de elementos de tierras raras de los Altos de Jalisco. Tomado y adaptado de Gómez-Tuena *et al.* (2018).



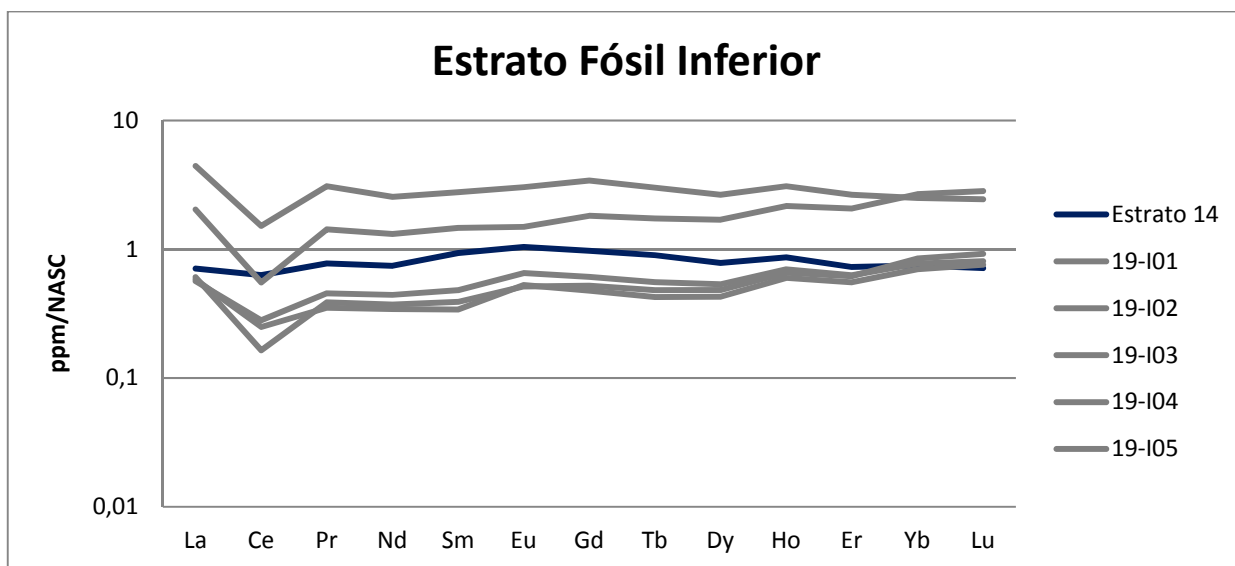
**Figura 6.** Firmas de elementos de tierras raras del complejo volcánico Palo Huérfano-La Joya-Zamorano de Querétaro. Tomado y adaptado de Gómez-Tuena *et al.* (2018).



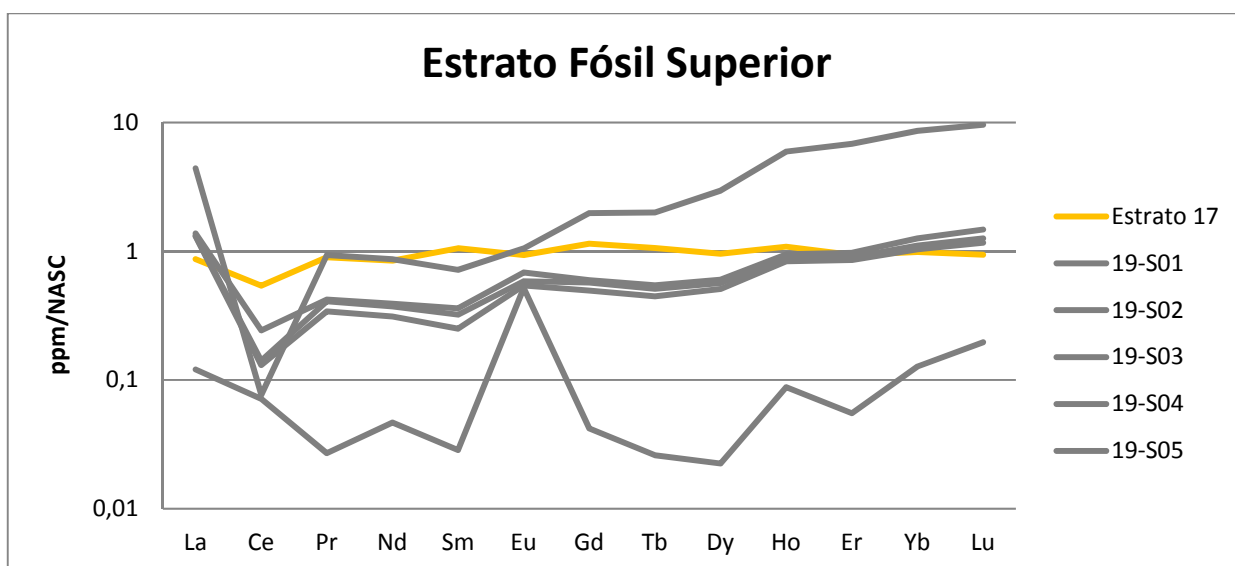
**Figura 7.** Firmas de elementos de tierras raras de Michoacán (CVMG=Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, CVMC=Campo Volcánico Mil Cumbres, CE=La Escalera Caldera). Tomado y adaptado de Gómez-Tuena *et al.* (2018).



**Figura 8.** Firmas de elementos de tierras raras de sedimentos y fósiles de ambos estratos normalizados con Condruta C1 de Santa Fe del Río.



**Figura 9.** Firma de elementos de tierras raras en sedimentos y en cinco fósiles del estrato 14 (inferior) de la columna estratigráfica. Normalizados con NASC.



**Figura 10.** Firma de elementos de tierras raras en sedimentos y en cinco fósiles del estrato 17 (superior) de la columna estratigráfica. Normalizados con NASC.

## **5. Discusión**

### **5.1 Elementos de Tierras Raras en Sedimentos**

Las firmas de ETR de Santa Fe del Río de los sedimentos volcánicos son muy parecidas entre sí, con la diferencia en la concentración, esto es indicativo de un origen magmático semejante. Al ser comparadas con las distintas firmas de ETR del estado y de los estados circundantes es posible determinar ciertos patrones de similitud y la discriminación de otros. Las firmas del estado de Jalisco parecen tener un pico negativo de Ce y la concentración de ETRP es mayor de ETR pesados que las firmas de Santa Fe del Río. Las firmas de Querétaro y Guanajuato tienen una cantidad más elevada de ETR ligeros, una disminución de Ce y disminuyen ligeramente en la concentración de ETR pesados una concentración que las firmas de la localidad no poseen. Dada la similitud con las firmas de ETR y la proximidad con las que se encuentran al sitio, las firmas del estado de Michoacán parecen ser las que más se aproximan a las de Santa Fe del Río en origen máfico, no poseen disminución de Ce y tienen una concentración elevada de ETRL y baja de ETRP.

La diferencia entre las firmas de ETR de los estratos fósiles reafirma que los sedimentos depositados provienen de orígenes distintos por lo que la procedencia de los restos muy probablemente también proviene de distintos sitios.

### **5.2 Elementos de Tierras Raras en Fósiles**

Los Elementos de Tierras Raras se concentran en los huesos rápidamente durante la diagénesis (MacFadden *et al.*, 2007). Este proceso de acumulación de ETR se da en los primeros años después de la muerte y continúa entre 10-30 k.a. (Patrick *et al.*, 2001 y Trueman *et al.*, 2004). Una vez que los huesos son alterados durante la diagénesis temprana los huesos dejan de adquirir ETR (Trueman and Tuross, 2002). De modo que, la variación de elementos de ETR en un mismo estrato se considera como una medida del grado de mezcolanza dentro del depósito, por el contrario la homogeneidad de firmas ocurre en depósitos con niveles bajos de mezcolanza (Trueman *et al.*, 2005). La firma de ETR en los fósiles del estrato 14 son muy similares entre ellas, lo que indica que el proceso de fosilización en los

restos analizados se llevó a cabo en el mismo sitio y con un grado bajo de mezcolanza, sin embargo, como lo sugieren Domingo *et al.* (2011) esto no implica que los fósiles no hayan adquirido una firma de ETR en otra parte y que una porción de ellos fueran transportados hasta donde fueron encontrados, para ello es importante tomar en consideración los aspectos geoquímicos y tafonómicos como el grado de arrastre, que en el caso del estrato inferior (14) es bajo. Para el caso del estrato superior (17) las firmas de ETR no son todas homogéneas, la firma de la muestra 19-S01 es muy diferente a las otras cuatro muestras de la biofacies, lo que indica una procedencia distinta y que en el estrato hubo una mezcla. Además el grado de intemperismo y fragmentación de los fósiles es considerablemente mayor a los del estrato 14 sugiriendo una rápida depositación.

Existen ciertos elementos que por su configuración química pueden ser más proclives a incorporarse al hueso en el proceso de diagénesis que otros elementos, por ejemplo el Ce y el Eu (Rollinson, 1994), esto se debe a la afinidad de los restos óseos de atraer e incorporar las ETR y por condiciones específicas del sitio de depósito, generando anomalías que deben ser consideradas al momento de evaluar y comparar las firmas de ETR del estrato y los restos fósiles. La presencia de Ce por debajo del uno en una muestra fósil es indicativa de condiciones óxicas (oxidantes), la ausencia por el contrario es indicativo de condiciones subóxicas o anóxicas (reductoras) característico de aguas más saladas (Trueman y Tuross, 2002), la presencia de Ce en las muestras fósiles sugiere que el proceso de fosilización se llevó a cabo bajo condiciones oxidantes. La anomalía de Eu dentro del hueso es característica de condiciones reductoras muchas veces dada por la descomposición microbiana de materia orgánicas, los valores por encima del uno indica una anomalía positiva y por ende condiciones alcalinas (Trueman *et al.*, 2003).



## **6. Conclusiones**

1. Los patrones similares de ETR en los niveles de origen volcánico sugieren un origen magmático similar (máfico). Siendo las firmas de ETR de Michoacán que incluyen el CVMG (Complejo Volcánico Mil Cumbres, Caldera La Escalera) las que más se asemejan a las de Santa Fe del Río.
2. Los valores de ETR en los fósiles del estrato inferior (14), sugieren una fósil diagénesis temprana con condiciones similares, considerando que no sufrieron movimiento post-deposicional.
3. Las firmas de ETR en los restos de vertebrados del nivel superior (17), sugieren una diferencia en la fósil diagénesis temprana, planteando diferentes ambientes de depósito y movimiento post-deposicional.
4. Las condiciones de fosilización se llevaron a cabo en ambientes de condiciones oxidantes.

## 7. Literatura citada

- Barker, M. J., Clarke, J. B. y Martill, D. M. (1997). Mesozoic reptile bones as diagenetic windows. *Bull. Soc. Géol. France*, 168: 535-545.
- Bradbury, J.P., 2000, Limnologic history of Lago de Pátzcuaro, Michoacán, México, for the past 48000 years: impacts of climate and man: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 163, 69-95.
- Cohen, D. R., Cohen, E. J., Graham, I. T., Soares, G. G., Hand, S.J., y Archer, M.(2017). Geochemical exploration for vertebrate fossils using field portable XFR. *Journal of Geochemical Exploration*, 181, 1-9.
- Davies, S.J., Metcalfe, S.E., Bernal-Brooks, F., Chacón-Torres, A., Farmer, J.G., MacKenzie, A.B., Newton, A.J., 2005, Lake sediments record sensitivity of two hydrologically closed upland lakes in Mexico to human impact: *Ambio*, 34, 470-475.
- Domingo, M. S., Domingo, L., Sánchez, I. M., Alberdi, M. T., Azanza, B., & Morales, J. (2011). New insights on the taphonomy of the exceptional mammalian fossil sites of Cerro de los Batallones (Late Miocene, Spain) based on rare earth element geochemistry. *Palaios*, 26(1), 55-65.
- Elorza, J., Astibia, H., Murelaga, X., & Pereda-Suberbiola, X. (1999). Francolite as a diagenetic mineral in dinosaur and other Upper Cretaceous reptile bones (Laño, Iberian Peninsula): microstructural, petrological and geochemical features. *Cretaceous research*, 20(2), 169-187.
- Emry, R.J. y Eshelman, R. E. 1998. The early Heminifrodian (early Miocene) Pollack Farm local fauna: first Tertiary land mammals described from Delaware: *Delaware Geological Survey Special Publication*, 153-173.
- Fichter, L. 1969. Geographical distribution and osteological variation in fossil and recent specimens of two species of *Kinosternon* (Testudines). *Journal of Herpetology*, 2:113-119.
- Garduño-Monroy, V.H, Negrín, J.L. 1992, Magmatismo, hiatus y tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano: *Geofísica Internacional*, 31, 417-429.
- Garduño-Monroy, Vo Ho, Jo Spinnler y E. Ceragioli, 1993. Geological and structural study of the Chapala rift state of Jalisco, Mexico. *Geofísica Internacional*(3213): 487-499.

- Gómez-Tuena, A., Mori, L., & Straub, S. M. (2018). Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Transmexican Volcanic Belt. *Earth-science reviews*, 183, 153-181.
- Gromet, L.P., Dymek, R.F., Haskin, L.A., and Korotev, R.L., 1984, The "North American Shale Composite": Its compilation, major, and trace element characteristics: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48, p. 2469–2482.
- Henderson, P., Marlow, C.A., Molleson, T.I., and Williams, C.T., 1983, Patterns of chemical change during bone fossilization: *Nature*, v. 306, p. 358–360, doi: 10.1038/306358a0.
- Hillis, D. M., y Wilcox, T. P. (2005). Phylogeny of the New World true frogs (*Rana*). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 34(2), 299-314.
- Holman, J. A. 1998. Reptiles of the lower Miocene (Hemingfordian) Pollack Farm Fossil Site, Delaware; pp. 141-147. In: R. N Benson (Ed), *Geology and paleontology of the lower Miocene Pollack Farm Fossil Site*, Geological Survey Special Publication 21, Delaware: Delaware.
- Hutchison, J. 1980. Turtle stratigraphy of the Willwood Formation, Wyoming: preliminary results. *University Michigan. Museum Paleontology. Paleontology*, 24:115-118.
- Hutchison, J. 1991. Early Kinosterninae (Reptilia: Testudines) and their phylogenetic significance. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 1 1:145-1 67.
- Hutchison, J. y D. M. Bramble. 1981. Homology of the plastral scales of the Kinosternidae and related turtles. *Herpetologica*, 37:73-85.
- Israde-Alcantara, I. y V. H. Garduño. 1999. Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: The evolution of the late Neogene Cuitzeo Basin System (Central Western Mexico). Special Issue. In *Ancient and Recent lacustrine systems in convergent margins*". I.Cabrera y A. Saez. Eds. *Paleogeograph~ Palaeoclimatology, Palaeoecolog~ Vo/151 N° 1-3*. PP. 209-227.
- Israde-Alcántara, I., Ortega-Guerrero B., Caballero, M., Lozano S., Sánchez G., 2009, The last ca. 1000 years of evolution of laminated Tacámbaro crateric lake based on diatom and TOC and TIC record (resumen), en 11th International Paleolimnology Symposium: Guadalajara, México, International Paleolimnology Association, 77.
- Israde-Alcántara, I., Miller, W.E., Garduño-Monroy, V.H., Barron, J., Rodríguez Pascua, M.A., 2010, Palaeoenvironmental significance of diatom and

Vertebrate fossils from Late Cenozoic Tectonic Basins in west-central México:  
A review: *Quaternary International*, 219, 79-94.

Israde Alcántara, I., Velázquez-Durán, R., Lozano García, M., Bischoff, J., Domínguez Vázquez, G., & Garduño Monroy, V. H. (2010). Evolución Paleolimnológica del Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(3), 345-357.

MacFadden, B. J., Labs-Hochstein, J., Hulbert Jr, R. C., & Baskin, J. A. (2007). Revised age of the late Neogene terror bird (*Titanis*) in North America during the Great American Interchange. *Geology*, 35(2), 123-126.

Madhavaraju, J., & Lee, Y. I. (2009). Geochemistry of the Dalmiapuram Formation of the Uttatur Group (Early Cretaceous), Cauvery basin, southeastern India: Implications on provenance and paleo-redox conditions. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), 380-394.

Merino, L., & Morales, J. (2006). Mineralogía y geoquímica del esqueleto de los mastodontes de los yacimientos Batallones 1, 2 y 5. Implicaciones tafonómicas. *Estudios Geológicos*, 62(1), 53-64.

Metcalfe, S.E., Davies, S.J., Braisby, J.D., Leng, M.J., Newton, A.J., Terrett, N.L., O'Hara, S.L., 2007, Long and short-term change in the Pátzcuaro Basin, central Mexico: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 247, 272–295.

Nesbitt, H.W., 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature* 279, 206–210.

Ng, S. L., y King, R. H., 2004. Geochemistry of Lake Sediments as a Record of Environmental Change in a High Arctic Watershed. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 64(3), 257-275.

Ortega, B., Vázquez, G., Caballero, M., Israde, I., Lozano-García, S., Schaaf, P., Torres, E., 2010, Late Pleistocene-Holocene record of environmental changes in Lake Zirahuen, Central Mexico: *Journal of Paleolimnology*, 44, 745–760.

Ortega, B., Caballero, M., Lozano, S., Israde, I., Vilaclara, G., 2002, 52000 years of environmental history in Zacapu basin, Michoacan, Mexico: the magnetic record: *Earth and Planetary Science Letters*, 202, 663-675.

Osorio-Ocampo, S., Macías, J. L., Pola, A., Cardona-Melchor, S., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H. y Benowitz, J. (2018). The eruptive history of the Pátzcuaro Lake area in the Michoacán Guanajuato Volcanic Field, central México: Field mapping, C-14 and  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  geochronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 307-328.

- Patrick, D., Terry, D.O., Jr., and Grandstaff, D.E., 2001, Rare earth element (REE) variation in fossil and modern bones: The influence of osteological materials and time: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 33, no. 1, p. 27.
- Rogers, R. R., Eberth, D. A., & Fiorillo, A. R. (Eds.). (2007). Bonebeds: genesis, analysis, and paleobiological significance. University of Chicago Press.
- Rollinson, H., 1994. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman, New York.
- Rosas, J., L. Ferrari, M. López y F. J. Urrutia, 1997. Stratigraphy and Tectonics of the Guadalajara region and Triple-junction area. Western Mexico. International Geology review. Vol. 39. p.125-140
- Silva, J. D., Srinivasalu, S., Roy, P. D., & Jonathan, M. P. (2014). Environmental conditions inferred from multi-element concentrations in sediments off Cauvery delta, Southeast India. Environmental earth sciences, 71(5), 2043-2058.
- Suarez, C. A., Macpherson, G. L., González, L. A., & Grandstaff, D. E. (2010). Heterogeneous rare earth element (REE) patterns and concentrations in a fossil bone: implications for the use of REE in vertebrate taphonomy and fossilization history. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74(10), 2970-2988.
- Taylor, S. R. y McLennan, S. (2009). Planetary crusts: their composition, origin and evolution. Cambridge University Press.
- Torres-Rodríguez, E., Lozano-García, S., Figueroa-Rangel, B. L., Ortega-Guerrero, B., & Vázquez-Castro, G. (2012). Cambio ambiental y respuestas de la vegetación de los últimos 17,000 años en el centro de México: el registro del lago de Zirahuén. Revista mexicana de ciencias geológicas, 29(3), 764-778.
- Trueman, C. N. (1999). Rare earth element geochemistry and taphonomy of terrestrial vertebrate assemblages. Palaios, 14(6), 555-568.
- Trueman C. N. and Benton M. J. (1997) A geochemical method to trace the taphonomic history of reworked bones in sedimentary settings. Geology 25, 263–266.
- Trueman, C.N., and Tuross, N., 2002, Trace elements in recent and fossil bone apatite, in Kohn, M.J., et al., eds., Phosphates—Geochemical, geobiological and materials importance: Mineralogical Society of America Reviews of Mineralogy and Geochemistry, v. 48, p. 489–522.

- Trueman, C. N., Benton, M. J., & Palmer, M. R. (2003). Geochemical taphonomy of shallow marine vertebrate assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 197(3-4), 151-169.
- Trueman, C.N.G., Behrensmeyer, A.K., Tuross, N., and Weiner, S., 2004, Mineralogical and compositional changes in bones exposed on soil surfaces in Amboseli National Park, Kenya: Diagenetic mechanisms and the role of sediment pore fluids: *Journal of Archaeological Science*, v. 31, p. 721–739, doi: 10.1016/j.jas.2003.11.003.
- Trueman, C. N., Field, J. H., Dortch, J., Charles, B., & Wroe, S. (2005). Prolonged coexistence of humans and megafauna in Pleistocene Australia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(23), 8381-8385.
- Trueman C. N., Behrensmeyer A. K., Potts R. and Tuross N. (2006) High-resolution records of location and stratigraphic provenance from the rare earth element composition of fossil bones. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 4343–4355.
- Tütken, T., Vennemann, T. W., & Pfretzschner, H. U. (2011). Nd and Sr isotope compositions in modern and fossil bones—Proxies for vertebrate provenance and taphonomy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(20), 5951-5970.
- Vega De La Salazar, M. Y. (2003). Situación de los peces dulceacuícolas en México. *Ciencias*, (072).
- Watts, A.W., Bradbury, J.P., 1982, Paleoecological studies at Lake Patzcuaro on the west-central Mexican Plateau and at Chalco in the basin of Mexico: *Quaternary Research*, 17, 56-70.

## 6. Discusiones generales

Se comprueba la hipótesis de la presencia de un antiguo paleolago en la localidad de Santa Fe del Río, principalmente por el tipo de sedimentos presentes en el estrato y los distintos taxones de agua dulce que se identificaron en ambos estratos, además la firma de ETR que es indicativa de condiciones oxidantes que no se encuentran presentes en ambientes marinos o de agua salobre. La cercanía del río Lerma sugiere que hubo una conexión con el ingreso de agua al paleolago que terminó por extinguirse junto con las especies que vivían en él o cerca de él. Es posible que los eventos volcánicos locales estén ligados a la desaparición del paleolago y de la fauna local. La presencia de concreciones en el estrato superior sugiere que habían periodos en los que la columna de agua se reducía considerablemente, esto significa que los fósiles de este estrato estarían más expuestos a agentes externos (químicos, físicos y biológicos) que los pudieron dañar debido a sequías, lo que coincide con la condición de los fósiles de acuerdo con la escala de intemperismo del estrato 17. El estrato 14 también posee concreciones pero no tantas como las que se encuentran en el estrato superior, lo que es indicativo de posibles sequías pero no tan frecuentes, esto también se ve reflejado en la escala de intemperismo de los fósiles de este estrato, los cuales indican que fueron sedimentados rápidamente y que no estuvieron expuestos por tanto tiempo a agentes externos.

La escala de fragmentación en el estrato superior sugiere que los fósiles sufrieron un grado de arrastre intenso por corrientes de agua en la mayoría de ellos antes de llegar al sitio final de depósito, las firmas heterogéneas de ETR del estrato superior sugieren la proveniencia de al menos dos sitios distintos de los que ingresaron fósiles al paleolago transportados por corrientes de agua. Esta puede ser la razón por la que se encuentran menos cantidad de fósiles identificables en el estrato superior, dado que fueron transportados por corrientes y se destruyeron antes de llegar a depositarse. En el caso del estrato inferior la escala de fragmentación es mucho menor en los fósiles en comparación con el estrato superior, lo que indica que no estuvieron expuestos mucho tiempo a corrientes de agua y que se

depositaron pronto después de su muerte, esto también ha sido posible corroborarlo gracias a la homogeneidad de las firmas de ETR de los fósiles de este estrato, su completitud y su abundancia. Dada la escala de intemperismo y fragmentación del estrato superior se descarta la hipótesis de que fueron enterrados rápidamente después de su muerte, pero en el caso del estrato inferior se corrobora que fueron enterrados con rapidez después de morir.

Por los fósiles encontrados para la localidad se infiere que el sitio estaba habitado por diversos animales terrestres pertenecientes a zonas abiertas como *Equus* sp., *Nannippus peninsulatus*, *Hypolagus vetus* y *Sigmodon minor* que murieron en zonas cercanas al paleolago o dentro del paleolago, esto es especialmente cierto para los fósiles del estrato inferior, los fósiles de la localidad que más sufrieron de intemperismo y erosión son de los mamíferos terrestres aunque su desgaste es considerablemente menor que los del estrato superior. Las especies de los animales acuáticos como los peces, anfibios, reptiles y aves muy probablemente morían dentro del lago y no sufrían tanto de intemperismo y fragmentación como los mamíferos por que se depositaban más rápido y directamente en el sitio de depósito, esto es posible de corroborar por el buen estado de preservación que poseen la mayoría. La presencia del escolopácido y el anseriforme previamente descrito en Lystad-Gray (2017) sugieren una corriente de agua con intensidad baja o media por que son el tipo de hábitat que prefieren, lo cual también se puede corroborar por el tipo de grano descrito en la columna estratigráfica.

La diferencia en firmas del estrato superior sugiere que los fósiles no son autóctonos, mientras que la similitud entre las firmas del estrato inferior indica que no hay un grado de mezcolanza y por lo tanto son autóctonos. Por lo que la hipótesis de que los procesos sedimentarios y la historia geológica del sitio de estudio, permitieran que los fósiles presentes en la columna estratigráfica sean autóctonos es cierta para el estrato 14, pero no para el estrato 17.

Los sedimentos de las cenizas volcánicas de Santa Fe del Río tienen firmas similares con las que fueron comparadas provenientes de estudios realizados de



zonas aledañas de CVTM, aunque varían levemente en la concentración de ciertos elementos, en el caso de las firmas de los Altos de Jalisco varían ligeramente en la concentración de ETRL y ETRP con una anomalía negativa de Ce que no concuerda con las firmas de la localidad, las firmas de Querétaro y Guanajuato varían también de manera semejante, por lo que parece ser que las firmas de ETR de la localidad de Santa Fe del Río concuerdan más con las firmas del estado de Michoacán, estos volcanes forman parte del CVMG y su formación comienza desde el Plioceno, lo que concuerda con la NALMA a la que pertenecen los fósiles índice del estrato 14. Este hecho apoya la hipótesis de que los sedimentos de origen volcánico proceden de eventos volcánicos locales.

## **7. Conclusiones generales**

1. Se registra la presencia de un paleolago con distintos estadios de estabilidad, sequía, diluvio y eventos volcánicos, con dos estratos fósiles identificados el estrato 14 (Blancano) y 17 (más reciente). Los grados de energía son bajos en ambos sedimentos fósiles de acuerdo con el estudio sedimentológico, lo que indica que la corriente de agua era tranquila.
2. La escala de intemperismo y fragmentación en los fósiles del estrato superior indica que estuvieron expuestos a condiciones de agentes externos y a corrientes de agua por un tiempo antes de ser depositados y enterrados. Por el contrario los fósiles del estrato inferior tienen porcentajes bajos de intemperismo y fragmentación lo que indica que se depositaron rápidamente después de su muerte.
3. Se amplía el registro fósil de la localidad, para el estrato superior se registra por primera vez la presencia de la familia Cyprinidae, una serpiente y un roedor sigmodontino. Para el estrato inferior se registra por primera vez la presencia de *Sigmodon minor* e *Hypolagus vetus*, dos géneros de serpientes (*Thamnophis* y *Lampropeltis*) y dos familias de peces (Aterinidae e Ictaluridae).

4. Los estratos volcánicos corresponden con la formación del CVMG en la temporalidad, su posición geográfica y la similitud en las firmas de ETR con las que se compararon. Los resultados de ETR en los fósiles del estrato inferior, indican que no fueron retrabajados (fossilizaron en el mismo sitio), en cambio los del estrato superior indican que sí (fossilizaron en sitios distintos), la presencia de distintos taxones dulceacuícolas apoyan la evidencia de un lago de agua tranquila y los taxones terrestres una heterogeneidad de ambientes, aunque predominantemente zonas abiertas. Por la anomalía negativa de Ce en los estratos fósiles se reconoce que el paleolago presentaba condiciones de tipo oxidantes.

## 8. Literatura general

- Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H., y Takaoka, N. 1992. K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico. *Geofísica Internacional*, 31(4), 467-473.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84-92.
- Guilbaud, M. N., Siebe, C., Layer, P., y Salinas, S. 2012. Reconstruction of the volcanic history of the Tacámbaro-Puruarán area (Michoacán, México) reveals high frequency of Holocene monogenetic eruptions. *Bulletin of volcanology*, 74(5), 1187-1211.
- Hasenaka, T., y E Carmichael, I. S. 1985. A compilation of location, size, and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, central Mexico. *Geofísica Internacional*, 24(4).
- Hasenaka, T., y Carmichael, I. S. 1987. The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central Mexico: petrology and chemistry. *Journal of Petrology*, 28(2), 241-269.
- Hasenaka, T., Ban, M., y Granados, H. D. 2012. Contrasting volcanism in the Michoacan-Guanajuato Volcanic field, central Mexico: shield volcanoes vs cinder cones. *Geofísica Internacional*, 33(1).
- Instituto Nacional de para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED). Secretaría de Gobernación (SEGOB). 2010. Enciclopedia de Los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Michoacán de Ocampo.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Penjamillo, Michoacán de Ocampo.
- Lystad Gray R. D. 2018. Vertebrados del Blanco de Santa Fe del Rio, Municipio de Penjamillo, Michoacán, México. Trabajo de Tesis de Licenciatura. Univerisdad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Osorio-Ocampo, S., Macías, J.L., Pola, A., Cardona-Melchor, S., Sosa-Ceballos. G., Garduño-Monroy, V.H., Layer W. P., García-Sánchez, L., Pertou, M., Benowitz, J., 2018. The eruptive history of the Pátzcuaro Lake area in the Michoacán Guanajuato Volcanic Field, central México: Field mapping, C-14 and 40Ar/39Ar geochronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.06.003>.

- Pasquarè, G., Ferrari, L., Covelli, P., y De Agostini, G. 1991. Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico. Geological Society of America.
- Pola, A., Macías, J. L., Osorio-Ocampo, S., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., y Martínez-Martínez, J. 2015. El Estribo Volcanic Complex: evolution from a shield volcano to a cinder cone, Pátzcuaro Lake, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 303, 130-145.
- Reyes-Guzmán, N., Siebe, C., Chevrel, M. O., Guilbaud, M. N., Salinas, S., y Layer, P. 2018. Geology and radiometric dating of Quaternary monogenetic volcanism in the western Zacapu lacustrine basin (Michoacán, México): implications for archeology and future hazard evaluations. *Bulletin of Volcanology*, 80(2), 18.
- Rollinson, H., 1994. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Longman, New York.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504.
- Siebe, C., Guilbaud, M. N., Salinas, S., Kshirsagar, P., Chevrel, M. O., De la Fuente, J. R., y Godínez, L. 2014. Monogenetic volcanism of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field: Maar craters of the Zacapu basin and domes, shields, and scoria cones of the Tarascan highlands (Paracho-Paricutin region). In *Field Guide for the Pre-meeting Fieldtrip (13–17 November 2014) of the 5th International Maar Conference (5IMC-IAVCEI)*.
- Trueman C. N., Behrensmeyer A. K., Potts R. and Tuross N. (2006) High-resolution records of location and stratigraphic provenance from the rare earth element composition of fossil bones. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 4343–4355.
- Tütken, T., Vennemann, T. W., & Pfretzschner, H. U. (2011). Nd and Sr isotope compositions in modern and fossil bones—Proxies for vertebrate provenance and taphonomy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(20), 5951-5970.
- Van Wagoner, J. C., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M. J., Vail, P. R., Sarg, J. F., Loutit, T. S., y Hardenbol, J. 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions.

## Anexo

En la siguiente tabla se presentan los fósiles identificados de los estratos superior e inferior, forman parte de la colección paleontológica de Santa Fe del Río en el Laboratorio de Paleontología, en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

### Taxa de Santa Fe del Río

	Estrato Inferior	Estrato Superior
<b>Osteichthyes</b>		
Pez indet.	2	
<b>Orden Aterinidae</b>	9	
Aterinidae indet.		
<b>Orden Cypriniformes</b>		
Cyprinidae indet.	2	3
<b>Orden Ictaluridae</b>		
Ictaluridae indet.	2	
<b>Orden Anura</b>		
<i>Lithobates</i> sp.	2	
<b>Orden Cryptodira</b>		
<i>Kinosternon</i> sp.	4	
<b>Orden Squamata</b>		
Serpiente indet.	3	1
<i>Lampropeltis</i> sp.	1	
<i>Thamnophis</i> sp.	1	
<b>Clase Aves</b>		
Ave indet.	3	
<b>Orden Anseriformes</b>		
Anseriformes indet.	1	
<b>Orden Charadriiformes</b>		
Scolopacidae indet.	1	
<b>Clase Mammalia</b>		

Mamífero indet.	3	5
<b>Orden Rodentia</b>		
<i>Sigmodon minor</i>	1	
<i>Sigmodon</i> sp.?		1
<b>Orden Lagomorpha</b>		
<i>Leporidae</i> indet.	5	1
<i>Hypolagus vetus</i>	3	
<b>Orden Proboscidea</b>		
<i>Proboscidea</i> indet.		1
<i>Mammut americanum</i>	1	
<b>Orden Perissodactyla</b>		
<i>Nannippus peninsulatus</i>	1	
<i>Equus</i> cf. <i>simplicidens</i>	2	
<b>Total de fósiles</b>	<b>47</b>	<b>12</b>

**Figura 1.** Lista de fósiles incluyendo los previamente identificados de Santa Fe del Río.