



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOLOGÍA
Ciencias Ambientales

**“CONDICIONES AMBIENTALES EN OASISAMÉRICA Y SU RELACIÓN
CON LA EVOLUCIÓN DE LAS SOCIEDADES AGRÍCOLAS EN EL
HOLOCENO“**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

PRESENTA:

GEORGINA IBARRA ARZAVE

JURADO EXAMINADOR

Dr. Alexander Correa Metrio, Instituto de Geología, UNAM

Dr. Miguel Castillo Rodríguez, ERNO, Instituto de Geología, UNAM

Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo, Instituto de Geología, UNAM

Dr. César Villalobos Acosta, Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM

Dra. Carmen Ortega Rosas, UES

CIUDAD DE MÉXICO, Agosto 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

*A Yoyis, gracias infinitas mi querido y adorado compañero
de vida.*

A mi familia, a pesar de las diferencias, siempre juntos.

*A mis estrellas favoritas: Caro, Emma (Chavis) y Aurora
(Chantorrís), siempre acompañándome.*

AGRADECIMIENTOS

Expreso no sólo mi agradecimiento a las instituciones que permitieron hacer de este anhelo una realidad, sino que también agradezco a las personas quienes confiaron, apoyaron y me mostraron una nueva forma de observar y cuestionar.

Agradezco de manera sincera a CONACYT, así como el Instituto de Geología de la UNAM por haberme brindado una beca para la realización de estos estudios de posgrado.

Al proyecto CONACYT 236623 por el financiamiento otorgado.

Al Instituto de Geología por las facilidades y el apoyo económico para la realización de este documento.

A la Coordinación de Estudios de Posgrado por todo el apoyo recibido.

A la Coordinación de Posgrado en Ciencias de la Tierra por todo su apoyo y dedicación.

Agradezco a mi tutora, la Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo por el apoyo, paciencia y dirección. Por su compromiso y dedicación en cada una de las etapas de esta investigación. Por el tiempo dedicado, dentro y fuera del Instituto, gracias.

Al jurado examinador: Dr. Alexander Correa Metrio, Dr. Miguel Castillo Rodríguez, Dr. César Villalobos Acosta, y Dra. Carmen Ortega Rosas, por sus consejos y sugerencias para la culminación de esta tesis.

A los proyectos: *Proyecto Arqueológico La Playa, Sonora*. INAH; *Adaptaciones humanas y cambios climáticos en el Desierto de Sonora*. INAH-UNAM, gracias por el apoyo y hacer permisible la entrada a los sitios; además de las facilidades proporcionadas en el muestreo de las secuencias de suelos y sedimentos estudiados.

A las Arqlogas. Elisa Villalpando Canchola y Guadalupe Sánchez Miranda por el apoyo y cooperación en cada una de las visitas realizadas a los sitios arqueológicos de El Fin del Mundo, El Gramal y La Playa, Sonora.

A los coautores de las publicaciones derivadas de la investigación: Dra. Elizabeth Solleiro Rebolledo; Dr. Sergey Sedov; Dr. Bruno Chávez Vergara; Dr. Héctor Cabadas; Dr. Rafael López Martínez; Dra. Teresa Pi Puig; Dra. Guadalupe Sánchez Miranda; Dra. Carmen Ortega Rosas; Dr. Thierry Calmus; Mtro. Emmanuel Ayala Rangel; Mtro. Hermenegildo Barceinas Cruz; Mtra. Eliuth Romero y Lic. Thanairi Gamez, por su valiosa colaboración en la investigación y escritura de las mismas.

Al Dr. Sergey Sedov por ser parte importante de mi formación y por contribuir y enriquecer con su conocimiento en este trabajo de tesis.

Al Dr. Bruno Chávez Vergara por su colaboración e interés en el estudio de los suelos de Sonora.

A la Mtra. Ofelia Beltrán Paz por su apoyo técnico en la preparación de muestras.

Al Dr. Arturo Mendoza Flores y al laboratorio de Biogeoquímica y materia orgánica del suelo del Instituto de Geología-LANGEM por su apoyo técnico.

Al M. en C. Jaime Díaz Ortega por su invaluable ayuda en la fase de muestreo y análisis de suelos; además de la realización e interpretación de láminas delgadas.

Al Mtro. Hermenegildo Barceinas Cruz por la orientación y asistencia en los análisis de susceptibilidad magnética.

A María Luisa Reyes Ochoa y Gloria Benitez Alba por el apoyo y seguimiento en los trámites para esta tesis.

A Maricela Coronado, por las sonrisas y la buena vibra de cada mañana. Gracias Mari!!!

A toda la banda: Yaz, gracias por tu amistad, te adoro mi querida "Luli"; Jaime, gracias por las reflexiones de vida, siempre un gusto compartir campo; Gil, compañero y amigo, te quiero mucho; Bruno, gracias por las risas y lo enseñado; Ofe, un ejemplo de disciplina en laboratorio, yeahh; Oney, un gusto coincidir nuevamente; Sera, profe y compañero; Pam y Tania, mis queridas niñas del Museo, hoy mis compañeras y amigas, las quiero muchísimo, gracias por seguir compartiendo; Daisy, gracias por los buenos momentos; Lilit, cada vez más chilanga jajajaja; Bere, amiga de mi corazón, aún a la distancia sigues brindándome tu tiempo, apoyo y conocimiento. Gracias por el aprendizaje, y asesorías de vida. Liz, mil gracias por la confianza y la oportunidad de ser parte de este fabuloso grupo de Paleosuelos, por brindarme nuevas herramientas de vida, pero sobre todo gracias por tu amistad. Mi querido Doc, tanto que aprenderle, es un gran ser humano, lo quiero mucho. Compañeros y amigos, a todos y cada uno de ustedes, GRACIAS infinitas por hacer de esta etapa un camino más llevadero y un excelente viaje de vida!!!!

A todo el grupo Paleosuelos y Oxisoles, gracias infinitas, por apoyarnos en uno de los momentos más difíciles de nuestra vida, simplemente Gracias.

A Yoyis, mi gran compañero de vida, gracias por el apoyo incondicional, por ESTAR en momentos de estrés emocional y de locura jajajaja. Por ser mi gran respaldo. No dejo

de admirarte y agradecer a la vida al gran ser humano que tengo a mi lado. Sigamos enriqueciendo nuestros corazones y gozándonos como hasta ahora. Te amo corazón. A mis padres, dos grandes pilares y ejemplos de vida, gracias por darme las herramientas para saber dirigirme en este mundo, por enseñarme a vivir y gozar; porque lo importante es el aquí y ahora, yeahhh. A mis hermanas, por ser mis cómplices, sigamos creando historias de vida juntas. A mi Tía Auro, gracias por el apoyo, por las tardes bohemias de crítica académica, jejeje. Gracias familia¡¡¡¡

Y finalmente a Ponchito y Chuchu, gracias, porque hace años me brindaron el apoyo para resarcir los errores de vida. Gracias por compartir conmigo cada logro obtenido. Ponchito, de aquí y hasta donde te encuentres... Gracias.

A ti UNAM por esta maravillosa experiencia, y por permitirme lograr un sueño más¡¡

1, 2, 3...

México, Pumas, Universidad, Goya, Goya, Cachún Cachún ra ra, Goya,

UNIVERSIDAD¡¡¡¡¡¡¡

ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
Planteamiento del problema	15
Justificación	16
Hipótesis	18
Objetivo general	18
Objetivos particulares	
Capítulo 1- MARCO TEÓRICO	20
1.1. Cambios ambientales en el Cuaternario	
1.1.1. Tendencias climáticas globales Pleistoceno-Holoceno	22
1.1.2. Último Máximo Glacial	23
1.1.3. UMG e México	24
1.1.4. El Younger Dryas	25
1.1.5. Eventos Heinrich y eventos Dansgaard	26
1.2. El Holoceno	27
1.2.1. Condiciones ambientales en el noroeste de México y suroeste de EUA durante el Holoceno	30
1.2.2. El altitermal en el Desierto de Sonora	32
1.3. La Revolución Neolítica	35
1.3.1. La teoría del Oasis y Oasisamérica	37
1.4. Holoceno tardío. Agricultura temprana. La Playa, Sonora	38
Capítulo 2 - ÁREA DE ESTUDIO	40
2.1. La Playa	40
2.1.1. Cronoestratigrafía de La Playa	45
2.1.2. Morfología del abanico aluvial	49
2.2. El Gramal	51
Capítulo 3. MATERIALES Y MÉTODOS	55
3.1. Trabajo en campo	55
3.1.1. Reconocimiento preliminar del área de estudio	55
3.1.2. Descripción general de las áreas de estudio	55
3.1.2.1. La Playa	56
3.1.2.2. El Gramal	58
3.1.3. Características pedomorfológicas y clasificación	59

3.1.4. Muestreo de los paleosuelos y preparación de las muestras para su análisis	60
3.2. Propiedades micromorfológicas	60
3.3. Análisis de laboratorio	61
3.3.1. Análisis físicos:	61
3.3.1.1. Color	61
3.3.1.2. Cuantificación de las fracciones granulométricas	62
3.3.1.3. Parámetros magnéticos	63
3.4. Otro registros (Espectroscopia inflaroja con transformada de Fourier/reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR); y contenido de Polen)	64
3.4.1. Espectroscopia inflaroja con transformada de Fourier/reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR)	64
3.4.2. Contenido de Polen	65
3.5. Fechamientos por radiocarbono	66
Capítulo 4. RESULTADOS	67
4.1. Perfil Maravillas	67
4.1.1. Descripción morfológica en campo	68
4.1.2. Propiedades micromorfológicas	70
4.1.3. Análisis físicos:	72
4.1.3.1. Determinación del color del suelo	72
4.1.3.2. Fracciones granulométricas	72
4.1.3.3. Parámetros magnéticos	73
4.1.4. Otros registros	74
4.1.4.1. Espectroscopia inflaroja con transformada de Fourier/ reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR)	74
4.1.4.2. Identificación de sedimentos	75
4.2. Perfil Zanja	77
4.2.1. Descripción morfológica en campo	78
4.2.2. Propiedades micromorfológicas	79
4.2.3. Análisis físicos:	81
4.2.3.1. Determinación del color del suelo	81
4.2.3.2. Fracciones granulométricas	81
4.2.3.3. Parámetros magnéticos	81
4.2.4. Otros registros	82
4.2.4.1. Espectroscopia inflaroja con transformada de Fourier/ reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR)	82
4.3. Perfil Cuatro Suelos	84
4.3.1. Descripción morfológica en campo	85

4.3.2. Propiedades micromorfológicas	87
4.3.3. Análisis físicos:	90
4.3.3.1. Determinación del color del suelo	90
4.3.3.2. Fracciones granulométricas	90
4.3.3.3. Parámetros magnéticos	90
4.3.4. Otros registros	91
4.3.4.1. Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier/ reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR)	91
4.3.4.2. Contenido de Polen	93
4.4. Perfil Gramal	97
4.4.1. Descripción morfológica en campo	97
4.4.2. Propiedades micromorfológicas	98
4.4.3. Análisis físicos:	100
4.4.3.1. Determinación del color del suelo	100
4.4.3.2. Fracciones granulométricas	100
4.4.3.3. Parámetros magnéticos	100
4.5. Fechamientos por radiocarbono	101
Capítulo 5 – DISCUSIÓN	103
5.1. La Playa: sedimentación y pedogénesis, evidencia de condiciones paleoambientales.	103
5.2. La evolución del paisaje en el abanico aluvial de La Playa.	105
5.3. Las condiciones ambientales durante el Holoceno medio.	107
5.4. Las sociedades agrícolas de La Playa y su entorno ambiental.	109
5.5. Los grupos humanos en el Holoceno tardío.	111
5.6. Correlación entre La Playa y El Gramal.	113
Capítulo 6 - CONSIDERACIONES FINALES	117
REFERENCIAS	118
ANEXO 1	
ANEXO 2	

LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Estratigrafía, dataciones y propiedades pedogenéticas del perfil San Rafael (SRP)	34
2	Localización de los sitios de estudio en el noroeste de México	40
3	Sitio arqueológico de La Playa	41
4	Tipo de vegetación de La Playa	42
5	Cárcavas formadas por la intensa erosión fluvial y eólica en el abanico	43
6	Elementos culturales registrados en La Playa	44
7	Correlación estratigráfica de los perfiles Canal 2 y Hornos 1 y 2; y el esquema sedimentario de Copeland et al., 2012	48
8	Morfología del abanico aluvial	51
9	Visión general del sitio El Gramal	52
10	Estratigrafía generalizada propuesta para El Gramal	53
11	Perfil Maravillas	56
12	Localización del perfil Zanja	57
13	Vista panorámica del perfil Cuatro Suelos	57
14	Perfil El Gramal	58
15	Perfil Maravillas	68
16	Micromorfología del perfil Maravillas	71
17	Resultados del perfil Maravillas	73
18	Espectro FT-IR/ATR del perfil Maravillas	75
19	Perfil Zanja	78
20	Micromorfología del perfil Zanja	80
21	Resultados del perfil Zanja	82
22	Espectro FT-IR/ATR del perfil Zanja	83
23	Perfil Cuatro Suelos	85

24	Micromorfología del perfil Cuatro Suelos	89
25	Resultados perfil Cuatro Suelos	91
26	Espectro FT-IR/ATR del perfil Cuatro Suelos	92
27	Diagrama de polen del perfil Cuatro Suelos	96
28	Perfil Gramal	97
29	Micromorfología del perfil Gramal	99
30	Resultados perfil Gramal	101
31	Correlación estratigráfica de los perfiles trabajados: Gramal, Zanja, Maravillas y Cuatro Suelos	116

LISTA DE TABLAS

Figura	Título	Página
1	Modelos clásicos glaciales-interglaciales para Europa y Norteamérica	22
2	Identificación de las unidades BOP, intervalo sedimentario (SI) y SRP dentro de los diferentes sitios trabajados	59
3	Zonas designadas a partir de los resultados de polen fósil en el perfil Cuatro Suelos	94
4	Edades obtenidas por radiocarbono	102

RESUMEN**Condiciones ambientales en Oasisamérica y su relación con la evolución de las sociedades agrícolas en el Holoceno**

Las condiciones ambientales y la interacción hombre-paisaje durante el Periodo de Agricultura Temprana en Oasisamérica aún no son claras. En el sitio arqueológico La Playa, localizado al noroeste de México, se registran más de 550 elementos arqueológicos tales como entierros, artefactos, hornos y una red de canales artificiales de irrigación, lo que evidencia la existencia de una población sedentaria con cultivo de tierras y manejo del agua para después del período del Altitermal (alrededor de 4,500 años AP). Los elementos anteriormente mencionados coinciden con la presencia de una serie de paleosuelos, los cuales, a su vez, se alternaron con material sedimentario dentro de un gran abanico aluvial. Así, a través del estudio de las características micromorfológicas, físicas (color, textura, y propiedades magnéticas), fechamientos por radiocarbono de cuatro perfiles (Maravillas, Zanja, Cuatro Suelos y Gramal), es que se logró hacer una reconstrucción de la pedogénesis y del desarrollo sedimentario. Existe información paleoambiental adicional extraída de las asociaciones de polen provenientes del perfil Cuatro Suelos y de la composición de la materia orgánica de los perfiles Maravillas, Zanja y Cuatro Suelos. Los resultados apuntaron a un largo período de estabilidad geomorfológica y climática durante el Holoceno temprano-medio evidenciado por la presencia de un Cambisol rojo bien desarrollado. Este período fue seguido por un intervalo inestable alrededor de los 4,500 años AP marcado por una severa erosión y una importante sedimentación de diversas clases: canal, planicie de inundación, y fluvio- eólico. Finalmente, se tiene el desarrollo de un fluvisol con una pedogénesis predominantemente árida, interrumpida por inundaciones ocasionales; a lo largo de este desarrollo se registraron elementos antrópicos. Se concluye, que el cambio a la agricultura por irrigación, entendiéndola como la actividad principal de subsistencia, ocurrió durante el Holoceno tardío, bajo condiciones secas con recursos hídricos limitados.

ABSTRACT**Environmental conditions in Oasisamerica and its relation with the evolution of agricultural societies in the Holocene**

Environmental conditions and human-landscape interaction during the onset of the irrigated agricultura in Oasisamerica are not clear yet. In the archaeological site La Playa, located in northwestern Mexico, there are more than 550 archaeological features such as burials, artifacts, furnaces and a network of artificial irrigation channels, which evidences of sedentary population, land cultivation and water management developed after the end of Altithermal period (around 4,500 years BP). These findings were related with several palaeosols levels alternating with sediments within a large alluvial fan. We studied micromorphological features, physical characteristics (color, texture, and rock magnetic properties), and dating from four profiles (Maravillas, Zanja, Cuatro Suelos y Gramal), to reconstruct pedogenesis and sedimentary environment of the palaeosol sequences. Additional paleoenvironmental information was extracted from pollen assemblages, extracted from Cuatro Suelos profile, and the organic matter from Maravillas, Zanja and Cuatro Suelos. The results pointed to a long period of geomorphic and climatic stability in the early-middle Holocene marked by a well-developed red Cambisol. This period was followed by an unstable interval around the 4, 500 years BP marked by severe erosion of earlier soil profiles and sedimentation of different kind: channel, floodplain, and fluvio-eolian. Later synsedimentary Fluvisols were formed showing signs of predominantly arid pedogenesis, interrupted by occasional flooding: indicators of human impact. We conclude that the shift to irrigated agriculture as the main subsistence activity occurred during the late Holocene, under dry conditions with limited water resources.

INTRODUCCIÓN

Recientes investigaciones acerca del cambio ambiental han promovido un particular interés en los estudios de reconstrucción paleoambiental. En efecto, estas investigaciones, pretenden obtener un registro de la evolución del clima en la Tierra. Derivado de ello, la presente investigación surge de la necesidad de documentar la diversidad en el ambiente que se desarrolló en el noroeste de Sonora durante el Holoceno.

Para tratar de comprender el desarrollo ambiental en el noroeste de Sonora durante esta importante época es preciso señalar que para el Pleistoceno tardío existen modelos paleoclimáticos globales, en donde se establece la predominancia de climas secos (Último Máximo Glacial) en gran parte del planeta, dada la poca humedad atmosférica asociada a las bajas temperaturas planetarias (Bronger et al., 1998; Dodonov et al., 2006). No obstante, hay evidencias que muestran que en el mismo periodo, para el suroeste de EU (Arizona y Nuevo México) y noroeste de México (Sonora, Chihuahua, Baja California) se desarrollaron climas templados y húmedos (Van Devender, 1973; McAuliffe et al., 1998; Rhode, 2001; Lozano et al., 2002; Metcalfe et al., 2002; Holmgren et al., 2003; Nordt, 2003).

Debido a lo anterior, el estudio de las tendencias particulares de la evolución del clima en el norte de Sonora tienen un especial interés, puesto que en los suelos se han identificado rasgos claros de cambios en las condiciones ambientales (Cruz et al., 2014).

En Arizona y regiones aledañas a Sonora se han llevado a cabo reconstrucciones ambientales basadas principalmente en los restos botánicos recuperados de nidos de neotomas, columnas polínicas de lagos y depósitos aluviales y restos de carbón e isótopos de oxígeno en los huesos de los mamíferos del Pleistoceno de Sonora (Mehringer y Haynes 1965; Van Devender y Spaulding 1979; Van Devender et al., 1987; Betancourt 1990; Van Devender et al., 1990; Davis y Shafer 1992; Van Devender et al., 1994; Holmgren et al., 2007; Nuñez et al., 2010; Ballenger et al., 2011). Éstos constituyen el mejor registro que se tiene hasta ahora para estudiar el clima y la

sucesión vegetal en la región del Desierto de Sonora; sin embargo, dichas reconstrucciones revelan un registro preliminar general con pocos detalles de la vegetación y el clima de los últimos 16,000 años.

De otra parte, durante el Pleistoceno terminal y el Holoceno se han registrado por lo menos dos intervalos caracterizados por cambios climáticos importantes de dimensiones globales. El Younger Dryas, entre el año 12,900 – 11,500 años cal AP, y el Altitermal (7500 a 4500 cal AP), que se refiere a un período de estrés climático (Antevs, 1948; 1955).

Al finalizar el Altitermal (7500 y 4500 años AP), existen registros del Periodo de Agricultura Temprana (EAP) en el suroeste de los E.U. y el noroeste de México, en donde hay evidencia de que las sociedades agrícolas del EAP cultivaron maíz y construyeron canales para el riego (Mabry et al., 2002; Diehl, 2009).

Para esta investigación se analizaron una serie de paleosuelos y estratos sedimentarios localizados en el noroeste de Sonora con el objetivo de conocer las condiciones paleoambientales que prevalecieron antes, durante y después del Altitermal, y particularmente durante el Periodo de Agricultura Temprana. La información obtenida se complementó con el análisis de proxies independientes del registro paleopedológico como fue la Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier y el estudio de Polen.

Para explicar y desarrollar lo anterior, la presente investigación se compone de seis capítulos, los cuales, presentan las siguientes características.

- En el *Capítulo 1* se desarrolla el marco teórico desde el punto de vista conceptual, a partir del cual se interpretan los resultados.
- En el segundo capítulo, se estudia y examina la información referente al área de estudio de los sitios trabajados: La Playa y El Gramal.
- En el *Capítulo 3* se plantea la metodología en donde se describe el trabajo en campo, el reconocimiento y selección de las unidades edáficas para su estudio, la caracterización morfológica y clasificación de paleosuelos. Asimismo, dentro del

rubro análisis se describe el conjunto de estudios hechos para identificar las propiedades y sus cambios.

- Los resultados, inmersos dentro del *Capítulo 4*, se desglosan en virtud de cada una de las secciones paleopedológicas consideradas para esta investigación. En este sentido, las secciones toman en cuenta los siguientes aspectos: a) descripción morfológica (macro y micro), b) propiedades físicas (color, fracciones granulométricas y parámetros magnéticos); c) Determinados proxies estudiados para secciones particulares y d) fechamientos por radiocarbono.
- En el *Capítulo 5* se discuten e integran los resultados presentados a lo largo de esta investigación.
- Por último, las consideraciones finales se presentan en el *Capítulo 6*.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El territorio que abarca el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos comprende regiones que comparten condiciones geomorfológicas y climáticas similares, por lo que puede llegar a considerársele como un mismo territorio. A pesar del gran campo de estudio que representa dicha región, aún son pocas las investigaciones relacionadas a la evolución climática del Pleistoceno-Holoceno para el noroeste de México, específicamente para el noroeste de Sonora. Una de las principales causas vinculada a la carencia de información, son las condiciones semidesérticas que actualmente caracterizan a la región, ya que la dinámica geomorfológica actual se determina por el predominio de los procesos erosivos; provocando así, condiciones poco favorables para la preservación de los registros paleoambientales, como los sedimentos lacustres.

Debido a que la mayoría de los estudios paleoambientales se han enfocado principalmente en el centro y sureste del país, aún no se cuenta con un modelo paleoambiental que cubra el noroeste del territorio mexicano. A pesar de lo anterior, se sabe que los indicadores paleoambientales existentes en la región muestran que la evolución climática del Pleistoceno hacia el Holoceno está marcada por un periodo de

mayor humedad durante el Pleistoceno tardío, con una clara tendencia hacia la aridización durante el Holoceno y hasta la actualidad. Este incremento en la precipitación durante el UMG en la región se contrapone a la tendencia global a la aridización durante los periodos glaciares indicada por los registros en los paleosuelos de China y Tadjikistan (Bronger y Catt, 1989; Dodonov et al., 2006) lo que muestra que la evolución del sistema climático no ha sido lineal; sino por el contrario, bastante complejo. De aquí que, el estudio de las particularidades de la región nos proporcione un registro más detallado de las condiciones ambientales.

De este modo, la importancia de estudiar estos cambios radica primeramente, en lograr una reconstrucción de las condiciones ambientales de la región; además de un mejor entendimiento acerca del comportamiento paleoclimático, el cual ha influido en la evolución y conformación del territorio actual; finalmente, se pretende correlacionar las condiciones climáticas con las culturas que habitaron la región durante el Holoceno medio. Así entonces, el documentar las variaciones climáticas y relacionarlas con las evidencias arqueológicas, permite conocer el desarrollo cultural y documentar las diferentes transformaciones que realizaron los grupos humanos para adaptarse al ambiente a medida que éste se fue transformando.

JUSTIFICACIÓN

La propuesta de esta investigación surge de la necesidad de documentar la diversidad en los ambientes locales que se desarrollaron en una región del noroeste de Sonora durante el Holoceno medio. Existen estudios respecto a la transición Pleistoceno-Holoceno para el suroeste de EUA, principalmente para Arizona y Nuevo México; para México, existen trabajos en Baja California, Chihuahua y el Mar de Cortés; sin embargo, no hay investigaciones en el estado de Sonora para el momento específico que estudiamos. Esta falta de información ha limitado las investigaciones paleoambientales, por lo que es común generalizar los estudios existentes a todo el norte del país, obviando las diferencias geográficas existentes.

Como ya se mencionó anteriormente, nuestro sitio de estudio, localizado en el noroeste de Sonora presenta particularidades geográficas que difieren de otras regiones. Indicadores paleoambientales muestran que las condiciones ambientales fueron diferentes a las registradas para el suroeste de EU, debido a lo anterior, se tiene la necesidad de realizar una investigación regional de los paleosuelos del Holoceno medio y así obtener con mayor detalle información sobre el ambiente local del área de estudio.

Actualmente, existen estudios paleopedológicos Cruz y Cruz et al. (2014, 2015) los cuales han logrado hacer una primera caracterización de las condiciones ambientales desde el Pleistoceno tardío hasta el Holoceno; sin embargo, aún existen importantes *hiatus* debido a los fuertes procesos de erosión que han destruido parte de la información.

Los paleosuelos han demostrado ser indicadores confiables de los cambios ambientales. Puesto que los suelos evolucionan a partir de la incidencia de los factores formadores: material parental, clima, relieve, organismos y tiempo; tales factores promueven la intensidad y duración de los diversos procesos pedogenéticos que le confieren al suelo características morfológicas específicas. Al evaluar dichas características, es posible realizar inferencias sobre sus ambientes de formación (Targulian y Sokolova, 1996; Foth, 1997; Bronger et al., 1998). Durante su evolución, los suelos almacenan información sobre los factores ambientales, temperatura, precipitación y procesos que han actuado durante un periodo de pedogénesis.

De tal manera, que establecer las características ambientales nos permite contextualizar las evidencias arqueológicas, lo que a su vez, nos proporciona elementos para un mayor entendimiento de los procesos de desarrollo de las sociedades. Esto permite establecer parámetros sobre los mecanismos de relación entre las sociedades y su ambiente; y así, conocer las variaciones que influyeron en los grupos humanos propiciando adaptaciones culturales para las actividades de subsistencia correspondientes al Holoceno medio.

HIPÓTESIS

El estado de Sonora tiene evidencia de una larga historia de ocupación humana representada por varios grupos sociales que habitaron la región desde finales del Pleistoceno y continuaron casi sin interrupción hasta tiempos recientes. Los cambios ambientales ocurridos en el Holoceno, particularmente durante el Altitermal, fueron parte de los factores principales que afectaron las adaptaciones y las formas de vida de los grupos humanos que habitaron el noroeste de Sonora. Durante este periodo de extrema desertificación se sabe que ocurrieron abandonos esporádicos del desierto; aunque, se piensa que las poblaciones volvieron a ocupar la región, lográndose adaptar, permanecer en las zonas desérticas e inclusive desarrollar comunidades sedentarias de agricultores incipientes (Carpenter y Sánchez, 2013).

A partir de lo anterior, la hipótesis de este trabajo radica en que las condiciones ambientales extremas ocurridas durante el Altitermal ocasionaron la movilidad de los grupos humanos que habitaron el desierto en el noroeste de Sonora; sin embargo, al finalizar este periodo, hubo un aumento en las precipitaciones, provocando condiciones climáticas más húmedas, lo que pudo ser un atractor para las sociedades agrícolas.

OBJETIVO GENERAL

Reconstruir las características paleoambientales que condicionaron los procesos de formación de los suelos presentes en diversos sitios del estado de Sonora a través del registro paleopedológico y de indicadores particulares del Periodo de Agricultura temprana (EAP) con el fin de conocer la historia ambiental y regional del Holoceno en el noroeste de México y su relación con la ocupación del sitio.

Objetivos particulares

- Determinar del registro paleopedológico que corresponde al Altitermal y el Periodo de Agricultura temprana (EAP).
- Analizar las propiedades selectas de la memoria edáfica, que permitan reconstruir las condiciones paleoambientales de los periodos referidos.
- Estudiar los efectos específicos del paleoambiente del Holoceno medio y tardío en los grupos humanos que habitaron el actual estado de Sonora.
- Analizar biomarcadores como el polen, macro-restos, materia orgánica, entre otros, en los paleosuelos, donde se registren los cambios climáticos locales o a pequeña escala, así como los indicadores específicos del desarrollo de la agricultura (uso de maíz domesticado).

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Cambios ambientales en el Cuaternario

El clima es un sistema dinámico y complejo que se encuentra regulado por factores naturales tales como latitud, altitud, albedo, orografía, distribución tierra-océano, corrientes oceánicas y corrientes atmosféricas. En el caso específico del Cuaternario, Riser (2002) comenta que el dinamismo y movilidad fueron dos características particularmente interesantes, debido a que la evolución de ríos, cambios en los niveles de mar y lagos, y la expansión de seres vivos fueron eventos esenciales que determinaron la historia del planeta para ese momento.

A escala global, el clima del Cuaternario se vio condicionado por una serie de elementos clave heredados de la evolución tectónica del Cenozoico, tales como:

- La separación de los continentes Antártico y Australiano y la apertura del pasaje de Drake entre América del sur y la Antártida (38 millones de años AP) (Exon, 2002; Sher, 2006).
- La formación de la zona de Indonesia (30 millones de años AP), el cierre del mar de Tethys (14 millones de años AP) y el del Istmo de Panamá (3 millones de años AP) (Duplessy, 1993).
- El levantamiento de las grandes mesetas del Tibet y del sudeste de Norteamérica (a lo largo de los últimos 10 millones de años) (Chung, 1998).

La suma de los procesos ya mencionados originó la formación de casquetes polares en el hemisferio norte, condiciones que no se han modificado a lo largo de 3 millones de años. Sin embargo, las oscilaciones climáticas más dramáticas en la historia de la Tierra se presentaron durante los últimos 130,000 años. Dichas oscilaciones han sido objeto de intensos estudios debido a la evidencia en registros terrestres, marinos y núcleos de hielo. De acuerdo a éstas se ha establecido que el clima global varía en ciclos que van de condiciones cálidas (interglaciales) a frías (glaciales) (Bull, 1991; Imbrie, 1993; Riser, 2002; Labeyrie et al., 2006; Vázquez - Selem, 2007).

En este sentido, respecto a las causas de las fluctuaciones que van de los ciclos cálidos a fríos, el astrónomo yugoslavo Milutin Milankovich propuso un mecanismo astronómico para explicar los ciclos glaciales, desarrollando tres factores o componentes, donde dos de ellos alteran la intensidad de las estaciones y el tercero afecta la interacción entre éstos (Pillans et al., 1998; Riser, 2002; Labeyrie et al., 2006; Vázquez - Selem, 2007).

- 1) La inclinación del eje de rotación terrestre - actualmente desviado unos 23.44° respecto a la vertical, fluctúa desde 21.5° hasta 24.5° en un período de 41,000 años. Al aumentar la inclinación resultan más extremas las estaciones en ambos hemisferios, los veranos se hacen más cálidos y los inviernos más fríos. Cuando la inclinación del eje de la Tierra es máxima, las zonas polares reciben también un máximo de insolación y calor, pues apuntan más directamente hacia el Sol.
- 2) La forma de la órbita terrestre – este factor acentúa las variaciones estacionales, aunque con menor intensidad. La variación en la excentricidad de la órbita terrestre sucede cada 100,000 años. La excentricidad de la órbita fluctúa entre 0.5%, cuando es prácticamente circular, hasta 6% en su máxima elongación; cuando se alcanza la excentricidad máxima, se intensifican las estaciones en un hemisferio y se moderan en el otro.
- 3) La precesión o bamboleo del eje de rotación de la Tierra – corresponde a la tercera fluctuación astronómica, la cual ocurre aproximadamente cada 23,000 años. La precesión determina si el verano, en un hemisferio dado, cae en un punto de la órbita cercano o lejano al Sol. El efecto que produce es un refuerzo de las estaciones, cuando la máxima inclinación del eje terrestre coincide con la máxima distancia al Sol. Si esos dos factores se apoyan entre sí en un hemisferio, se contraponen en el hemisferio opuesto.

Milankovitch calculó que estos tres factores actúan conjuntamente, haciendo variar hasta en un 20 % la radiación solar recibida en las altas latitudes septentrionales durante el verano, lo que según argumentaba, basta para permitir que las grandes

masas de hielo se extiendan sobre los continentes del hemisferio boreal en la época de veranos frescos e inviernos suaves (Imbrie et al., 1984).

1.1.1. Tendencias climáticas globales Pleistoceno-Holoceno

En los últimos años se han realizado modelos globales de las condiciones climáticas para el Cuaternario, de los cuales suelen establecerse analogías entre el crecimiento de los casquetes polares con el fin de tener una escala de eventos dentro de este periodo. Generalmente no se les asigna, en forma estricta, un tiempo determinado, tal es el caso del modelo Alpino, en donde las glaciaciones e interglaciaciones no cubren todo el Cuaternario, sino un lapso de aproximadamente 700,000 años, esto es, desde finales del Pleistoceno Temprano. Por el contrario, el modelo norteamericano, abarca todo el Cuaternario. A pesar de lo anterior, en ambos modelos, la clasificación agrupa cuatro glaciaciones y cuatro interglaciales, que en teoría se pueden comparar.

En el caso del Pleistoceno se han documentado al menos cuatro periodos glaciales, conocidos para Europa como Günz, Mindel, Riss y Würm. En América, dichos ciclos se conocen como: Nebraska, Kansas, Illinois y Wisconsin, respectivamente. Asimismo, los periodos interglaciales conocidos en Europa como Gunz-Mindel, Mindel-Riss, Riss-Würm y Holoceno, en América se denominan como Aftniano, Yarmouth, Sangamon y Holoceno (Tabla 1)

Años A.P. (aprox)	Alpes	Rusia	Europa del Norte	Gran Bretaña	América del Norte
0 - 10,000	Holoceno	Holoceno	Holoceno	Holoceno	Holoceno
10,000 - 67,000	WURM	VALDAY	WEICHSEL	DEVENSIAN	WISCONSIN
67,000 - 128,000	Riss - Wurm	Pryluky	Eemian	Ipswichian	Sangamon
128,000 - 180,000	RISS	DNIEPER	SAALE	WOLSTONIAN	ILLINOIAN

180,000 – 230,000	Mindel - Riss	Zavadivka	Holstein	Hoxnian	Yarmouth
230,000 – 300,000	MINDEL	TILIGUL	ELSTER	ANGLIAN	KANSAN
300,000 – 330,000	Gunz - Mindel	Lubny 2	Cromerian	Cromerian	Aftonian
330,000 - 470,000	GUNZ	LUBNY 1/2		BEESTONIAN	NEBRASKAN

Tabla 1. Modelos clásicos de ciclos glaciales-interglaciales para Europa y Norteamérica. Basados en Eissman (1994), Gibbard et al., (1998), Urban (1995), Zagwijn (1996). Tomado de Cabadas (2007).

1.1.2 Último Máximo Glacial (UMG)

El UMG representa el momento más reciente en el que los grandes glaciares alcanzaron sus máximos volúmenes (Mix et al., 2001). Este periodo ha sido fechado entre 26,500 y 20,000–19,000 años cal AP y para México entre los 21,000 y 17,500 años cal AP (Caballero et al., 2010).

Globalmente la temperatura media llegó a ser 7 °C inferior a la actual, aunque la magnitud del enfriamiento fue muy diferente según la latitud (Bond et al., 1993; Mayewski et al., 1997). El descenso térmico fue mucho mayor en las latitudes altas que en las bajas, siendo también mayor en el interior de los continentes que en las costas. Así, en muchas partes del planeta, como en Europa central, la temperatura media descendió más de 15 °C. En las zonas tropicales la disminución de la temperatura media fue menor, aproximadamente 5 °C (Uriarte, 2003).

Durante este período, a medida que aumentó el hielo en los continentes, el agua de los océanos disminuyó, lo cual provocó un descenso en el nivel del mar. Cuando la acumulación de hielo continental fue máxima, el nivel de los mares quedó entre 120 y 140 metros por debajo de su cota actual (Clark et al., 2009). De este modo, grandes extensiones de las plataformas continentales, hoy sumergidas, quedaron al descubierto.

En el hemisferio norte, el UMG supuso un enorme cambio paisajístico ya que los casquetes de hielo y el permafrost ocuparon, de forma perenne, 27 millones de km², es decir, el 40 % de las áreas continentales de Norteamérica y Eurasia. Por el contrario, en el hemisferio sur, el aumento de hielo no fue tan significativo como en el norte, debido a que la presencia del mar impidió su expansión (Kershaw y Nanson, 1993; Mark y Helmens, 2005).

Hacia el final de Pleistoceno se inicia un nuevo periodo interglacial, por lo que la temperatura global se incrementa y los hielos comienzan a retraerse hacia los polos. No obstante, hay registros de una fase de enfriamiento climático, en contraste con la entrada al periodo interglacial, que corresponde a un estadal, denominado Younger Dryas (YD), que ocurrió entre 12,900 y 11,500 AP (Alley, 2000; Bond, 1992; Heine, 1994).

1.1.3 UMG en México

Los indicadores glaciales de las altas montañas del centro de México sugieren una disminución de la temperatura media anual de 6 °C (Lachniet y Vázquez-Selem 2005). El enfriamiento de la atmósfera y los océanos trajeron como consecuencia menor evaporación, menos nubosidad y menor precipitación pluvial. Así, la lluvia anual en el centro, el sur y el sureste de México, que ocurre fundamentalmente en verano, debió disminuir considerablemente, hasta 40 o 50 % según algunas estimaciones (Guilderson et al., 1994; Caballero-Miranda et al., 2002). El norte de México, en cambio, experimentó un aumento sustancial de lluvia, ya que los vientos del oeste, al desplazarse hacia el sur, penetraron profundamente en esa zona. El aumento en la lluvia aunado a temperaturas más bajas y menor evaporación, provocaron un incremento de la humedad efectiva. Por ello, extensas zonas planas y sin drenaje del Altiplano septentrional, hoy desérticas, estuvieron cubiertas por lagos, alrededor de los cuales se desarrollaba una vegetación propia de ambientes templados húmedos (Arroyo-Cabrales et al., 2008).

1.1.4 El Younger Dryas (YD)

La fase conocida como YD ocurrió entre los 12,900 y 11,500 años AP, (Rasmussen, et al., 2006), y se presentó al término del interestadial que cerró la etapa del UMG. El nombre de este periodo se deriva de una planta de pálidas flores amarillas *Dryas octopelata*, típica de la tundra ártica y de las alturas alpinas, que hizo de nuevo su aparición en las tierras bajas y meridionales de Europa (Andersson, 1896; Hartz y Milthers, 1901).

El enfriamiento del YD, aunque más claro en Europa, fue probablemente un fenómeno global, a excepción de la Antártida. Existen pruebas de que afectó a muchas regiones y latitudes: desde los Andes y la Patagonia hasta el Mar de Sulu en Filipinas (Kudrass et al., 1991).

Durante este periodo, la temperatura de invierno en Europa fue muy baja, alrededor de los 10 °C inferior a la actual, casi semejante a la de los tiempos glaciales (Brauer et al., 1999; Von Grafenstein et al., 1999; Genty et al., 2006; Heiri et al., 2007). Mientras que para el verano, la intensidad de la insolación fue superior a la actual. (Rind y Peteet, 1986; Alley, 2000). A pesar del retorno a las condiciones gélidas, el nivel del mar no descendió, sino que siguió elevándose lentamente; el volumen global de hielos no se incrementó, aunque en regiones de Europa, como en Escocia, sí hubo un avance importante de los glaciales (Andersen et al., 1995; Licciardi et al., 2007; Nesje, 2009).

Las causas que ocasionaron el YD aún no son muy claras. Sin embargo una de las hipótesis más aceptadas es la relacionada al cambio en la circulación del Atlántico Norte (Peteet, 2009), en donde se plantea que durante el Bølling Allerød (14,700 – 12,900 años AP), periodo anterior al YD, se dio un ascenso en la temperatura, lo que permitió una mayor entrada de agua de deshielo en el Atlántico Norte. Esto impidió la formación de agua profunda y en consecuencia originó una ralentización de la circulación oceánica, hecho que ocasionó la disminución del flujo de calor hacia el Hemisferio Norte (Rahmstorf, 2002; Liu et al., 2009; Carlson, 2010).

La finalización del YD se dio hacia el año 11,500 AP, debido a que en Groenlandia se produjo una subida térmica de hasta 10 °C. En Europa, por otro lado, los sedimentos de algunos lagos de Polonia (lago Gosciadz), de Suiza (lago Gerzensee) y de Alemania (lago Ammersee) también indicaron la terminación del YD más o menos en la misma temporalidad que en Groenlandia (Uriarte, 2003).

Es así, como hace 11,500 años, las corrientes oceánicas adoptaron el funcionamiento más o menos parecido al que hoy conocemos. Las aguas superficiales del Atlántico Norte se volvieron a calentar y las temperaturas, especialmente en Europa, ascendieron varios grados en pocas décadas. Dando así, fin al Pleistoceno y comienzo a un nuevo período templado, el Holoceno.

1.1.5 Eventos Heinrich y eventos Dansgaard - Oeschger

Los eventos Heinrich son fluctuaciones climáticas globales que suelen coincidir con el desprendimiento de Icebergs del manto Laurentino durante el último periodo glacial, especialmente entre 45° y 60° norte, y se registran dentro de las secuencias sedimentarias marinas por la deposición de clastos anómalos (*ice rafted debris*) producto de la erosión de los glaciares (Heinrich, 1988). La proliferación de icebergs y su posterior derretimiento, al parecer desencadenaron el descenso de la temperatura y salinidad del Atlántico norte afectando la circulación oceánica y el clima global (Maslin y Shackleton, 1995; Vidal et al., 1997).

Estos eventos se originan en el Noratlántico y está claro que ocurren por la interacción entre la atmósfera, la criósfera, y el océano (Hemming, 2009). Sin embargo, el mecanismo que los propicia no está bien definido, al parecer el crecimiento continuo de los casquetes glaciares, al igual que los forzamientos externos, son la causa del desprendimiento periódico de grandes volúmenes de hielo (Heinrich, 1988).

La duración de los eventos Heinrich es debatible, sin embargo se ha establecido que el lapso en que ocurren es alrededor de 495 años con una desviación estándar de 255

años (Hemming, 2004). Durante el último ciclo glacial se ha identificado seis eventos Heinrich que suelen referirse como H1-H6, aunque algunos autores establecen la anomalía del YD como el evento H0 (Bond y Lotti, 1995).

Los ciclos Dansgaard-Oeschger, se refieren a periodos de calentamiento abrupto seguido de una disminución gradual de la temperatura en Groenlandia. Estos eventos han quedado registrados en los isótopos del oxígeno del hielo de Groenlandia y también en los sedimentos de carbonatos en algunos lagos centroeuropeos (Schulz, 1999). Respecto a su origen, no se posee una explicación completamente aceptada; sin embargo, se tiene claro que el origen de estas oscilaciones no está en los cambios de la insolación sino en mecanismos de retroalimentación entre el sistema atmósfera-criósfera-hidrosfera (Labeyrie, 2000; Stocker y Marchal, 2000; Labeyrie et al.,2003).

1.2 El Holoceno

El Holoceno corresponde a la etapa geológica más reciente y comprende los últimos 11,500 años. Comienza a partir del final del YD, donde se desarrollan temperaturas más cálidas que originaron la retracción de masas de hielo hacia los polos, y en consecuencia, el ascenso en el nivel de los mares, dando a la superficie del planeta su conformación actual (Vázquez, 2007; International Stratigraphic Chart, 2008).

El climatólogo Humbert Lamb logró identificar desde el final de la Edad de Hielo y hasta la actualidad, cuatro períodos bien marcados con sus propias características climáticas:

- 1) Altitermal u Óptimo climático-época cálida que dio fin al último periodo glacial, ya que alcanzó su clímax hace 5,000 a 7,000 años.
- 2) Época más fría que corresponde, aproximadamente, a la Edad de Hierro (2,500 aC a 100 dC) y que tuvo su periodo más frío entre los años 300 y 900 aC.

3) Tras un tiempo frío, siguió un hito climático cálido, menos notable que el Óptimo climático, que alcanzó su cumbre a principios de la Edad Media hace unos 800 ó 1,000 años aproximadamente.

4) Por último, se registró una época fría, llamada Pequeña Edad de Hielo, del siglo XV al XIX, con un máximo rigor durante el s. XVII. Después de esta época, se inició una etapa con un clima relativamente más cálido, período que parece coincidir con el surgimiento de la Revolución Industrial y que se ha prolongado hasta la actualidad (Gribbin, 1986).

A partir de diversas investigaciones, se ha logrado caracterizar los diferentes momentos y condiciones ambientales del Holoceno; así se ha mostrado que en el Holoceno temprano predominaron condiciones ambientales de mayor humedad que las actuales, y que el clima moderno se ha mantenido estable desde hace aproximadamente 4,000 años AP (Metcalf, 2006). No obstante, los mecanismos no se desarrollaron de modo uniforme en todo el mundo. Un factor importante de variación térmica que actuó a lo largo de este periodo, fue la disminución paulatina de la insolación veraniega en el hemisferio norte, que tuvo un máximo al inicio del Holoceno, cuando finalizó el YD. Para entonces, la insolación veraniega en el hemisferio norte era un 8 % superior a la actual, mientras que la de invierno era un 8 % inferior. Por lo tanto, al comienzo del Holoceno, hace unos 11,500 años, la diferencia de insolación en el hemisferio norte entre los veranos y los inviernos era bastante mayor que la diferencia que existe en la actualidad por lo que los veranos eran más cálidos y los inviernos más fríos.

Estudios realizados en América, han arrojado que los yacimientos de los lagos de la región del Caribe tienen una peculiar sucesión, que va de la sequedad del YD, al final de la última glaciación, a la humedad de la primera mitad del Holoceno; sin embargo, para la segunda mitad de éste periodo, se registran condiciones más secas que durante el final del Pleistoceno (Hodell, 1991). A partir del 6,000 AP, se registra una importante inestabilidad del clima, lo que provoca una mayor frecuencia de sequías, y

un probable impulso para el surgimiento de diversas culturas más pujantes que las anteriores (Sandweiss, 1999).

En el caso particular de Norteamérica, durante la transición glacial a interglacial, las especies de bosques templados migraron al norte, debido al retraimiento del casquete Laurentino. De manera similar, los bosques templados y tropicales migraron altitudinalmente en las zonas montañosas, debido al calentamiento y la retracción de los glaciares de montaña (Lozano, 2007; Ortega et al., 2008).

El Holoceno medio (también conocido como el Altitermal) está fechado aproximadamente entre los años 7,500 a 4,500 AP (5,500 - 2,500 aC). Inicialmente fue definido por Antevs (1948, 1955) como un período de estrés climático de dimensiones macrorregionales representado por temperaturas muy altas y un descenso considerable de las lluvias. La severidad de las condiciones ambientales varió de región en región; ya que en algunas partes los grupos humanos tuvieron que adaptarse a las sequías, mientras que otras fueron casi abandonados, obligando a la población a refugiarse en lugares a mayor elevación o con microclimas mucho más amigables (Martin, 1963; Davis, 1984; Holliday, 1989; Betancourt, 1990; Van Devender, 1990; Meltzer, 1991; Carpenter y Sánchez, 2013).

El aumento de temperatura que continuó después de la última glaciación, provocó el deshielo de millones de km² de superficie, las cuales quedaron al descubierto y listas para ser colonizadas por los seres vivos. Los nuevos patrones de relieve, hidrografía y de paisaje, dieron lugar a la propagación de vegetales, animales y humanos en esas regiones. Flohn (1970), explica que durante el Holoceno medio, las temperaturas medias de Europa fueron de 2 a 2.5 °C más altas que en la actualidad; el Sahara y el Oriente Medio tuvieron un período más húmedo, durante el cual, algunas regiones desérticas (actualmente carentes de vegetación), se poblaron de hierbas esteparias, lo que implica que recibían precipitaciones anuales del orden de 200 a 250 mm.

Labeyrie (1988), comenta que durante esta época cálida, regiones como el Sahara o el Cercano Oriente registraron climas más húmedos que los actuales. Tal es el caso de la meseta del Tassili en donde se han encontrado vestigios de asentamientos humanos,

como murallas, avenidas y restos de tiestos cerámicos. Sobre sus paredes de arenisca, se registran cientos de grabados que datan de hace 6,500 años, los cuales representan siluetas de animales y hombres. Entre los animales se observan vacas bien nutridas, lo cual puede indicar que en esta región, el alimento era entonces abundante y el clima húmedo. Actualmente, la meseta del Tassili es desértica y sería casi imposible que los mamíferos de ese tipo pudieran alimentarse allí.

Las condiciones húmedas que afectaron al Sahara hace unos 7,000 años, también se presentaron en otras regiones desérticas del mundo: Sudán, Yibuti, Arabia, Irán, Afganistán, Pakistán y el suroeste de Estados Unidos en el hemisferio norte; mientras que en el hemisferio sur, se encuentra el Kalahari, el desierto de Australia y el desierto de Atacama en el norte de Chile. Alrededor de la franja de los 20° latitud norte, en la región sur del Sahara existieron varios lagos hace aproximadamente 7,000 años. Se considera que por esas mismas fechas, los lagos de México eran mucho más extensos y rodeados de una gran vegetación (Labeyrie, 1988).

1.2.1 Condiciones ambientales en el noroeste de México y suroeste de EUA durante el Holoceno

La transición del Pleistoceno al Holoceno se caracterizó por fluctuaciones de condiciones métricas a xériticas (Holmgren et al., 2006), en donde el periodo climático llamado Bølling Allerød se manifestó con condiciones áridas y cálidas mientras que el periodo del YD presentó condiciones húmedas y frías (Polyak et al., 2004; Holmgren et al., 2006; Wagner et al., 2010), aunque autores como Ortega-Rosas et al., (2008) sugieren que el YD se caracterizó por temperaturas entre 6 y 3 °C más bajas a las actuales con una precipitación de 250 mm menor a lo largo de la Sierra Madre Occidental.

Diversas investigaciones señalan que el Holoceno presenta periodos de insolación fluctuante, estacionalidad del perihelio y variación en la inclinación terrestre. Dando como resultado el incremento de las temperaturas globales, el reordenamiento de la

circulación atmosférica con base en la expansión del ecuador térmico y la migración de la Zona Intertropical de Convergencia (ITCZ) hacia el norte, condiciones que provocaron cambios en la distribución de humedad y sequías en el hemisferio norte además del establecimiento de las condiciones climáticas actuales de Norteamérica (COHMAP, 1988; Mayewski et al., 2004; Melcalfe et al., 2015).

El Holoceno temprano se caracteriza por la migración de vegetación de clima frío hacia altas latitudes y elevaciones superiores a 2,000 msnm. Es así, como esta vegetación fue reemplazada por matorrales y especies desérticas en periodos de sequía debido al establecimiento de los desiertos de Norteamérica (Van Devender, 1990; Holmgren et al., 2003). En el norte de México, el descenso de la lluvia provocó un descenso en los niveles lacustres y en general en las condiciones de aridez en el Altiplano septentrional y el noroeste del país –Sonora y Baja California– (Arroyo–Cabral, 2008).

Los registros sedimentarios en la cuenca de Guaymas, muestran que al inicio del Holoceno (11,600–10,000 años AP), disminuyeron los carbonatos de calcio, así como los aportes terrígenos, lo que pudiera relacionarse con la aridización en el continente (Barron et al., 2004). Sin embargo, cabe mencionar que algunos autores como Ortega et al., (2008) sugieren que alrededor de los 9.2 ka cal AP se establecieron las lluvias monzonales, que incrementaron la precipitación de verano en la Sierra Madre Occidental.

El Holoceno medio presentó temperaturas ligeramente mayores a las actuales con varios periodos de enfriamiento en los polos y sequías en los trópicos entre 7 y 5 ka AP (Menking y Anderson, 2003; Mayewski et al., 2004; Dean, 2006). Existen evidencias de que algunas partes elevadas presentaron condiciones de mayor humedad que las de la actualidad, posiblemente por el establecimiento de lluvias monzonales y ciclones tropicales del pacífico este (McAuliffe et al., 1998), que incrementaron la precipitación 200 mm en comparación con el Holoceno temprano y temperaturas de 2 °C mayores a las actuales en la Sierra Madre Occidental (Ortega-Rosas et al., 2008). Sin embargo, existen extensas áreas de Norteamérica sujetas a

gran variabilidad, con sequías severas seguidas por periodos gradualmente más húmedos (Menking y Anderson, 2003). Para el Holoceno tardío se establecieron las condiciones oceanográficas actuales, con ciclos intensos de *El Niño Southern Oscillation*, ENSO (Barron et al., 2004; Pérez-Cruz, 2006).

1.2.2 *El altitermal en el Desierto de Sonora*

En el estado de Sonora existe evidencia de una larga historia de ocupación humana representada por varios grupos sociales que habitaron la región desde finales del Pleistoceno y continuaron casi sin interrupción hasta tiempos recientes (Rivet, 1995; Dixon, 2001; Taylor et al, 1996). Durante este periodo, se sabe que existieron grupos humanos que lograron adaptarse y desarrollarse a pesar de las condiciones ambientales severas del desierto (Ritter, 1991; Holliday et al, 1994; Carpenter et al, 2003, 2005, 2009; Sánchez y Carpenter, 2003, Sánchez et al, 2009; Villalpando et al; 2004, 2005 y 2007; Terrazas y Benavente, 2006). Así entonces, los grupos humanos que habitaron Sonora tuvieron que enfrentarse, al menos, a dos cambios climáticos drásticos de larga duración. El primero, durante el Pleistoceno terminal, conocido como YD; y posteriormente, en el Holoceno medio, al Altitermal. Durante estos períodos de extrema desertificación ocurrieron abandonos esporádicos del desierto; aunque, se piensa que las poblaciones volvieron a ocupar el desierto, lográndose adaptar, permanecer en las zonas desérticas e inclusive desarrollar comunidades sedentarias de agricultores incipientes (Carpenter y Sánchez, 2013).

El cambio climático conocido como el Altitermal, como se mencionó anteriormente, es definido por Antevs (1948, 1955) como un lapso de tiempo caracterizado por sus altas temperaturas y poca precipitación entre los años 5,000 y 2,500 aC. Las evidencias de dicho evento para el desierto de Sonora, se caracterizaron por la falta de depósitos y registros arqueológicos debido a que la gran sequía erosionó la mayoría de los depósitos, como resultado de lo anterior existe un hiato estratigráfico que parece corroborar los modelos que plantean condiciones ambientales inhóspitas (Berry y Berry, 1986; Mabry, 1998).

Estudios realizados a partir de los registros paleopedológicos fueron los efectuados por Cruz y Cruz et al. (2014, 2015) en el sitio de La Playa, Sonora, quien a partir de una serie de análisis físicos, químicos y morfológicos señala que el cambio ambiental entre el Pleistoceno tardío y el Holoceno temprano fue de un ambiente con alta precipitación, evidenciada en suelos de más de 15,000 años AP, hacia una pérdida de humedad. Es así, como durante el Pleistoceno tardío (alrededor del 20,000 años cal AP) se promovieron procesos de lixiviación de carbonatos y formación de concreciones, lo que señala que al final del Pleistoceno y hasta el Holoceno medio (4,000 años cal AP) prevaleció un largo período de estabilidad en el paisaje, permitiendo un buen desarrollo de los suelos bajo un clima predominantemente semiárido con marcados cambios estacionales (Fig. 1). Es decir, durante el Pleistoceno tardío ya se habían desarrollado condiciones semiáridas (Cruz y Cruz, 2011; Cruz y Cruz et al., 2014 y 2015), contrariamente a lo que se ha documentado para el noroeste de Chihuahua y el noreste de Baja California (condiciones húmedas); por lo que los grupos que pudieron asentarse en la región durante el final del Pleistoceno tardío (*circa* de 13,000 años AP) debieron desarrollarse en ambientes propios de climas semiáridos con cambios estacionales muy marcados. Estas condiciones de semiaridez se mantuvieron en el Holoceno y continuaron hasta la actualidad en el sitio, aunque no con la misma magnitud. Así, el desarrollo pedogenético que comenzó en el Pleistoceno, aparentemente duró unos 10,000 años, en contraste con los suelos formados durante el Holoceno, los cuales tuvieron un menor tiempo de desarrollo (Fig. 1).

Así entonces, se piensa que la pérdida de humedad y el momento en que comienzan las condiciones de aridez se refieren a evidencias del Altitermal, las cuales aún no son claramente reconocidas.

A partir de los estudios paleopedológicos realizados en el sitio de La Playa, por Cruz (2011); Barceinas (2015) analiza los parámetros magnéticos, interpretando que las propiedades tanto pedogénicas como magnéticas dentro de los suelos pleistocénicos, marcan cambios en las condiciones de humedad comparadas con las actuales. Ya que en este suelo se observan procesos tales como la gleyzación, la cual va a dar una débil

señal magnética debido a que se produce bajo condiciones de saturación de agua; dentro de este mismo periodo, se registran otros procesos como la rubificación y descarbonatación, los cuales se producen en condiciones de humedad, pero sin llegar a ser excesiva. A diferencia de la gleyzación, estos procesos van a originar un aumento en el patrón magnético. Finalmente, el incremento de la susceptibilidad magnética y la presencia de carbón, los cuales se correlacionan a fuegos intensos, podrían indicar la tendencia hacia fases más secas, como el Altitermal, evento ocurrido en el Holoceno medio. En el caso del Holoceno tardío, las propiedades magnéticas se asocian con la mayor dinámica geomórfica que parece obedecer a la fuerte perturbación antrópica, por lo que no se puede hablar de una señal climática (Fig. 1).

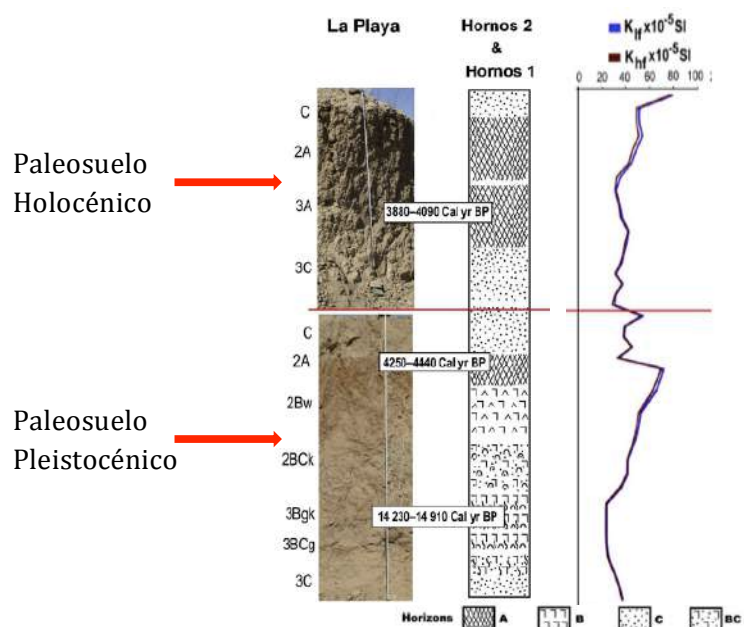


Fig. 1. Estratigrafía, dataciones y propiedades pedogenéticas del Perfil San Rafael, en el sitio La Playa, Sonora. Perfil estudiado por Cruz y Cruz (2011), y Barceinas (2015). Tomado de Cruz y Cruz (2015).

Así entonces, la reconstrucción climática esbozada para los suelos pleistocénicos coinciden con los registros de la zona, que sugieren climas más húmedos en el noroeste de México y suroeste de EUA durante el Pleistoceno tardío (Van Devender,

1990; Thompson et al., 1993), así como cambios abruptos en el Holoceno medio (Booth et al., 2005).

1.3 La Revolución Neolítica

El término Revolución Neolítica fue acuñado por John Lubbock en su obra *Prehistoric Times* (1865) debido a los hallazgos de herramientas de piedra pulimentada, en vez de tallada, lo que parecía acompañar el desarrollo y expansión de la agricultura. Sin embargo, es Vere Gordon Childe (1936) quien introdujo el concepto de Revolución Neolítica como expresión de la repercusión del cambio tecnológico en las formas sociales (Hernando, 1994).

Hasta antes de la llegada de la agricultura, los seres humanos emplearon como único medio de sustento, técnicas propias de cazadores-recolectores. La transición hacia la agricultura, que posteriormente condujo a la aparición y desarrollo de las primeras civilizaciones urbanas, así como a la obtención de una riqueza y prosperidad material inimaginables para las poblaciones de cazadores-recolectores neolíticos, dio pie a lo que hoy conocemos como Revolución Neolítica (Martin, 2017). Así, la Revolución Neolítica se refiere al momento en que la humanidad adquirió la capacidad de producir y controlar su propio alimento con el cultivo de las plantas y la cría de los animales domesticados, capacidad que, a su vez, transformó la economía de apropiación en una economía de producción (Sugiura, 1988).

La neolitización es un fenómeno global que afectó a toda la humanidad. Sin embargo, los ritmos, cronologías y tipos de procesos históricos que llevaron a esta situación son enormemente variados. Ejemplo de lo anterior, es la existencia de sociedades humanas procedentes de diversos lugares y épocas distintas sin ninguna relación entre sí, las cuales fueron capaces de domesticar especies vegetales o animales y de desarrollar sistemas sociales apoyados en esas nuevas fuentes de recursos (Harlan 1995; Smith 1995; Fernández-Armesto, 2001). En la actualidad, se acepta de forma generalizada la existencia de al menos seis regiones independientes de invención del

Neolítico: el Creciente Fértil, China oriental, Asia occidental, Mesoamérica, la Cordillera de los Andes, Norteamérica oriental (Diamod y Bellwood, 2003).

Es innegable que la aparición y expansión de la agricultura durante el Neolítico es uno de los acontecimientos más importantes y de mayor trascendencia ocurridos en la historia del ser humano. Determinar las razones que motivaron a nuestros antepasados a adoptar un modo de vida tan radicalmente distinto al que habían llevado durante generaciones, son aún difíciles de establecer. Para explicar lo anterior existen numerosas y diferentes hipótesis.

Para Winterhalder y Kennett (2006) hay tres variables que explicarían el origen de la agricultura:

- Incremento de la presión demográfica
- Cambio en las condiciones medioambientales
- La aparición de la competición socio-económica

Respecto a la primera hipótesis, Cohen (1977) propuso como causa de la adopción de la agricultura la presencia de un desequilibrio de los recursos disponibles debido al crecimiento de la presión demográfica humana en determinadas zonas del planeta, lo que provocó que grupos de cazadores-recolectores valoraran la posibilidad de adoptar un modo de vida radicalmente distinto al final del Pleistoceno. North y Thomas (1977) plantean que, debido a la aparición de las primeras sociedades propiamente agrarias como consecuencia del incremento de la presión demográfica, se produjo el desarrollo de la domesticación de ciertas especies animales y vegetales.

Respecto a la segunda hipótesis, Childe (1928) sostiene que a finales del Pleistoceno ocurrió un cambio climático que afectó a las condiciones medioambientales y provocó un incremento de las temperaturas, hecho que desencadenó la extinción de diversas especies animales y vegetales que fueron incapaces de adaptarse a las nuevas condiciones del entorno. Winterhalder y Kennett (2006), comparten la opinión de Childe, argumentando que, bajo esas nuevas circunstancias medioambientales, los cazadores-recolectores se vieron obligados a cambiar su modo de vida, y con ello su

dieta (Winterhalder y Kennett, 2006). Por su parte, Olsson (2001) también es partidario de que el cambio hacia un modo de vida agrícola fue debido a factores medioambientales que provocaron cambios genéticos en algunas especies, haciéndolas más propensas a la domesticación, lo cual facilitará el paso hacia un sistema de producción agrícola.

En relación a la tercera hipótesis, Hayden (1990) sostiene que la agricultura se originó en grupos humanos que previamente presentaban un grado variable de desigualdad social entre sus miembros, lo cual, en opinión de Lagerlöf (2002), no hizo más que aumentar las desigualdades y provocar la aparición de fenómenos tremendamente negativos como la esclavitud.

1.3.1 La teoría del Oasis y Oasisamérica

La teoría del Oasis fue formulada por Childe, (1936) y sostiene que las comunidades del final del Pleistoceno se vieron obligadas a recluirse en zonas más fértiles con abundancia de agua. Esto fue así por la existencia de un cambio climático que provocó una desecación que provocó la retirada de los hielos hacia el norte. Esto causaría también un aumento de las temperaturas.

Esas zonas fértiles eran los “oasis” de refugio, pequeños reductos con recursos de agua que sirvieron para acoger especies vegetales y animales que se refugiaron en ellos y al mismo tiempo atrajeron al ser humano, que las aprovechó ejerciendo una domesticación que las conservara asegurando su reproducción, iniciando un modelo de vida sedentaria e iniciando las prácticas de vida agrícolas y ganaderas (Quijano, 2011).

La superárea conocida como Oasisamérica tuvo su origen 2,000 años después de la separación de Mesoamérica y Aridoamérica, es decir hacia el 500 aC. A diferencia de los mesoamericanos, estas nacientes sociedades agrícolas se enfrentaron a un medio adverso debido a su aridez, en el que casi sólo en oasis o en zonas en donde se empleaban los sistemas de irrigación se garantizaba la prosperidad de los sembradíos.

La construcción de las obras de riego hizo que la expansión del territorio oasisamericano fuese muy gradual y muy difícil (López A. y López L., 2011).

En el momento de máxima expansión, Oasisamérica ocupaba lo que hoy día se conoce como suroeste de los Estados Unidos y noroeste de México: la mayor parte de Utah, Arizona y Nuevo México; porciones importantes de Colorado, Sonora y Chihuahua, así como extensiones menores de California, Baja California y Texas. En términos generales éste es un territorio semiárido y de clima extremo. Las precipitaciones son escasas y se dan en forma torrencial en pocos meses del año. Kirchhoff, (1954) bautizó esta superárea cultural a partir de la existencia de pequeños oasis donde se concentraron algunas de las grandes poblaciones.

A pesar de que las plantas cultivadas, la agricultura y la cerámica llegaron muy probablemente desde Mesoamérica, las sociedades oasisamericanas adquirieron con el paso de los siglos un carácter propio. Grandes culturas como la anasazi, la hohokam, y la mogollón imprimieron un sello peculiar en los áridos paisajes septentrionales con sus sistemas de control del agua y de la erosión. Canales, terrazas, represas y camellones transformaron el desierto (López A. y López L., 2011).

1.4 Holoceno tardío. Agricultura temprana. La Playa, Sonora

El inicio del Holoceno tardío, alrededor del 2,500 años aC, marcó un período pluvial de condiciones ambientales más favorables. Dicho periodo está representado por una docena de sitios en la cuenca de Tucson, Arizona; La Playa, Sonora; Cerro Juanaqueña, Chihuahua y media docena de sitios en Nuevo México. Se caracteriza por el desarrollo de aldeas agrícolas en las planicies aluviales de los ríos. Evidencia de la tecnología registrada para ese momento, son los canales, bordos y cercas vivas, lo que señala las técnicas existente para el control del agua. Se piensa que uno de los factores influyentes en la adaptación humana de estas condiciones fue la llegada del maíz domesticado (Carpenter y Sánchez, 2012).

Ejemplo de este tipo de sociedad es la que se registra en el sitio de La Playa, ubicado a 10 km al norte de la Estación Trincheras, en donde se tiene estudio del único registro de agricultura temprana en el estado de Sonora. Los datos obtenidos indican que el valle del río Boquillas fue utilizado esporádicamente desde época Paleoindia. Sin embargo, durante el Holoceno tardío, la ocupación del valle de Boquillas se incrementó considerablemente (2,500 aC-200 dC), lo cual parece coincidir con el regreso de condiciones climáticas más favorables. La población del valle se incrementó notablemente en el período de Agricultura Temprana, que comenzó alrededor de 1,500 aC con dos fases: San Pedro (ca. 1,500/1,200 a 800 aC) y Ciénega (800 aC-ca. 200 dC) (Carpenter, 2009; Carpenter et al., 2002, 2003, 2005, 2007 y 2009). Estudios recientes geomorfológicos y geocronológicos sugieren que una vez que terminó el período Altitermal (4,500 años ca. AP), el sitio de La Playa fue reocupado por grupos humanos sin interrupción (Copeland et al., 2012). Así entonces hacia inicio del Holoceno tardío, alrededor del 2,500 aC, parece hubo un periodo húmedo, correspondiente al periodo pluvial del Holoceno, el cual se caracterizó por condiciones ambientales más húmedas, lo cual permitió el establecimiento de grupos humanos en los abanicos aluviales de los ríos, en donde se llevaría a cabo la agricultura (Carpenter y Sánchez, 2013).

Sánchez (2010), documenta varios sitios arqueológicos arcaicos localizados en la subprovincia del desierto de Sonora en los llanos de Hermosillo, donde existen depósitos estratigráficos del período Altitermal y/o la época fluvial pos-Altitermal. Dichos sitios son: El Bajío, El Aigame, El Aguajito y el Fin del Mundo, los cuales tienen registros de *black mats* o depósitos de ciénegas que datan entre 5,000–4,000 años ¹⁴C AP., junto con evidencias de ocupación humana (Sánchez 2010). Se piensa que la formación de estas ciénegas son un testimonio de que hacia el final del período Altitermal existió un período de humedad relativamente alto que recargó los mantos acuíferos y favoreció la formación de ciénegas. Estas condiciones ambientales favorables permitieron que los grupos humanos del Arcaico volvieran a ocupar las zonas bajas de Sonora y comenzaran a experimentar con el cultígeno mesoamericano: el maíz (Sánchez, 2010).

CAPITULO 2. ÁREA DE ESTUDIO

Esta investigación se realizó en dos diferentes sitios de estudio, el primero de ellos corresponde a La Playa, localizado al noroeste de Sonora; y el segundo a El Gramal, ubicado al suroeste del estado (Fig. 2).

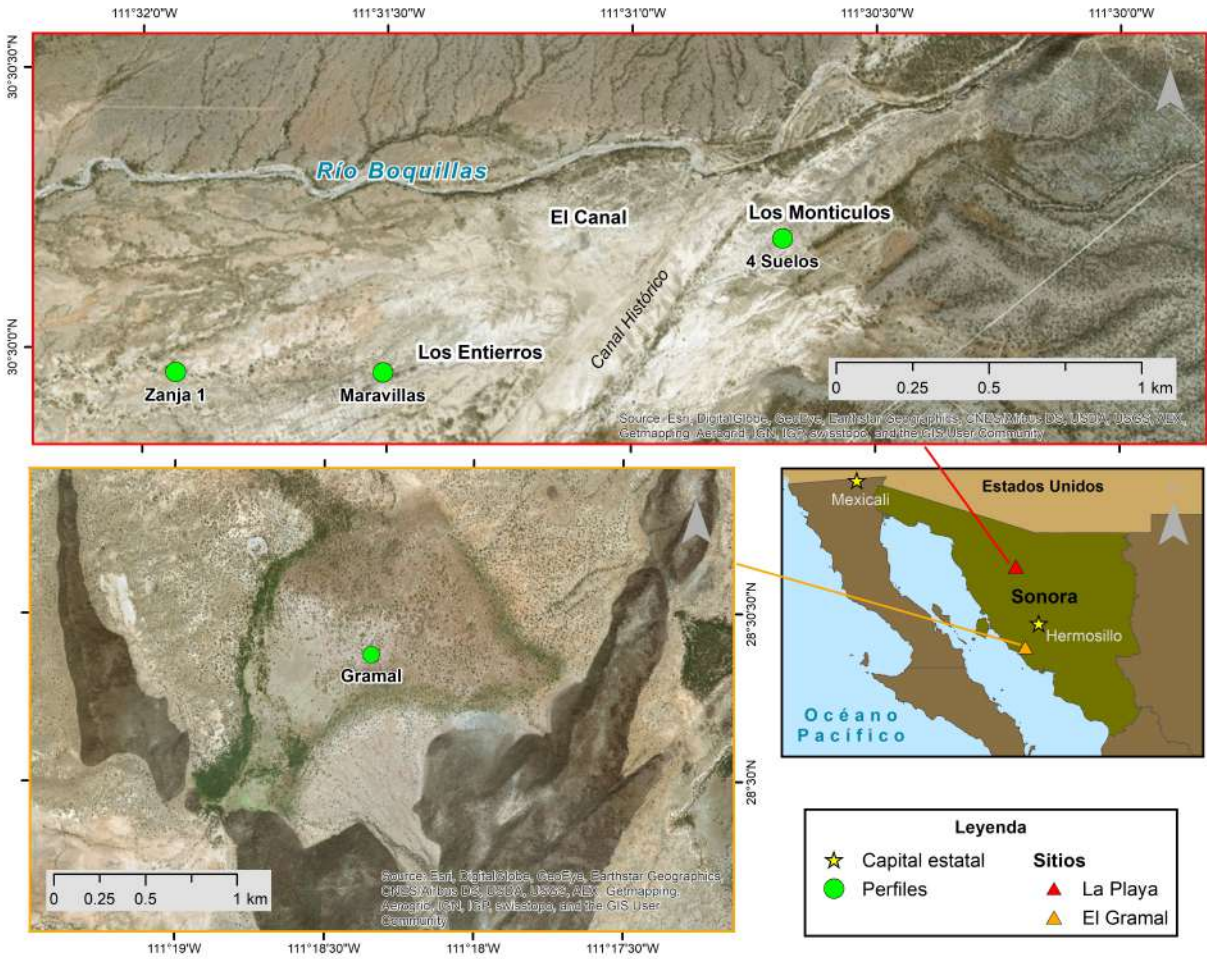


Fig. 2. Localización de los sitios de estudio en el noroeste de México (mapa realizado por Emmanuel Ayala Rangel, 2019)

2.1 La Playa

El sitio de La Playa se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Desierto de Sonora, lugar caracterizado por el declive gradual del terreno hacia la costa del Golfo de California. Se conforma de amplias llanuras desérticas y semidesérticas separadas

por sierras aisladas y alargadas con orientación norte-sur, las cuales abarcan casi la mitad del estado de Sonora, parte de California y Arizona en Estados Unidos (Camou, 1998).

El abanico aluvial de La Playa y su cuenca de alimentación se desarrollan en la zona limítrofe del cratón de Norteamérica y el terreno de Caborca. Ambos bloques tectonoestratigráficos se encuentran separados por la megacizalla Mojave-Sonora activa durante el periodo Jurásico Medio-Tardío, caracterizada por un sistema de fallas con desplazamiento lateral que se extienden desde el desierto de Mojave, en Estados Unidos, hasta una dorsal marina en el Golfo de México (Molina-Garza e Iriondo, 2005). Respecto a la geología, el sitio se caracteriza por la presencia de rocas metasedimentarias del Cretácico tardío (McLaurin et al., 2012). Estas rocas afloran en las crestas montañosas de la Sierra Boquillas, mientras que los sedimentos aluviales del Cuaternario cubren las zonas más bajas.

La Playa se localiza en la Cuenca del Río Boquillas, dicho río comienza en la Sierra Cibuta, cerca de Nogales, y corre hacia el oeste hasta unirse con el río Magdalena a unos kilómetros de la estación Trincheras. Así entonces, La Playa corresponde a un abanico aluvial formado en el piedemonte de la Sierra Boquillas dentro del municipio de Trincheras, con una superficie aproximada de 12 km² y una altitud media de 515 msnm (Fig. 3) (Carpenter, 2009).

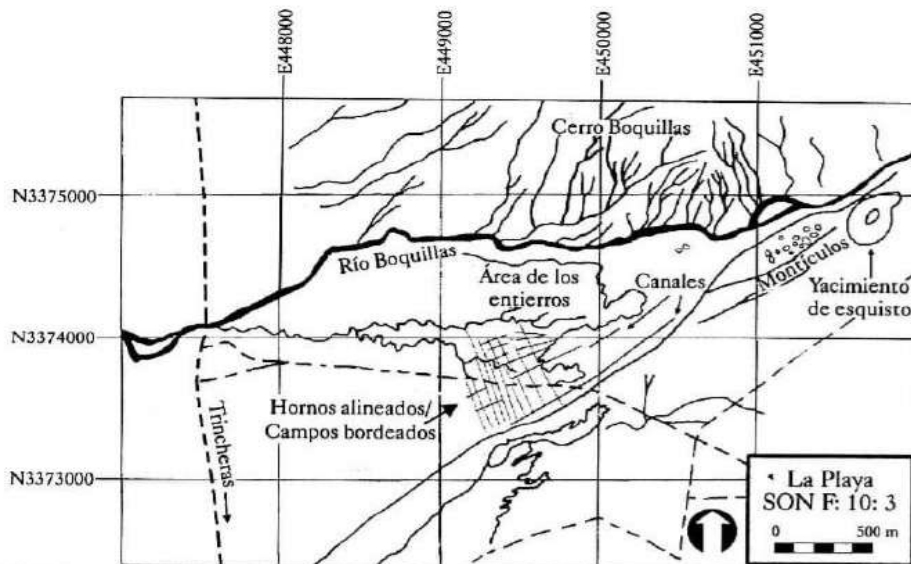


Fig. 3. Sitio arqueológico de La Playa (Carpenter et al., 2003)

La temperatura media anual oscila entre 18 y 22 °C y la precipitación media anual es de 200 a 400 mm, con precipitaciones que ocurren entre el verano y el invierno (Vidal-Zepeda, 2005). La vegetación predominante es del tipo matorral desértico (Fig. 4), representado por: mezquite (*Prosopis spp.*), palo verde (*Parkinsonia*), palo fierro (*Olneya tesota*), choyas y nopales (*Opuntia*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), saguaro (*Carnegiea gigantea*), pitahaya (*Stenocereus thurberi*), vinoramas (*Acacia anientecea*), cirio y uña de gato (*Mimosa spp.*), vegetación característica de sierras bajas y lomeríos (Pérez, 1985).



Fig. 4. Tipo de vegetación en el sitio La Playa. Fotografía tomada por Ibarra-Arzave (2015)

La Playa corresponde a uno de los sitios arqueológicos de mayor extensión en el noroeste de México y suroeste de los EUA. Desde el Pleistoceno temprano se ha caracterizado por la formación de abanicos aluviales, observándose en la actualidad algunos remanentes de depósitos aluviales pleistocénicos; además, tiene un importante registro de vestigios culturales que evidencian ocupación humana permanente, desde el Pleistoceno terminal (Villalpando y Carpenter, 2004; Carpenter

et al., 2009) hasta el periodo de Agricultura Temprana 1,500 aC al 200 dC (Carpenter, 2009; Carpenter y Sánchez, 2013). Sin embargo, la mayoría de las evidencias humanas pertenecen a los últimos 3,000 años (Carpenter et al., 2005; Carpenter, 2009; Copeland et al., 2012). Dichos elementos son constantemente expuestos debido a la intensa erosión fluvial y eólica que afecta el abanico (Fig. 5).



Fig. 5. Cárcavas formadas por al intensa erosión fluvial y eólica que afectan al abanico de La Playa. Fotografía tomada por Ibarra-Arzave (2015).

Entre los muchos elementos culturales que se registran en el sitio, se encuentra la acumulación de rocas, las cuales se extienden por varios kilómetros, aún se cuestiona el origen y función de ellas (Fig. 6a); por otro lado, se tiene también rocas fracturadas por el fuego, las cuales se relacionan con hornos (Fig. 6b) que utilizaban rocas incandescentes para la cocción de animales y plantas. Este sitio también se caracteriza

por la importante presencia de entierros humanos (inhumaciones y cremaciones) (Fig. 6c). Además del registro antrópico, también se tiene evidencia de fauna pleistocénica como el perro de la pradera (*Cynomys ludovicianus*), bisonte, mamuts, camello (*cf. Camelops*), berrendo (*Capromeryx SP.*) y tortugas (*Hesperotestudo SP.*) (Mead et al., 2010). En superficie también se encuentran restos de artefactos como lítica pulida, tallada; concha; hueso y cerámica.

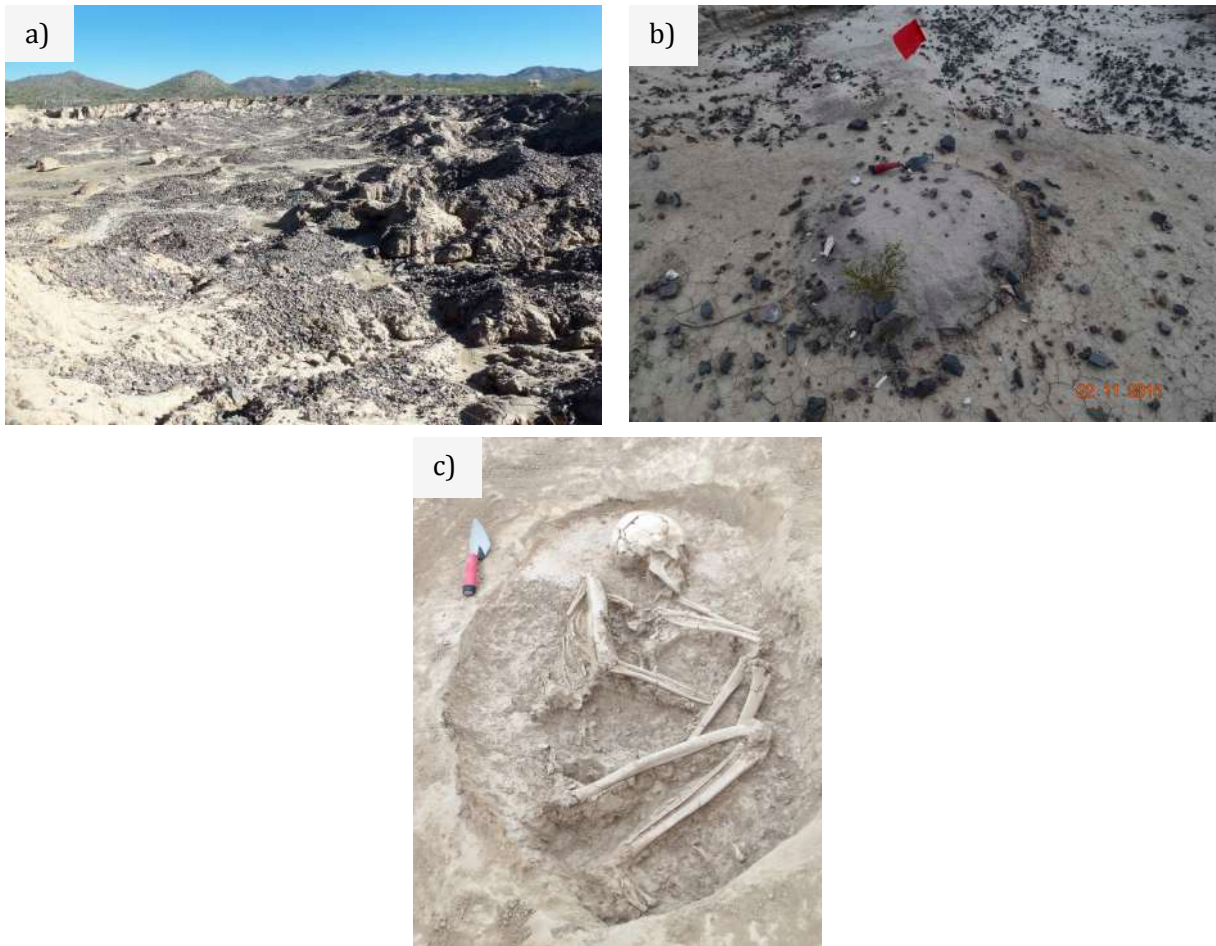


Fig. 6. Elementos culturales registrados en La Playa. a) Acumulación de rocas en superficie; b) Horno; c) Entierro humano. Fotografías tomadas por Ibarra-Arzave (2013).

2.1.1 Cronoestratigrafía de La Playa

Las unidades paleopedológicas y sedimentarias localizadas en el abanico aluvial forman parte de un conjunto estratigráfico cuya temporalidad abarca desde finales del Pleistoceno hasta la actualidad. La secuencia más completa está integrada por el Paleosuelo San Rafael (SRP-por sus siglas en inglés) localizado en la base, el intervalo sedimentario (SI) y el Paleosuelo Boquillas (BOP - por sus siglas en inglés) en la parte superior. Cada una de estas superficies representa diferentes condiciones ambientales y momentos de estabilidad en el paisaje, a lo largo de 14,000 años.

Estudios recientes han caracterizado y datado una serie de paleosuelos y sedimentos localizados en el abanico aluvial, con esta información se han propuesto algunas teorías acerca de las condiciones ambientales que determinaron su formación (Cruz y Cruz, 2011; Copeland, et al., 2012; Cruz y Cruz et al., 2014, 2015; Schott, 2017; Ayala, 2018; Ibarra et al., 2018; Ibarra-Arzave et al., 2019) (Fig. 7).

A continuación comentaré algunos de los estudios más relevantes a mi parecer.

Los estudios de Cruz y Cruz (2011), y Cruz y Cruz et al., 2014 y 2015 identificaron dos diferentes pedogénesis: el SRP y el BOP (Fig. 7). En donde el SRP se describe como un suelo relicto de amplia distribución localizado en el norte del estado de Sonora, se caracteriza por una superficie roja (Cambisol crómico, según la WRB (2006)) relacionada a la fase más antigua de la pedogénesis; la cual, muestra una clara discordancia con las condiciones bioclimáticas actuales. Lo anterior, se establece a partir de que los horizontes más profundos (3BCg y 3Bgk) muestran rasgos gleycos, promovidos por la saturación con agua durante largos periodos de tiempo lo que se relaciona a un ambiente ligeramente más húmedo que el actual; mientras en los horizontes superiores (2BCk y 2Bw) la presencia de mayor humedad contribuyó al proceso de intemperismo y formación de minerales secundarios como arcillas y óxidos de hierro, provocando así, la rubificación del material. Por otra parte, la presencia de carbonatos iluviados así como la formación de illita a partir de esmectita muestra una marcada variabilidad estacional. La presencia de condiciones de mayor humedad se sustenta también, en el análisis de isótopos estables de carbono en

humus, carbonatos y huesos fósiles (Cruz y Cruz et al., 2016), cuyos resultados se inclinan hacia una cobertura vegetal mixta de plantas tipo C3 y C4 con predominancia de C3, indicando un ambiente de árboles con pastos asociados. Las edades obtenidas para este desarrollo van de 14,910 a 4,250 años cal AP, contemplando un periodo que va del Pleistoceno terminal al Holoceno medio (Cruz y Cruz, 2011; Cruz y Cruz et al., 2014, 2015).

El BOP corresponde a un suelo policíclico constituido por horizontes Ah con poca acumulación de materia orgánica y separados entre sí por capas de arena y limo predominantemente (Cruz y Cruz et al., 2015). Este desarrollo presenta una estructura en bloques subangulares pequeños, intemperismo y carbonatación, de forma muy incipiente. Este escaso desarrollo se debe a los breves periodos de estabilidad geomorfológica ocurrida durante esa etapa. Es posible suponer que estos episodios de acreción intermitente se encuentran vinculados con el aumento de humedad tras el Altitermal (Cruz y Cruz et al., 2015).

Entonces, el SRP es considerado un marcador de sitios arqueológicos y localidades con megafauna del Pleistoceno tardío. Mientras que BOP se relaciona con la superficie de ocupación humana del período de la agricultura temprana (EAP) durante el Holoceno medio.

Respecto a la formación de la superficie holocénica y a su cronología, se tiene el trabajo de Copeland et al (2012), quien establece siete niveles estratigráficos (Fig. 7).

- Unidad A: Se encuentra expuesta únicamente a lo largo del canal del Río Boquillas. Tiene una edad superior a los 44,000 años AP, es de color rojizo y contiene restos fósiles de mamíferos y conchas. El ambiente de formación corresponde a pantanos o humedales asociados a depósitos aluviales sobre los cuales se desarrolló un paleosuelo rojo con acumulación de nódulos de carbonato (Fig. 7).
- Unidad B₀: Aflora exclusivamente en el área de Dos Pisos al sureste del abanico, consta de capas entrecruzadas de arena y limo con arcillas. Su edad va de 4,690 a >4,350 años AP. El inicio de este nivel estratigráfico corresponde a la fase final del SRP en el 4,250 años AP (Fig. 7).

- Unidad B₁/B₂: Aunque se encuentra en gran parte del sitio, su mayor presencia se tiene en el área de Dos Pisos. Son litológicamente similares, en algunas zonas se presentan separadas por alguna discontinuidad; mientras que, en otras, están completamente fusionadas. Consta de depósitos fluviales de limo. La unidad data del 4,350 al 4,160 años AP. Junto con B₀ parecen indicar un ambiente con ausencia de cuerpos de agua permanente, pero donde el suelo conserva suficiente humedad, probablemente a su cercanía con el nivel freático (Fig. 7).
- Unidad B₃: Aparece como una franja blanca expuesta a lo largo de todo el sitio. Tiene un espesor menor a los 150 cm, es la más arenosa y laminada de toda la unidad B. Contiene restos culturales como líticos, cerámica y un entierro. Data del 3,770 al 3,110 años AP. Su ambiente se relaciona con cuerpos de agua permanente de los que se desconoce si son de origen natural o antrópico (Fig. 7).
- Unidad B₄: Se registra a lo largo de todo el sitio. Posee un contacto basal muy irregular sugiriendo una marcada topografía en la superficie de la unidad B₃, la cual puede estar asociada a canales naturales o de riego y restos de hornos enterrados. La formación de esta unidad oscila alrededor de los 3,140 años AP, dicha edad es más temprana que el desarrollo del BOP, esto puede deberse a que los depósitos fluviales a partir de los cuales se formó podrían estar heredando una señal de materiales más antiguos. La parte inferior de esta unidad se relaciona a cuerpos de agua permanente. Cruz y Cruz et al., (2014) la asocian a los horizontes A del perfil Hornos 2 del BOP (Fig. 7).
- Unidad B₅: Es una unidad discontinua, expuesta en la mayor parte del sitio y altamente perturbada; tiene espesores variables y en algunos sitios llega a desaparecer, ocasionando que la unidad C repose directamente en B₄. Corresponde a la capa que contiene la mayor cantidad de restos culturales, entre ellos un sistema de canales para riego. Se le conoce como el Principal horizonte cultural. Su edad va del 2,330 al 1,580 años AP. El ambiente se relaciona a un humedal de origen antrópico (Fig. 7).
- Unidad C: Se registra a lo largo de todo el sitio, tiene espesores variables y frecuentemente contiene sedimentos retrabajados. Los depósitos se encuentran

dispuestos en capas de arena y limo con poco o ninguna bioturbación sugiriendo que el paisaje tuvo poca vegetación. Su edad va del 1,010 al 400 años AP (Fig. 7).

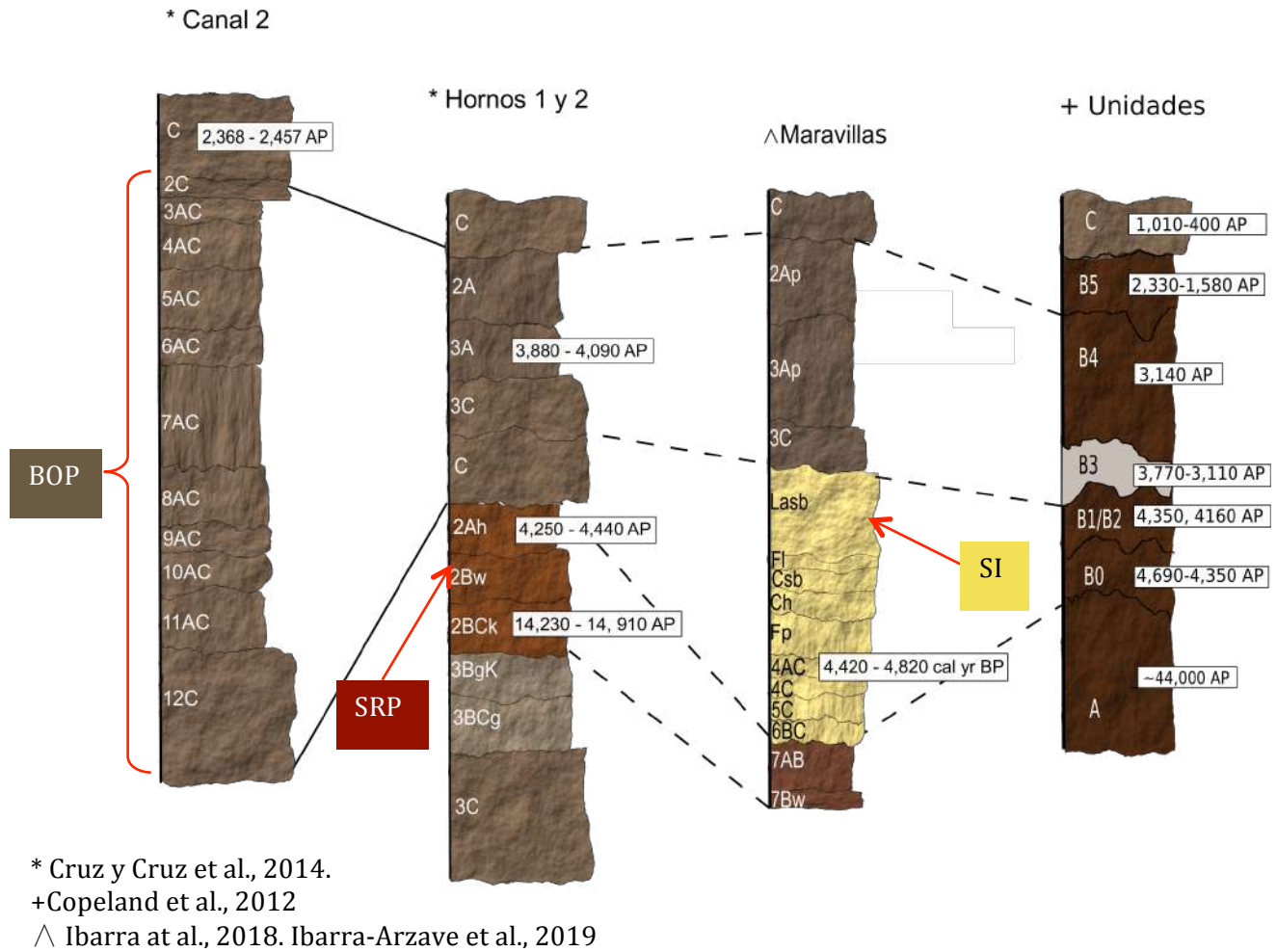


Fig. 7. Correlación estratigráfica de los perfiles Canal 2 y Hornos 1, el perfil Maravillas y el esquema sedimentario.

De otra parte, Schott (2017) plantea, desde el punto de vista geomorfológico, que el sitio de La Playa corresponde a una llanura de inundación más que a un abanico aluvial. De hecho, la autora expresa que a pesar de la forma semicónica y su ubicación en el frente de la montaña de la Sierra Boquillas, éste no presenta el típico sistema de canales distributivos (formado tras abandonar la zona de montaña) y la disposición de los sedimentos de forma radial; sino que por el contrario, el sistema de canales presentes en la actualidad confluyen en el Río Boquillas aguas abajo. Por otra parte, la

escasa pendiente de la planicie y los sedimentos de grano fino que constituyen el abanico corresponden a depósitos de desbordamiento. Lo anterior, aunado a la escasa variación granulométrica observada en el sitio, le confirman a Schott (2017) que el sitio de La Playa corresponde a una llanura de inundación.

Según se explica, las llanuras de inundación se pueden formar tanto por acreción lateral, debido a la migración horizontal del canal, como por acreción vertical, a causa de depósitos de desbordamiento; cuando este último estilo sedimentario domina sobre el primero es a causa de la existencia de un canal relativamente estable, como es el caso del Río Boquillas durante gran parte del Holoceno. El resultado de este modo de acreción vertical se aprecia en los múltiples episodios de deposición con intervalos de moderada estabilidad y carencia de materiales gruesos.

2.1.2 Morfología del abanico aluvial

A partir de imágenes satelitales, Ayala (2018) establece que el sitio de La Playa forma parte de un sistema de bajada localizado en el piedemonte suroeste de la Sierra Boquillas, se caracteriza por una planicie descendiente con una suave pendiente. El origen de dicha pendiente se debe a los sedimentos transportados por el mismo río y cuya deposición en forma radial ha configurado una forma semicónica vista desde planta (Ayala, 2018; Ibarra et al, 2018).

Dentro de esta geoforma, Ayala (2018) delimita unidades morfológicas que, aunque pertenecen a la misma estructura, poseen rasgos particulares producto de ambientes de formación diferentes.

Las unidades propuestas por Ayala (2018) son las siguientes (Fig. 8):

- a) Protoabanico: Lóbulo ubicado en el sector norte del abanico, altitudinalmente se encuentra en una posición más baja que el resto de la superficie de la geoforma. Constituido por un material rojizo y fino, probablemente SRP redepositado, intercalado con capas de grava y cantos dispuestos de forma laminar. Debido a su

alto grado de disección se puede suponer que constituye la porción más antigua del abanico pleistocénico.

- b) Superficie SRP: Aflora principalmente en la porción media y distal del abanico, se compone del SRP, datado para el Pleistoceno. Debido a la acción de la erosión, el BOP y parte de los horizontes del SRP han sido removidos, dejando expuesto el horizonte Bw que tiene mayor estructura y resistencia. A diferencia del protoabanico el grado de disección es menor.
- c) Superficie BOP: planicie compuesta por sedimentos, principalmente limos y arenas bien clasificados, a menudo dispuestos en capas con estructura laminar. Se distribuye especialmente en la porción media proximal y oriental del abanico. Destaca la presencia de pedestales o montículos originados por el alto grado de erosión.
- d) Coluvión: Ubicado en el ápice del abanico, constituye la porción más alta y de mayor espesor de la geoforma, se compone de sedimentos gruesos.
- e) Canal de alimentación: el Río Boquilla es el actual suministrador de sedimentos, se ubica al norte del abanico, entre el protoabanico y las superficies de SRP y BOP. Tiene una dirección noreste-suroeste creando depósitos de arena y grava en sus márgenes laterales.
- f) 1^{er} y 2^o lóbulos activos: son depósitos localizados en la llanura de inundación del Río Magdalena, creados por cambios sucesivos en el punto de intersección en su desplazamiento hacia porciones cada vez más lejanas.
- g) Material retrabajado: Corresponde a un depósito alargado con frente cuasi radial ubicado al pie del abanico aluvial sobre la llanura de inundación, es una mezcla de paleosuelos y sedimentos provenientes del cuerpo del abanico.

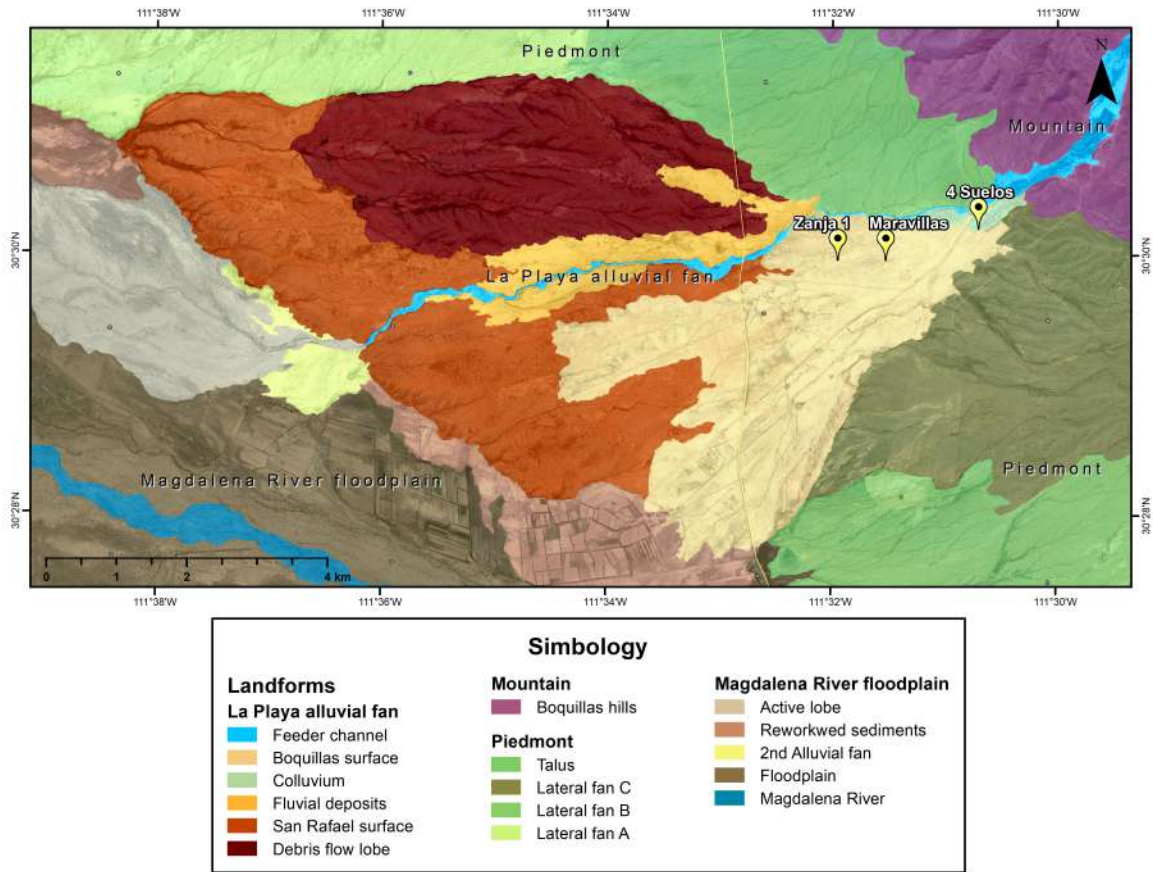


Fig. 8. Morfología del abanico aluvial (Ibarra et al., 2018)

2.2 El Gramal

El Gramal se localiza en los Llanos de Hermosillo, a 18 km de la costa actual del Mar de Cortés (Fig. 2). El sitio tiene múltiples componentes culturales como algunas concentraciones de artefactos con fogones, hornos y algunos petrograbados. Ésta región se encuentra flanqueada por la sierra de cerros basálticos y es parte de la Cuenca hidrológica del Río Sonora; el sitio se encuentra a una elevación de 25 msnm. Se encuentra dentro de la comunidad vegetal de cactus-mesquite-chamizal (Fig. 9) con las características únicas que incluye 5 diferentes especies de cactus columnar: Cardón (*Pachycereus pringlei*), Saguaro (*Carnegiea gigantea*), Senita (*Lophocereus schotti*), Pitaya (*Stenocercus thurberi*) y Sina (*Sina alamosensis*), junto con varias

especies de arbustos tolerantes al agua salada y suelos arenosos (Carpenter, et al., 2017).



Fig. 9. Visión general del sitio. Diferentes especies de cactus. Fotografía tomada por Ibarra-Arzave (2015)

Respecto a la historia deposicional del sitio, Carpenter et al. (2017) establecieron a partir de pozos, calas y barreno que el sitio tiene una historia basada en sedimentos eólicos, aluviales y paleosuelos con más de 7 m de historia deposicional. A partir de fechas por radiocarbono y luminiscencia óptica (OSL) se estableció que los suelos y sedimentos del sitio tienen un registro de más de 70,000 años (Fig. 10) (Carpenter, et al., 2017).

En la zona central del sitio hay una gran duna activa con dimensiones de varios kilómetros. Los restos arqueológicos revelan que todo el rango de ocupación humana está presente en el sitio; empezando con los cazadores Clovis con sus distintivas puntas lanceoladas (20 puntas han sido recolectadas del lugar), seguido por todo el

rango de ocupación de cazadores- recolectores arcaicos del Holoceno temprano y medio y posteriormente todo el rango de ocupación de los grupos recolectores y pescadores Seri hasta tiempos relativamente recientes (Fig. 10) (Gaines et al. 2009a, 2009b; Sanchez et al., 2008; Sanchez 2010).

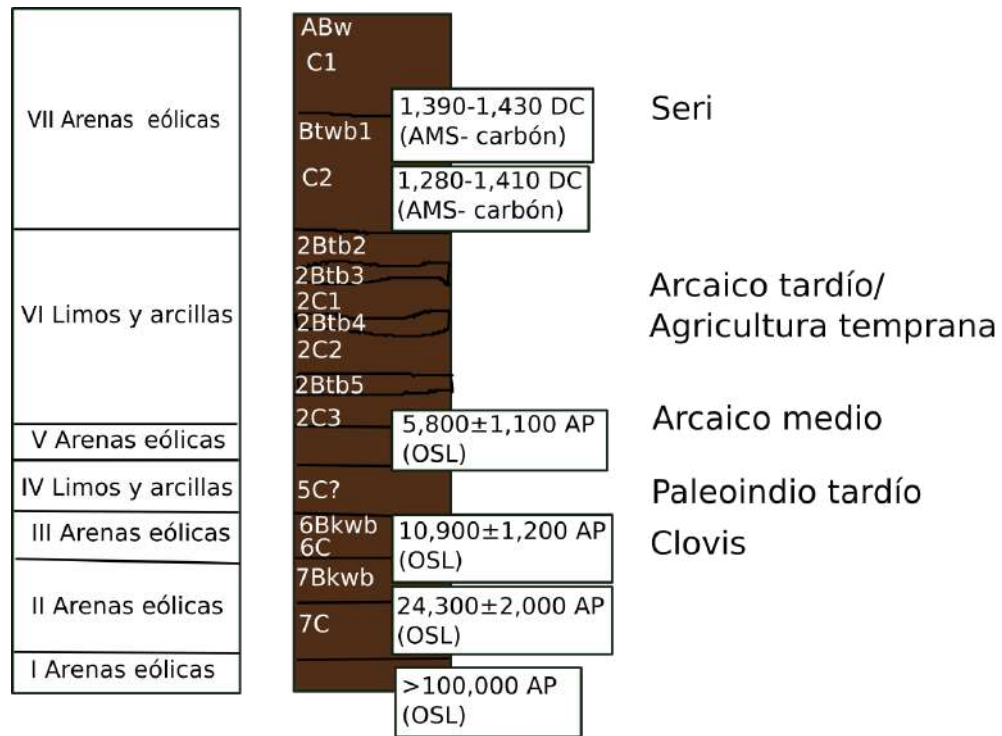


Fig 10. Estratigrafía generalizada propuesta para El Gramal. Modificado de Gaines et al., 2009b .

Con el fin de conocer los procesos deposicionales del sitio, Sánchez realizó un pozo en la base de la duna durante los trabajos arqueológicos del 2016. Excavaron 7 niveles métricos de 10 cm cada uno. Dentro del nivel 5, se registró el paleosuelo de color pardo rojizo. Dentro del nivel 6 se encontraron dos lascas, además de la presencia de carbonatos. Finalmente se registraron 4 horizontes.

A partir de la excavación se estableció la siguiente estratigrafía (de abajo hacia arriba) (Carpenter et al., 2017):

- *Big Red*: Corresponde al horizonte más antiguo, datado para el Pleistoceno. Se refiere a un depósito de color pardo rojizo, muy húmedo, de textura areno-arcillosa con concreciones de carbonatos en la base del horizonte. A los 103 cm se recolectaron dos lascas.
- El segundo horizonte corresponde a un sedimento compacto de arenas, de color pardo rojizo. Registró una cerámica tiburón delgada chambona, y concha.
- El tercer horizonte se conforma por arena poco compacta de color pardo oscuro, con abundante presencia de materiales arqueológicos (lascas, huesos, cerámica, concha, semillas carbonizadas y carbón).
- El primer horizonte muestra una textura arenosa, friable, que seguramente se depositó hace algunos años y es parte de los procesos eólicos actuales.

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

La estrategia utilizada en esta investigación comprendió las siguientes etapas metodológicas.

3.1 Trabajo de campo

3.1.1 Reconocimiento preliminar del área de estudio

Para la selección del perfil y toma de muestras se realizó un recorrido dentro de los sitios arqueológicos de La Playa y El Gramal; a partir de lo anterior, se decidió trabajar con cuatro perfiles: Maravillas (Mv), Zanja (Zj) y Cuatro Suelos (4S) localizados en La Playa; mientras que Gramal (Gr) se localizó en el sitio del mismo nombre (Fig. 2). Los perfiles anteriormente mencionados fueron seleccionados por las siguientes características:

- * Maravillas: corresponde a la secuencia más completa, con el registro del SRP en el fondo del perfil, el Intervalo Sedimentario en la parte media y BOP en la parte superior.
- * Zanja: este corte muestra una particularidad del SRP, además de conservar dos horizontes orgánicos antes no registrados.
- * Cuatro Suelos: muestra con detalle el desarrollo holocénico.
- * Gramal: perfil localizado cerca de la costa en donde también se localiza el SRP, la extensión de dicha superficie corrobora su continuidad y estabilidad. Sin embargo, a diferencia de lo registrado en el perfil Maravillas, el Gramal va a mostrar otro tipo de sedimentación.

3.1.2 Descripción general de las áreas de estudio

3.1.2.1 La Playa

Perfil Maravillas

El perfil Maravillas ($30^{\circ} 29' 57.44''$ N, $111^{\circ} 31' 30.41''$ W) está localizado en la parte central del abanico dentro de una cárcava. Dicho perfil tiene 3.66 m de longitud y muestra la secuencia más completa hasta ahora estudiada dentro del sitio, ya que está representada por las tres unidades pedoestratigráficas: el SRP en la base; seguido por un grueso intervalo sedimentario (SI – por sus siglas en inglés); y coronada por el BOP. Este último paleosuelo está fuertemente afectado por procesos antropogénicos (Copeland et al., 2012; Schott, 2017) (Fig. 11, Tabla 2).

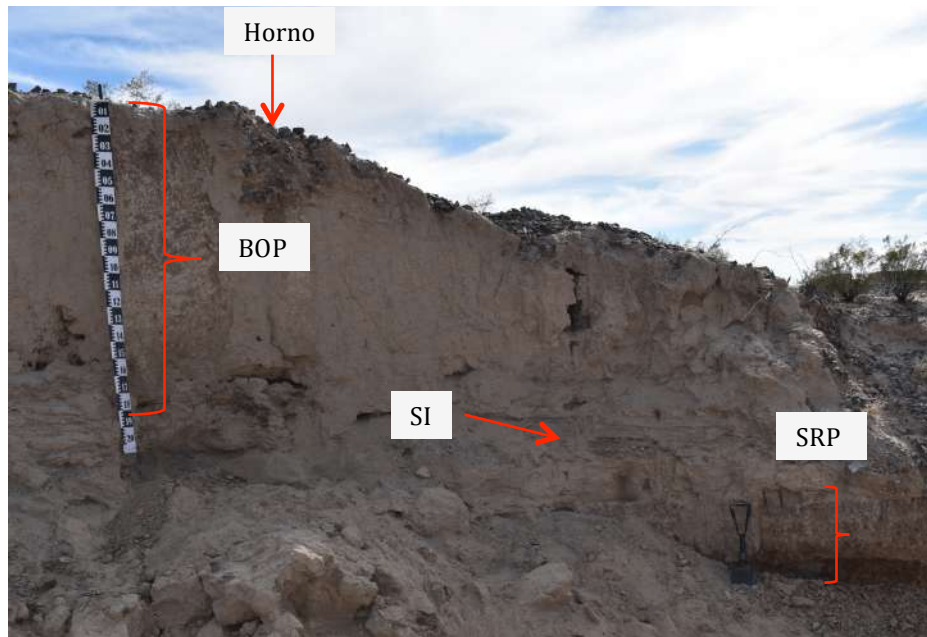


Fig. 11. Perfil Maravillas

Perfil Zanja

El perfil Zanja ($30^{\circ} 29' 57.40''$ N, $111^{\circ} 31' 55.89''$ W) corresponde al desarrollo más completo del SRP, ya que incluye los horizontes orgánicos de esta secuencia. Tiene una profundidad de 1.10 m y se localiza entre varios pedestales de suelo, los cuales muestran diferente grado de erosión. Debido a la erosión ya mencionada, se observa

en algunos perfiles la presencia del horizonte Bw, mientras que en otros únicamente se registra el horizonte Bk localizado de forma subyacente al Bw (Fig. 12 y Tabla 2).



Fig. 12. Localización del Perfil Zanja

Perfil Cuatro Suelos

El perfil Cuatro Suelos ($30^{\circ} 30' 9.02''$ N, $111^{\circ} 30' 45.42''$ W) está situado al noreste del abanico aluvial, cerca del ápice, y corresponde a un corte de 2 m de profundidad (Figs. 2 y 13; Tabla 2). Dicho corte corresponde al desarrollo más completo del BOP, en donde es posible diferenciar pequeñas fluctuaciones climáticas dentro del Holoceno tardío



Fig. 13. Vista panorámica del perfil Cuatro Suelos

3.1.2.2 El Gramal

Perfil Gramal

Asentamiento localizado en los Llanos de Hermosillo, a unos 40 km de la ciudad de Hermosillo y a 18 km de la costa actual del Mar de Cortés. El sitio consta de una concentración densa de artefactos distribuidos a lo largo de 10 km² y se extienden al norte y oeste por varios kilómetros dentro de campos de dunas (Carpenter et al., 2015).

El perfil se localiza (28° 29' 16.1" N, 111° 20' 08.4" W) al suroeste del sitio, y corresponde a un corte de 40 cm de profundidad. Este desarrollo se relaciona al SRP, presenta pequeñas rizoconcreciones entre el paleosuelo y la duna (Fig. 14 y Tabla 2).

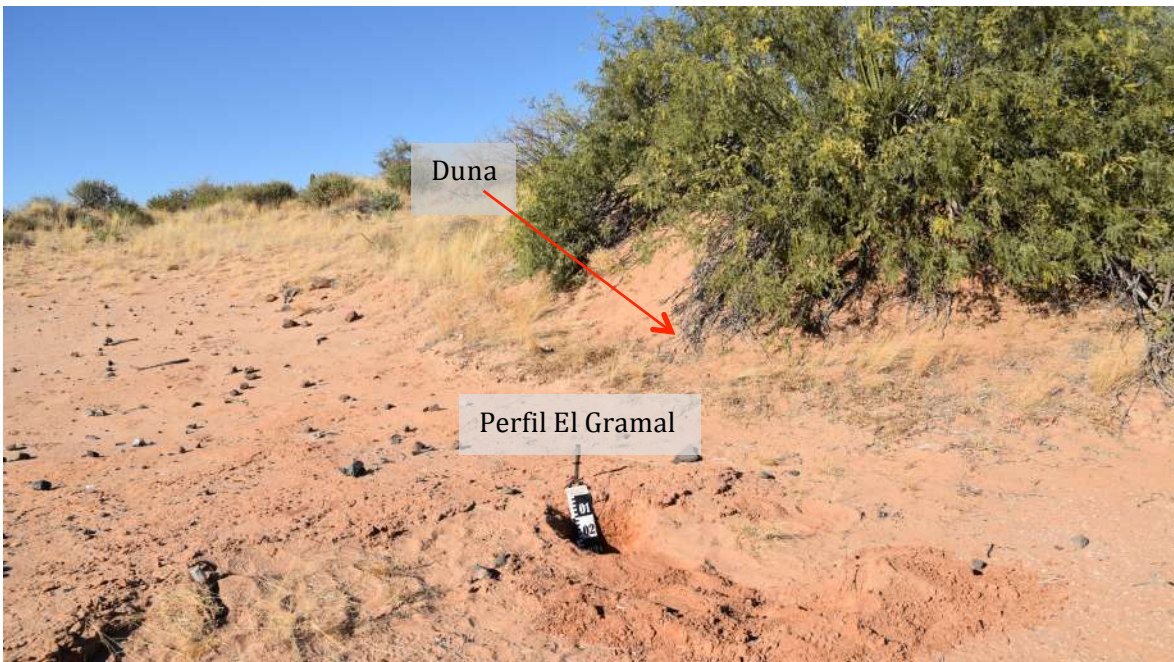


Figura 14. Perfil El Gramal, Duna y rizoconcreciones en superficie.

Tabla. 2. Identificación de las unidades BOP, Intervalo sedimentario (SI) y SRP dentro de los diferentes sitios trabajados.

Sitio	Coordenadas geográficas	Altitud (msnm)	Perfil	Horizontes
La Playa	30°29'58" N 111°31'44.6" W	515	Maravillas	C, 2Ap, 3Ap, 3C, Intervalo sedimentario, 4AC, 4C, 5C, 6BC, 7AB, 7Bw
			Zanja	C, 2A1, 2A2, 2Bw1, 2Bw2, 2BCK
			Cuatro Suelos	C, 2Ah, 2C1, 2C2, 2C3, 3Ah, 3C, 4Ah, 4C1, 4C2, 5Ah, 5C, 6Ah, 6C
El Gramal	28°30'22.65" N 111°18'20.53" W	28	Gramal	Bt, C, 2Bw, 2Bw2, 2Bk, 2BCK



BOP



Intervalo Sedimentario



SRP

3.1.3 Caracterización pedomorfológica y clasificación

La descripción detallada en campo de las características morfológicas de cada uno de los perfiles se realizó con base en los criterios de la WRB (2006) y los propuestos por Retallack (1990). La clasificación se realizó a nivel de campo, para lo cual se hizo referencia a la World Reference for Soil Resources (WRB, 2006); en el caso de los paleosuelos su clasificación fue sólo aproximada.

3.1.4 Muestreo de los paleosuelos y preparación de las muestras para su análisis

Se utilizaron los criterios establecidos por la WRB (2006) y Retallack (1990). Las muestras obtenidas de los paleosuelos fueron seleccionadas en tres categorías:

- a) Análisis generales: se colectó aproximadamente 1 kg de muestra de cada horizonte, para posteriormente determinar sus propiedades físicas y mineralógicas.
- b) Fechamiento por radiocarbono mediante espectometría de aceleración de masas (AMS) a partir de la materia orgánica y los carbonatos. Toma de muestra del horizonte húmico; además, de concreciones de carbonatos. Este muestreo se realizó en perfiles selectos.
- c) Muestras para análisis micromorfológico. Se obtuvieron bloques inalterados de suelo, orientados de acuerdo a su posición en el perfil, posteriormente fueron protegidos con papel aluminio para evitar su disgregación y colocados en cajas protegiéndolos de movimientos bruscos durante su traslado.

3.2 Propiedades micromorfológicas

El bloque colectado en campo fue secado a temperatura ambiente, posteriormente se impregnó con resina poliéster con índice de refracción de 1.65, al vacío, con una presión de 22 atmosferas durante 1 hr 40 min, tiempo calculado para la impregnación completa del suelo, con el fin de conservar su estructura original (Bullock et al., 1985).

El endurecimiento de la muestra tiene una duración de dos semanas a temperatura ambiente; una vez en estado sólido se realizó el corte de secciones con una sierra circular de diamante, los cuales se adhirieron a un portaobjetos. Posteriormente, fueron desbastados y pulidos (en una pulidora Puehler Metacer 2000 y con una secuencia de lijas 80, 120, 400) hasta alcanzar los 40 – 50 μm , después se bruñeron manualmente (con abrasivos de alúmina del 600 y 1000); y finalmente, se les colocó un cubreobjetos para su protección.

Las secciones delgadas se observaron con un microscopio petrográfico Olympus América BX50, utilizando luz transmitida (LN), luz reflejada (LR) y nicols cruzados (NX), para identificar y describir los siguientes rasgos, de acuerdo a los criterios de la WRB.

- a) Tipo de matriz
- b) Rasgos pedogenéticos:
 - Materia orgánica fresca y/o degradada
 - Materia orgánica humificada
 - Cutanes de arcilla, Fe, y/o Mn
 - Manchas, nódulos y/o concreciones de Fe y Mn
 - Carbonatos primarios y secundarios
 - Intemperismo (figuras de ataque en minerales, lixiviación, entre otros)

3.3 Análisis en laboratorio

Las muestras colectadas en campo fueron analizadas en el Instituto de Geología de la UNAM.

Antes de proceder con cualquier tipo de análisis, todas las muestras se introdujeron en una estufa BINDER a 60 °C para eliminar la humedad, posteriormente, el suelo fue disgregado con un pistilo de acero y tamizado en malla #10 para recuperar solo la fracción granulométrica menor a 2 mm.

Los análisis realizados fueron los siguientes:

3.3.1 Análisis físicos

3.3.1.1. Color

El color del suelo responde a su composición y a las condiciones óxido-reducción del suelo presentes y/o pasadas. Un color oscuro se atribuye a la presencia de materia orgánica humificada; colores amarillos, pardos, anaranjados y rojos se relacionan con la presencia de óxidos de hierro; mientras que el color negro puede referirse a la

presencia de óxidos de manganeso; el color también puede estar influenciado por el material parental (FAO-UNESCO, 2009).

Para la cuantificación de este parámetro se utilizó un espectrofotómetro modelo sph860/sph900, marca Colorlite. Una vez calibrado el equipo con un estándar, se procedió a medir el color de cada muestra (y su respectivo duplicado) colocándose dentro de un contenedor de vidrio, tratando siempre que el fondo del mismo estuviera totalmente cubierto por partículas de suelo para evitar el paso de luz y, con ello, una distorsión del color.

Para fines de este estudio, se consideran tanto la luminosidad (L) como las coordenadas rojo al verde (a^*) y amarillo al azul (b^*).

3.3.1.2 Cuantificación de las fracciones granulométricas (arena, limo y arcilla)

Posterior al sepultamiento de un suelo, el porcentaje, distribución y composición de las diferentes fracciones texturales son características que se conservan (Retallack, 1990). La cuantificación y distribución de partículas según su tamaño permite determinar o inferir otros rasgos, propiedades y/o procesos tales como: a) grado y tipo de horizontalización del perfil; b) discontinuidades texturales ocasionadas por eventos de erosión-depositación o por diferentes ciclos pedogenéticos; c) grado de intemperismo y desarrollo relativo del perfil; d) índices de iluviación de arcillas (Fanning y Fanning, 1989; Birkeland, 1990).

De acuerdo a la FAO (2009), la textura del suelo es la proporción relativa de las clases granulométricas (arena, limo y arcilla) en un volumen de suelo dado.

Así entonces, para este análisis se utilizaron 15 g de muestra la cual fue colocada en frascos de plástico con 10 ml del dispersante Hexametafosfato de Sodio ($(\text{NaPO}_3)_6$) y 50 ml de agua destilada. Posteriormente, se colocó en un agitador orbital Gallenkamp a aproximadamente 120 RPM durante 24 hrs. Después se procedió a la separación y recuperación de arenas lavando y filtrando la muestra a través de un tamiz malla #60

(0.250 cm), las arenas fueron colocadas en una cápsula de porcelana y secadas a 105 °C durante 24 hrs, para posteriormente ser pesadas.

Las fracciones limo y arcilla se colocaron en probetas que se aforaron a un litro con agua destilada, se agitaron vigorosamente durante un minuto y, considerando la Ley de Stocks, se permitió la sedimentación del limo. Después, con la ayuda de una pipeta, se tomó de cada probeta una alícuota de 2.5 mm de la muestra en suspensión (arcillas) para colocarse dentro de charolas de aluminio previamente calentadas a 105 °C y taradas, se sometieron a su secado a 105 °C durante 24 hrs y finalmente se pesaron en una balanza analítica METTLER TOLEDO PB153-S/FACT. El peso de la fracción limo se obtuvo mediante la diferencia del peso total de la muestra menos la suma del peso de la fracción arena y el de la fracción arcilla. Finalmente, se hizo el cálculo porcentual de las diferentes fracciones.

3.3.1.3 Parámetros magnéticos

Los parámetros medidos fueron la susceptibilidad magnética (k) a alta frecuencia (X_{hf}) y baja frecuencia (X_{lf}) así como la susceptibilidad dependiente de frecuencia (X_{fd}). La k ($\mu\text{m}^3/\text{kg}$) es la relación entre la magnetización por unidad de volumen (M) adquirida por un cuerpo en presencia de un campo magnético externo (H); X_{fd} es la diferencia porcentual entre X_{hf} y X_{lf} (Barceinas, 2015).

La X_{lf} es útil para determinar la concentración relativa de minerales ferrimagnéticos (óxidos, sulfuros, oxi-hidróxidos de Fe, etc.) y X_{fd} es un buen indicador de la presencia de partículas finas o superparamagnéticas (SP: diámetro $<0.01 \mu\text{m}$), asociadas a procesos diagenéticos (sedimentos) o pedogenéticos (suelos). De acuerdo a Evans y Heller (2003), las partículas SP son atribuidas a la actividad biológica de algunas bacterias que metabolizan los minerales de hierro, convirtiéndolos en partículas finas y ultra finas de magnetita. Por lo anterior, este análisis se llevó a cabo para determinar presencia de minerales de hierro.

Cada muestra se colocó a compactación dentro de un cubo de acrílico de 8 cm³ y para medir k_{hf} y k_{lf} se utilizó un susceptibilímetro modelo MS2 marca Bartington y un sensor dual MS2B, el resultado obtenido se dividió entre la masa total de la muestra. Para calcular la susceptibilidad dependiente de frecuencia (X_{fd}) se utilizó la siguiente la fórmula: $X_{fd} = (1 - X_{hf} / X_{lf}) * 100$.

3.4 Otros registros (Espectroscopia infraroja con transformada de Fourier/ reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR); y contenido de Polen)

Dentro de este apartado se describen dos tipos de análisis. El primero de ellos, corresponde a la Espectroscopia infraroja con transformada de Fourier/reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR) realizada en los tres perfiles: Maravillas, Zanja y Cuatro Suelos. Dicho estudio estuvo a cargo del Dr. Bruno Chávez Vergara del Depto. de Ciencias Ambientales y del Suelo del Instituto de Geología de la UNAM. Este registro funcionó como análisis complementario para conocer el tipo de materia orgánica (mo) y su relación con los procesos de fuego.

El segundo análisis corresponde al contenido de polen, el cual se llevo a cabo para el perfil Cuatro Suelos. Dicho estudio lo realizaron la Dr. Carmen Ortega Rosas y la Lic. Thanairi Gamez de la UES, Sonora; el objetivo de éste registro fue caracterizar la paleovegetación dentro del registro holocénico.

3.4.1 Espectroscopia infraroja con transformada de Fourier/ reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR)

El espectro FT-IR/ATR, de las muestras tratadas y no tratadas, se obtuvieron de acuerdo con las condiciones descritas por Mastrodonato *et al* (2014). El registro del espectro FTIR-ATR se realizó usando un FT-IR Nicolet iS 50 (Thermo-Corporation) interferómetro equipado con un accesorio de reflectancia total atenuado (ATR)

(GladiATR, Pike Technologies). El espectro de las muestras se realizó con 100 escaneos a una resolución de 4 cm^{-1} en el rango $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$.

Para una mejor caracterización del espectro SOM (por sus siglas en inglés Soil Organic Matter), se obtuvo la segunda derivada del espectro IR en la región $1850\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$, suavizada con la función Savitzky–Golay, se utilizó para definir algunos parámetros de inicio para el análisis de ajuste de curva, como el número y posición de los componentes máximos, el uso de esta región fue para minimizar la interferencia en las señales por fase mineral de la muestra (Mastrolonardo et al., 2014).

El ajuste se realizó en el espectro original por el software OMNIC 9,1 (Thermo Scientific Inc.) después de la corrección de línea base por el algoritmo Levenberg-Marquardt. El proceso de deconvolución del espectro se ajustó utilizando las formas máximas de distribución gaussiana pura y su significación se verificó con la prueba de bondad de ajuste de Chi-cuadrada ($< 0,001$), el proceso de deconvolución se hizo con el software Origin 8,0. Los componentes de la banda IR fueron descritos como funciones Gaussianas puras (Mastrolonardo et al., 2014).

3.4.2 Contenido de Polen

El procedimiento para la extracción de polen sólo se aplicó al perfil Cuatro Suelos y se basó en Faegri e Iversen (1989) adaptado a muestras arqueológicas (Ortega-Rosas et al., 2017). De cada nivel se tomaron 40 g de sedimento. Se agregó HCl (diluido al 10%) y se dejó la solución durante 20 minutos. Se aplicó agua destilada para detener la reacción. Después de 24 hr, la muestra fue enjuagada, y se añadió HF y se dejó por un día. Después la muestra fue lavada hasta quedar libre de ácido. Finalmente, se empleó un tratamiento con KOH (10%) en un baño de agua. Adicionalmente, en algunas muestras, se aplicó un método de flotación (separación por líquidos pesados) con ZnCl_2 . El residuo final del tratamiento químico se almacenó en glicerina. El análisis de polen se realizó con un microscopio óptico a 40X y 100X. Se contaron de 100 a 300 granos por muestra.

La identificación del polen fue apoyada con muestras del polen de la región (Ortega-Rosas et al., 2008), y con varios Atlas de polen (Heusser, 1971; Willard et al., 2004); además de un Atlas de polen digital disponible en línea (p. ej., Atlas de polen de la Universidad de Arizona, polen de Australasia y Atlas de esporas).

Para la obtención del diagrama de polen, se hizo el conteo de polen y esporas con el software Tilia 2.0.4. El conteo final de polen se expresó en porcentaje. Las zonas de polen se dividieron utilizando un análisis de conglomerados con CONISS (Grimm, 2004).

3.5 Fechamientos por radiocarbono

Se fecharon seis muestras de materia orgánica y dos de carbonatos procedentes de cuatro perfiles: Maravillas, Zanja, Cuatro Suelos y Gramal. Del perfil Maravillas se seleccionó una muestra de materia orgánica procedente del horizonte 4AC; del perfil Zanja se trabajaron dos muestras derivadas de los horizontes 2A y 2Bck, la primera referente a materia orgánica y la segunda a carbonatos. En el perfil Cuatro Suelos se extrajeron cuatro muestras de materia orgánica procedentes de los horizontes 3Ah, 4Ah, 5Ah y 6Ah.

Finalmente, de el perfil Gramal se extrajeron algunas concreciones de carbonato procedentes del horizonte 2Bk .

Debido a la composición de las muestras, la técnica de datación empleada fue por radiocarbono mediante espectrometría de aceleración de masas (AMS por sus siglas en inglés) la cual se basa en el contenido directo de la concentración de ^{14}C en una muestra. Los fechamientos se realizaron en el laboratorio *International Chemical Analysis Inc.*, de Miami, Florida. E.U. Todas las fechas fueron calibradas a 2 sigmas según el INTCAL 13: IntCal13 y Marine13 Curvas de calibración de la edad del radiocarbono 0–50,000 años cal AP (Reimer et al., 2013; Tabla 4).

Capítulo 4. RESULTADOS

Para cada uno de los perfiles de suelo estudiados, los resultados se organizaron de la siguiente forma: a) descripción morfológica de las observaciones realizadas en trabajo de campo, b) propiedades micromorfológicas, c) análisis físicos (determinación de color, fracciones granulométricas y parámetros magnéticos y d) fechamientos.

4.1. Perfil Maravillas

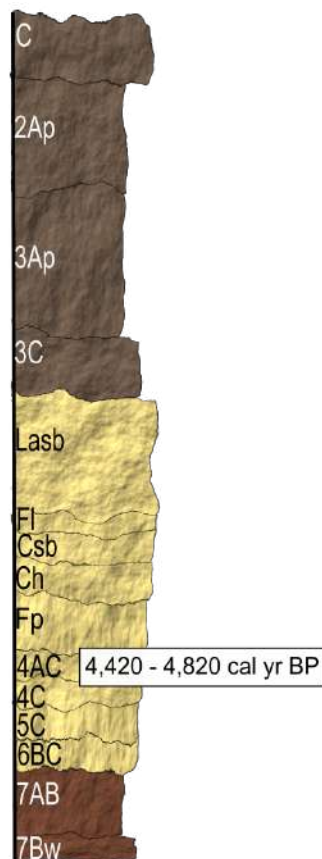
Este perfil se conforma por tres paleosuperficies, las cuales se distinguen entre sí por presentar diferentes grados de desarrollo pedogenético, producto de la dinámica del abanico aluvial registrada a finales del Pleistoceno. Así entonces, se registra el Paleosuelo San Rafael (SRP) correspondiente a la superficie más antigua (Cruz y Cruz, et al., 2014); posteriormente, se encuentra un intervalo sedimentario (SI) y finalmente el paleosuelo más joven, llamado Boquillas (BOP) (Ibarra et al, 2018).

Este perfil muestra la secuencia más completa con los siguientes horizontes (de arriba hacia abajo): C (pedosedimento), 2Ap, 3Ap, 3C, (horizontes que constituyen el BOP); intervalo sedimentario (barras de arena de acreción laterales (Lasb), facies de planicie de inundación (Fl), barras centrales de arena (Csb), facies de canal (Ch), facies de planicie de inundación (Fp), y los horizontes 4AC, 4C, 5C, y 6BC; finalmente, en la base se identificaron los horizontes 7AB, 7Bw correspondientes al SRP (Ibarra et al., 2018).

Los horizontes orgánicos del BOP muestran colores grisáceos asociados a una mayor cantidad de materia orgánica, y se caracteriza por un material friable de poco desarrollo que está fuertemente afectado por la actividad humana (Copeland et al., 2012; Cruz y Cruz et al., 2014; y Schott, 2017). En contraste, el SI muestra colores de tipo pardo claro; mientras, que SRP muestra colores pardo rojizos y constituye un paleosuelo con un buen desarrollo.

La descripción de campo se presenta en la Fig. 15.

4.1.1. Descripción morfológica en campo



Horizonte	Espesor (cm)	Descripción
C	0-24	Pardo claro, poca estructura, bloques subangulares que rompen a granulares, restos de horno (acumulación de rocas de la formación Morita).
2Ap	24-70	Pardo rojizo claro, raíces finas, poros vesiculares pequeños y tubulares medianos, bioturbación, abundante presencia de carbonatos relleno los poros, pequeños fragmentos de roca redondeados, límite inferior gradual, cambio muy homogéneo
3Ap	70-110	Ligeramente más oscuro que el horizonte superior, más duro, friable, poros biogénicos, bloques angulares, fragmentos de carbón
3C	110-130	Textura arenosa
Barras centrales	130 - 243	Barra de caballo y flujos muy leves
Planicie inundación	243 - 246	Material limoso
Barra de arena centrales	246 - 258	Arena fina
Facies de canal	258 - 273	Gravas
Facies inundación	273 - 299	Material acumulado por procesos eólicos
4AC	299 - 306	Pardo claro con raíces finas y carbonatos en los poros de las mismas, estructura granular.
4C	306 - 310	Pardo claro, limoso, presencia de carbonatos dentro de los poros de las raíces. Pocos y pequeños poros. Conserva la orientación de las laminaciones.

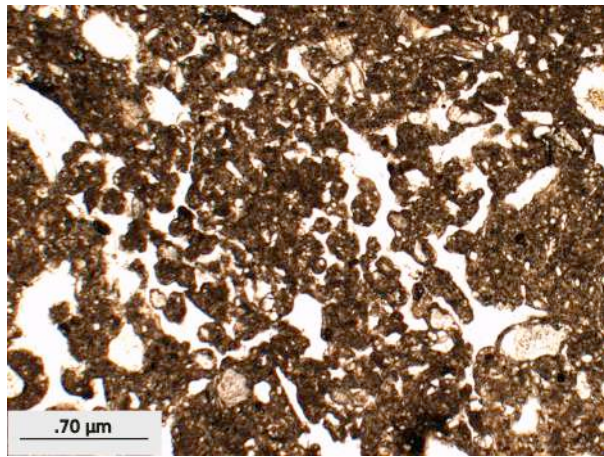
Fig. 15. Perfil Maravillas (Ibarra-Arzave et al., 2019)

5C	310 - 320	Pardo rojizo oscuro, estructura en bloques angulares que rompe en bloques subangulares, muestra pequeñas costras de desecación. Presencia de raíces finas. Material limoso. Presencia de carbonatos en los poros.
6BC	320 - 335	Pardo rojizo, estructura en bloques angulares que rompe en bloques subangulares. Pocos y pequeños poros. Textura arenosa. Presencia de carbonatos en forma de pequeñas concreciones y dentro de los poros.
7AB	335 - 340	Rojizo claro, estructura en bloques subangulares, textura franco arenosa.
7Bw	340 - 366	Coloración rojiza, estructura en bloques angulares que rompe en bloques medianos angulares, pequeñas concreciones de carbonato, pocos y pequeños poros, pequeños manchones de manganeso, mayor compactación. Textura arenosa. Pequeñas concreciones de carbonatos.

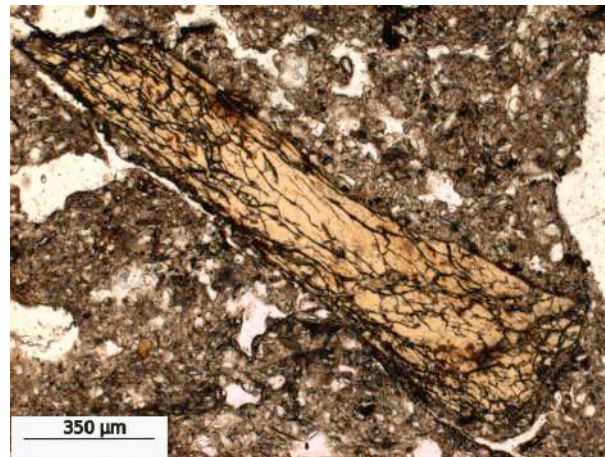
4.1.2. Propiedades micromorfológicas

Para el análisis micromorfológico se tomaron en cuenta los rasgos que distinguen a los tres desarrollos pedogenéticos.

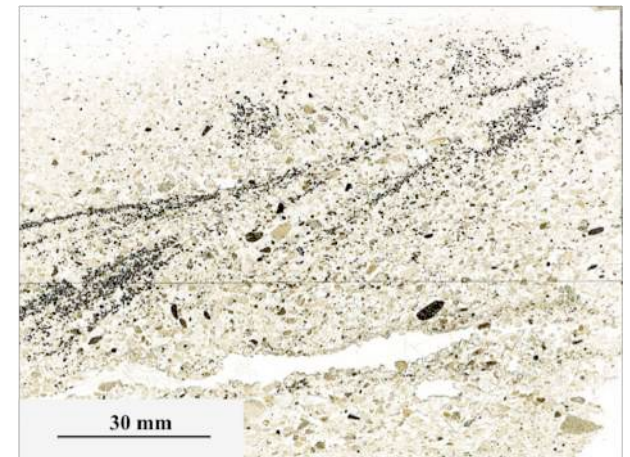
1. El desarrollo BOP en términos generales muestra una matriz compuesta de material pobremente clasificado, predominantemente limoso, con presencia de partículas arenosas subangulares y angulares de estructura granular. Los minerales dominantes son el cuarzo y las plagioclasas. Existen microáreas enriquecidas con pigmentos orgánicos y material carbonizado en la matriz, en algunos casos aún preservan su estructura vegetal. También se observan agregados de arcilla y fragmentos de costras de suelo procedentes de otras superficies. Presencia de carbonatos secundarios en poros y pocos nódulos de Fe y Mn en la matriz (Fig. 16).
2. El SI se conforma por varios tipos de facies, en donde, la barra de arena muestra presencia de magnetita con un grado de redondez bajo. Se observa laminación cruzada típica de las corrientes trenzadas. La planicie de inundación se determina por un sedimento fino y con presencia de finas laminaciones. En algunas facies se observó una incipiente pedogénesis caracterizada por la presencia de poros biogénicos, presencia de coprolitos y concreciones de Fe evidenciando periodos de estabilidad (Fig. 16).
3. El SRP muestra la mayor cantidad de rasgos pedogenéticos. El horizonte 6BC muestra una estructura granular con presencia de canales y poros biogénicos y algunos cutanes sucios. El horizonte 7Bw se caracteriza por tener una microestructura en bloques subangulares, se observan también recubrimientos delgados de arcilla iluviada alrededor de los granos de arena (Fig. 16).



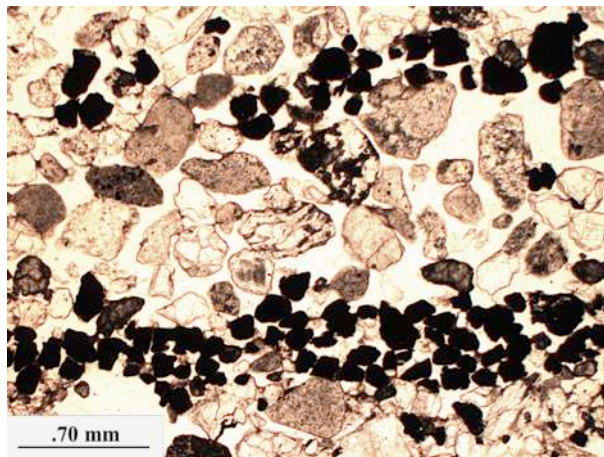
a)



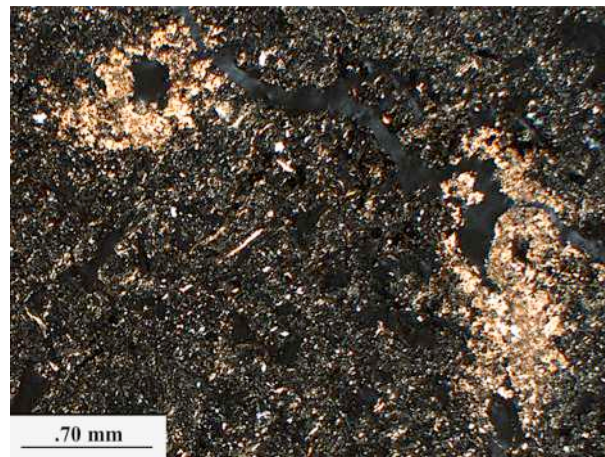
b)



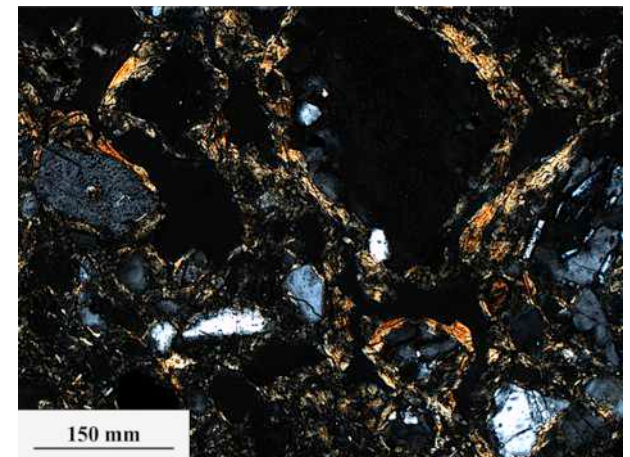
c)



d)



e)



f)

Fig 16. Micromorfología del perfil Maravillas. a) Horizonte 2Ap. Estructura granular (LP); b) Horizonte 2Ap. Fragmento de hueso (LP); c) SI- Barra de arena. Laminación cruzada tipo “cola de caballo”. Partículas orientadas (LP); d) SI. Microlaminación de minerales opacos (LP); e) Horizonte 4C. Cutanes heterogéneos y carbonatos secundarios (NX); f) Horizonte 7Bw. Iluviación de arcilla dentro de poros (NX) (Ibarra-Arzave et al., 2019).

4.1.3. Análisis físicos

4.1.3.1. Determinación del color del suelo

El perfil Maravillas muestra tres variaciones en el color, las cuales están relacionadas a las tres diferentes unidades (BOP, SI y SRP). Esta diferenciación es difícil de ver a simple vista, pero fácilmente cuantificada con el colorímetro. De acuerdo con los resultados (L^* , a^* y b^*), los horizontes 7AB y 7Bw de SRP corresponden a la unidad más oscura con valores en L^* inferiores a 35; estos horizontes muestran valores más altos en los vectores a^* y b^* , parámetros asociados a colores más rojizos y amarillentos (Fig. 17). Las facies y horizontes inferiores del SI (4AC, 4C) muestran valores más altos en L^* , superiores a 40, con colores menos rojizos y amarillentos con respecto al segmento anterior. El BOP y la parte superior del SI tienen colores más homogéneos (Fig. 17).

4.1.3.2. Fracciones granulométricas

Este perfil muestra diferentes e importantes variaciones granulométricas relacionadas a las tres paleosuperficies. En el caso del desarrollo de BOP, los horizontes superiores, 2Ap, 3Ap y 3C, muestran una distribución de tamaño de grano similar, ya que principalmente se conforman por limo (51–60 %) y arcilla (20–35 %). El contenido de arena varía entre 4.4 y 24.9 % alcanzando su máximo en el horizonte 3C (Fig. 17). Los horizontes localizados en la base de este corte correspondientes a la unidad SRP, 7AB y 7Bw, se comportaron de forma diferente, ya que fueron más arcillosos; sin embargo, también registraron un alto contenido de arena (35–38 %). El SI tiene un comportamiento diferente al desarrollo BOP y SRP y demuestra algunas diferencias respecto a su distribución en el tamaño de grano. En donde, las capas superiores (Lasb) principalmente se componen de arena (75.7–94.4 %) y limo (2.3–36.7 %). La facie de la planicie aluvial y los horizontes inferiores (4AC, 4C y 5C) son más limosos (63–37 %), en tanto que, el horizonte 6BC tiene una mayor cantidad de arena (52 %) (Fig. 17).

4.1.3.3. Parámetros magnéticos

Las mediciones de la susceptibilidad magnética de baja frecuencia (χ_{lf}) y la dependencia de frecuencia de la susceptibilidad magnética (χ_{fd}) presentan valores bajos a lo largo de este corte. Sin embargo, es posible observar diferencias entre los horizontes.

Respecto a la susceptibilidad magnética (χ), se observa un importante aumento en el pedosedimento (C) localizado en la parte superior del perfil con una baja en χ_{fd} . Los horizontes 2Ap, 3Ap, y 3C tienen valores similares y bajos en χ ; mientras que χ_{fd} también es más bajo, pero con un comportamiento más heterogéneo (Fig. 17).

Dentro del desarrollo SI, en la capa Lasb, se registra un aumento en la susceptibilidad magnética (χ), pero una disminución en χ_{fd} . En el horizonte 7AB, nuevamente se registra un pico en la susceptibilidad magnética (χ), la cual va a estar relacionada a valores altos en χ_{fd} , lo que evidencia una alta cantidad de partículas superparamagnéticas (SP) (Fig. 17).

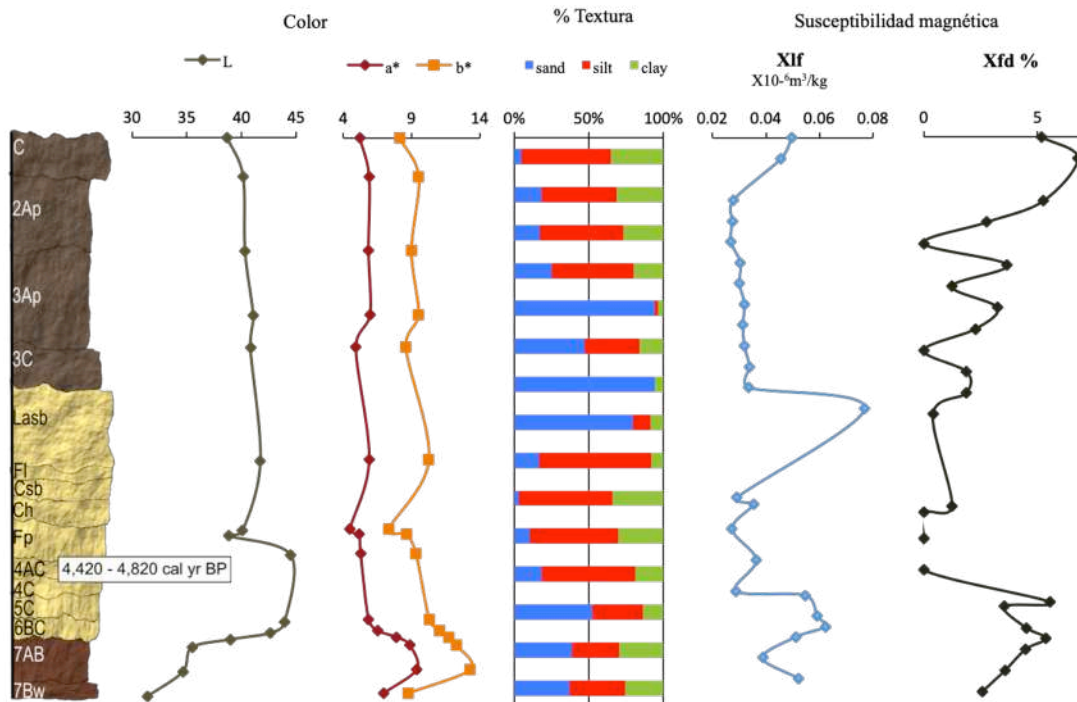


Fig. 17. Colorimetría. Lecturas en L^* , a^* y b^* ; distribución granulométrica; susceptibilidad magnética ($\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$) y dependencia de frecuencia de la susceptibilidad (χ_{fd}) (Ibarra-Arzave et al., 2019).

4.1.4. Otros registros

4.1.4.1. Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier / reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR)

El método de deconvolución permite visualizar claramente las diferencias en las bandas relacionadas con la composición química de la materia orgánica del suelo (SOM) que se interpretan como modificaciones por eventos de incendio. En el perfil Maravillas, el espectro FT-IR/ATR de todos los horizontes tiene bandas consistentes en 1432 cm^{-1} y 1637 cm^{-1} , estas bandas corresponden a los enlaces elásticos de C = O en carboxilos conjugados, quinonas, amida I y C-elásticos en carboxilatos, respectivamente. Las vibraciones de las estructuras aromáticas pueden contribuir a la banda alrededor de 1620 cm^{-1} con notables diferencias entre horizontes. El horizonte 2Ap muestra una forma trimodal con una señal intensa y prominente en 1352 cm^{-1} característico de los compuestos pirogénicos, que se puede explicar por una acumulación constante de productos pirogénicos ricos en N. Otra señal de banda se encuentra en 1568 cm^{-1} formando un segmento discontinuo en el espectro, que se asocia a NH_2 en aminas y del anillo de alquenos de C=C (Fig. 18a). El horizonte 3AP exhibe un agotamiento de compuestos orgánicos documentados por las señales débiles en el espectro, que tiene una forma bimodal por proceso de deconvolución, en 1588 cm^{-1} y en 1637 cm^{-1} ; el primero está relacionado con NH_2 en aminas, y el segundo al anillo elástico de alquenos C=C y/o C-C en compuestos aromáticos (Fig. 18b).

El horizonte 3C tiene un pico prominente en 1435 cm^{-1} que corresponde al enlace elástico de C=O en carboxilos conjugados, quinonas, y amida I. Esta señal fuerte sugiere que el horizonte 3C tiene materia orgánica lábil, probablemente con origen en un horizonte retrabajado de Ah que se deposita en el sedimento aluvial (Fig. 18c).

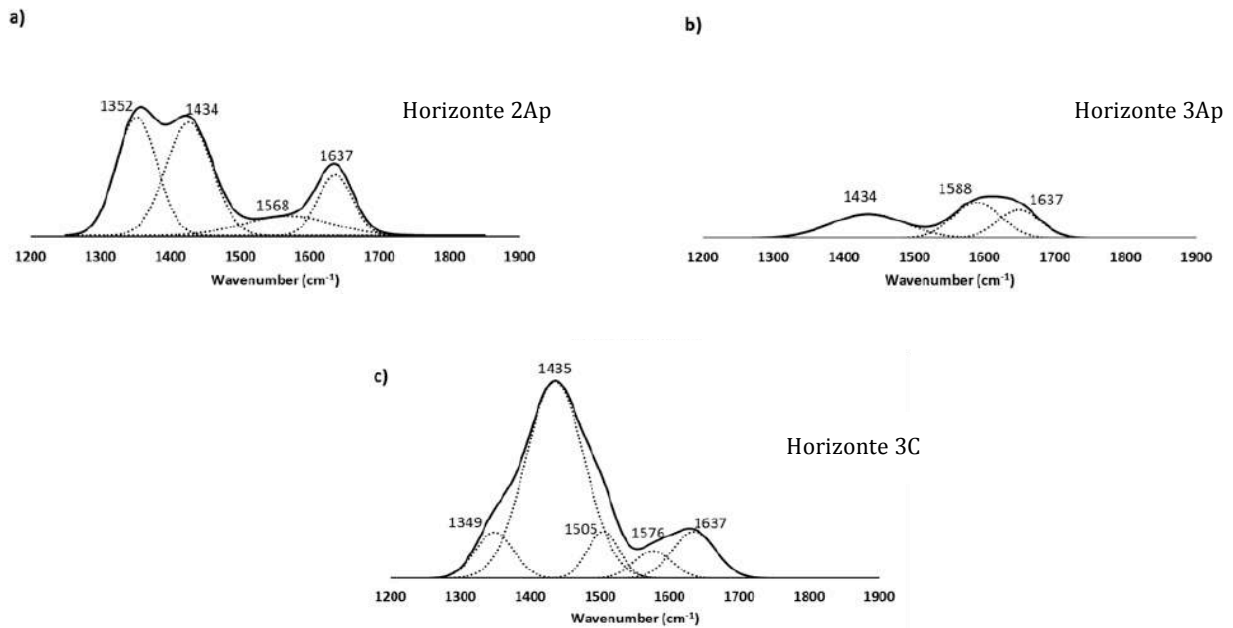


Fig. 18. Espectro FT-IR/ATR del perfil Maravillas. a) Horizonte 2Ap; b) Horizonte 3Ap; c) Horizonte 3C (Ibarra-Arzave et al., 2019).

4.1.4.2. Identificación de sedimentos

Dentro de la secuencia del Perfil Maravillas se registro un importante registro de material sedimentario localizado entre los paleosuelos BOP y SRP (Fig. 11 y 17). Dicha secuencia sedimentaria incluye varias tipos de facies distribuidas a lo largo del perfil, conformándose de la siguiente forma: barras de arena de acreción lateral (Lasb), facies de planicie de inundación (Fl), barras centrales de arena (Csb), facies de canal (Ch), facies de planicie de inundación (Fp); además de cuatro horizontes 4AC, 4C, 5C, y 6BC. A partir de la observación macro y micromorfológica se logró una descripción detallada de la secuencia logrando identificar lo siguiente:

- Facies de Lasb (130-173 cm): se caracteriza por ser arenosa y tener laminación cruzada, esto representa la acreción lateral de la barra de arena como resultado de un flujo de energía moderado.

- Facies Fl (173-176 cm): esta facie es limosa (>70 %) de laminación fina y pequeñas ondulaciones. Esta facie se interpreta como depósitos de inundación de baja energía.
- Facies de Csb (176-188 cm): esta facie se conforma por sedimentos arenosos de laminación cruzada, lo que forma barras centrales de arena, y representa un flujo de energía moderada.
- Facies de Ch (188-203 cm): esta facie se caracteriza por la presencia de gravas soportadas en una matriz arenosa de débil estratificación. En algunas partes se detecta una incipiente imbricación, esta facie representa altos flujos energéticos de un canal.
- Facies de Fp (203-218 cm): corresponde a un sedimento blanquecino, limoso de laminación fina. Dicha facie es el resultado de un flujo energético bajo.

En cuanto al comportamiento de los horizontes tenemos lo siguiente: el horizonte 4AC es de color pardo rojizo, limoso, con una estructura en bloques subangulares, en su matriz es posible reconocer la presencia de pequeños fragmentos de carbón y carbonatos. Los horizontes 4C y 5C son más ligeros y más limosos respecto a los horizontes anteriores, presentan laminación y material orientado; además, de carbonatos dentro de los poros de la raíz.

Las características más notables en el horizonte 5C es la presencia de recubrimientos de arcilla, y carbonatos. El horizonte 6BC es de color pardo rojizo pálido, arenoso con una estructura en bloques angulares que rompe en bloques sub-angulares.

4.2 Perfil Zanja

Este perfil representa el corte más completo del SRP, y está constituido por los siguientes horizontes 2A1, 2A2, 2Bw1, 2Bw2 y 2BCk. Su coloración es rojiza, con un tono más oscuro en los horizontes superiores debido a la acumulación de materia orgánica, mientras que en la parte inferior aparecen manchas blancas relacionadas a las concreciones de carbonato de calcio. En general la secuencia muestra una textura limo arenosa con algunas gravillas finas en los horizontes Bw, la estructura predominante es en bloques subangulares.

La descripción de campo se presenta en la Fig. 19

4.2.1 Descripción morfológica en campo

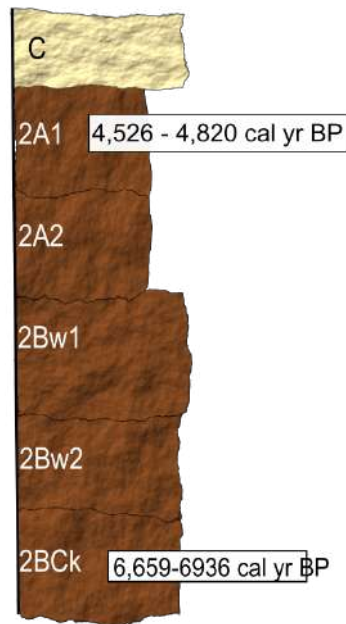


Fig. 19. Perfil Zanja (Ibarra-Arzave et al., 2019)

Horizonte	Espesor (cm)	Descripción
C	0-16	Redeposición de suelo rojo, estructura en bloques subangulares que rompe en bloques subangulares, material friable de poca compactación, presencia de raíces finas. Textura limosa.
2A1	16 – 20	Coloración oscura (aunque más clara que el horizonte superior), de estructura granular que rompe en bloques subangulares, poroso, presencia de raíces finas. Textura limo arenosa, poca edafización.
2A2	20 – 44	Coloración más oscura respecto al horizonte superior, estructura en bloques subangulares que rompe en bloques subangulares pequeños, presencia de pequeñas gravas, poros finos, de textura limo arenosa material con mayor compactación que el horizonte superior.
2Bw1	44 – 57	Estructura en bloques subangulares que rompe en bloques subangulares, fragmentos de pequeñas gravillas, poros finos, textura limo arenosa, matriz roja, compacto.
2Bw2	57 – 87	Estructura en bloques subangulares, matriz roja, poros finos, presencia de gravillas finas, compacto. Presencia de carbonatos vermiculares y pequeñas concreciones.
2Bck	87 – 110	Presencia de pequeñas concreciones y motas en la matriz de carbonatos, estructura en bloques subangulares, material compacto.

4.2.2 Propiedades micromorfológicas

El perfil Zanja registra la unidad SRP más completa, la cual incluye dos horizontes orgánicos, situación extraordinaria, debido al alto grado de erosión que se registra en el abanico aluvial de La Playa.

Referente a las propiedades micromorfológicas observadas, tenemos lo siguiente:

El horizonte 2A1 presenta una microestructura granular bien definida con pigmentación húmica y alta porosidad. Se observa la presencia de canales de relleno creciente asociados a los carbonatos pedogénicos micríticos (Fig. 20b), lo que evidencia la actividad de la mesofauna (Fig. 20a). El horizonte 2A2 se caracteriza por una microestructura en bloques; sin embargo, la presencia de coprolitos genera zonas biogénicas microgranulares; este horizonte también se destaca por mostrar una pigmentación oscura procedente del humus.

Los horizontes inferiores (2Bw1, 2Bw2, y 2Bck) muestran motas de óxidos de Fe-Mn (Figs. 20c y d) y algunos nódulos ferruginosos dentro de la matriz. El horizonte 2Bw2 se caracteriza por la presencia de recubrimientos de arcilla iluviada. A lo largo de todo el perfil es posible observar carbonatos, incluyendo micrita dentro de la matriz (Fig. 20e).

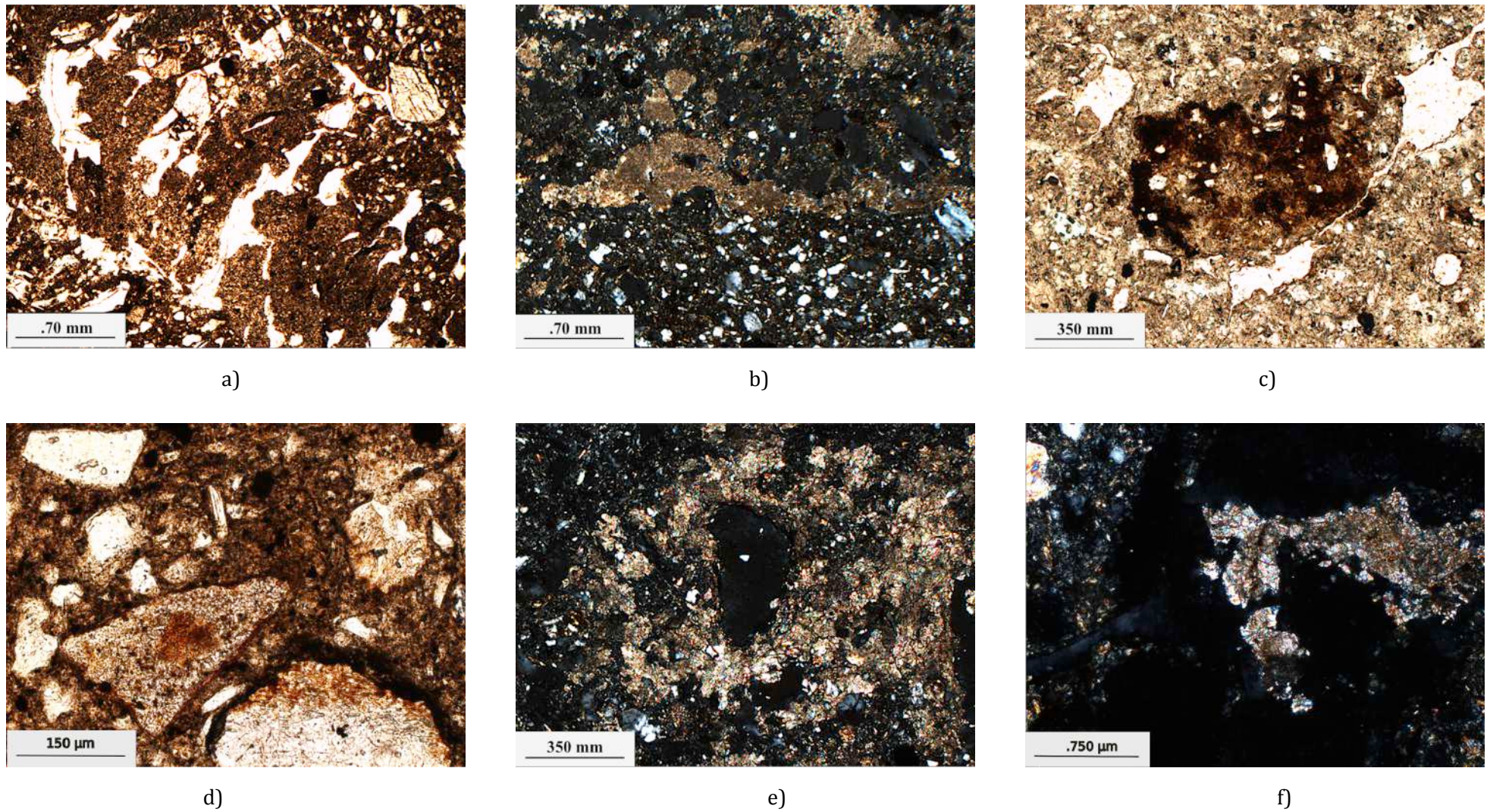


Fig. 20. Micromorfología del perfil Zanja. a) Horizonte 2A. Actividad de la mesofauna dentro de un canal de relleno creciente (LP); b) Horizonte 2A. Carbonato dentro del canal creciente (NX); c) Horizonte 2Bw. Procesos redoximórficos, matrix con presencia de Fe y Mn; d) Horizonte Bw. Procesos redoximórficos, presencia de Fe en la matrix. e) Horizonte 2Bck. Carbonatos secundarios (NX); f) Horizonte Bck, concreción de carbonato (NX) (Ibarra-Arzave et al., 2019).

4.2.3. Análisis físicos

4.2.3.1. Determinación del color del suelo

A lo largo de este perfil podemos observar claras diferencias en su colorimetría. En donde el horizonte C muestra la coloración más clara, con valores bajos en a^* y b^* . Los horizontes superiores de la unidad SRP (2A1, 2A2, y 2Bw) son más oscuros volviéndose más claros en el horizonte inferior (2Bck). En el 2Bw los vectores a^* y b^* muestran colores más rojizos y amarillentos (Fig. 21).

4.2.3.2. Fracciones granulométricas

La distribución del tamaño de grano muestra diferencias y contrastes muy interesantes (Fig. 21). Este corte, principalmente se compone de limo (57–80 %) y arena (11–31 %). El contenido de arcilla varía entre el 7 y el 22 % y alcanza su máximo en los horizontes 2Bw y 2Bck con 17 y 22 %, respectivamente (Fig. 21). Los horizontes 2A1 y 2A2 son muy similares en textura; por el contrario, los horizontes 2Bw1 y 2Bw2 son muy diferentes. El contraste radica en el contenido de arena y limo, en donde el horizonte 2Bw2 registra 75 % y 8 %, respectivamente; mientras que el horizonte 2Bw1 tiene el 30 % y 50 %. Estas diferencias se interpretan como una discontinuidad entre estos dos horizontes (entonces la designación del horizonte debería ser 2Bw para 2Bw1, y 3Bw para el 2Bw2).

4.2.3.3. Parámetros magnéticos

El horizonte C tiene el valor más bajo en la susceptibilidad magnética (χ), y no tiene contribución de partículas magnéticas finas, ya que su valor en porcentaje del χ_{fd} está cercano al 0. Los horizontes 2A1 y 2A2 tienen los valores más altos en susceptibilidad magnética (χ) y van de la mano con el aumento de partículas magnéticas ultra-finas del SP, registrando en χ_{fd} , un 5 % en el horizonte 2Ap (Fig. 21). Los parámetros (χ y χ_{fd}) disminuyen en los horizontes inferiores (2Bw y 2Bck).

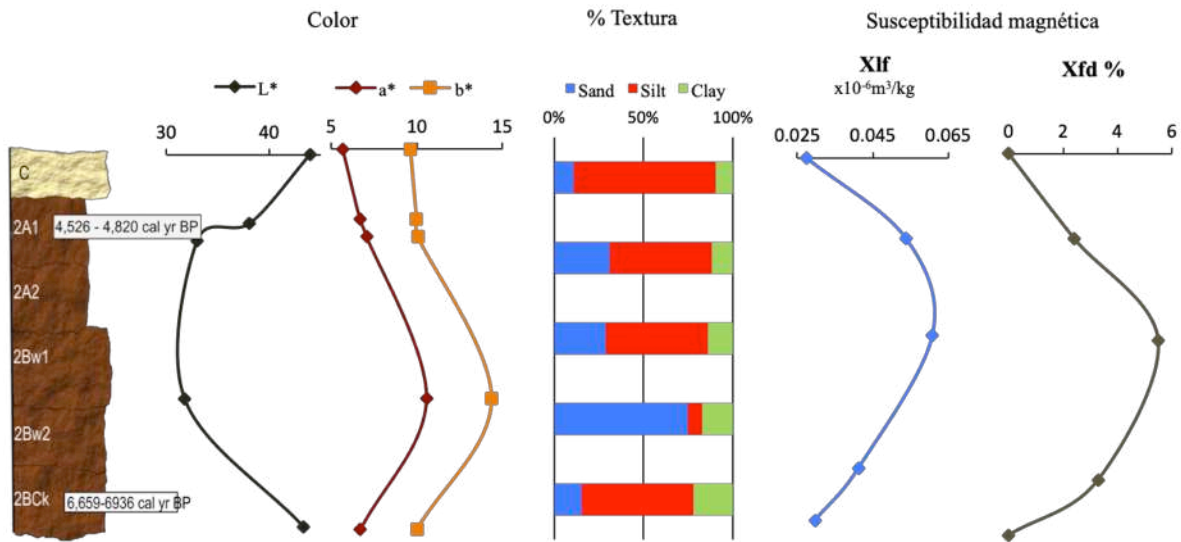


Fig. 21. Colorimetría. Lecturas en L^* , a^* y b^* ; distribución granulométrica; susceptibilidad magnética ($\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$) y dependencia de frecuencia de la susceptibilidad (χ_{fd}) (Ibarra-Arzave et al., 2019).

4.2.4. Otros registros

4.2.4.1. Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier / reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR)

Los horizontes 2A1 y 2A2 del perfil Zanja tienen similitudes en los espectros FT-IR/ATR (Fig. 22a). La forma bimodal con la banda amplia en 1636 cm^{-1} relacionado con los compuestos aromáticos es consolidada por la señal en 1491 cm^{-1} relacionado con el anillo C-C de compuestos aromáticos. También se observa una señal débil de la roca C-H asociada a los alcanos. El espectro del horizonte 2A1 es más débil lo que se puede explicar por el proceso de agotamiento de la materia orgánica probablemente debido a la erosión, que no es selectiva con el tipo de material que está perdiendo (Fig. 22b). No se registro señal de materia orgánica pirogénica como en el horizonte 3Ap del perfil Maravillas.

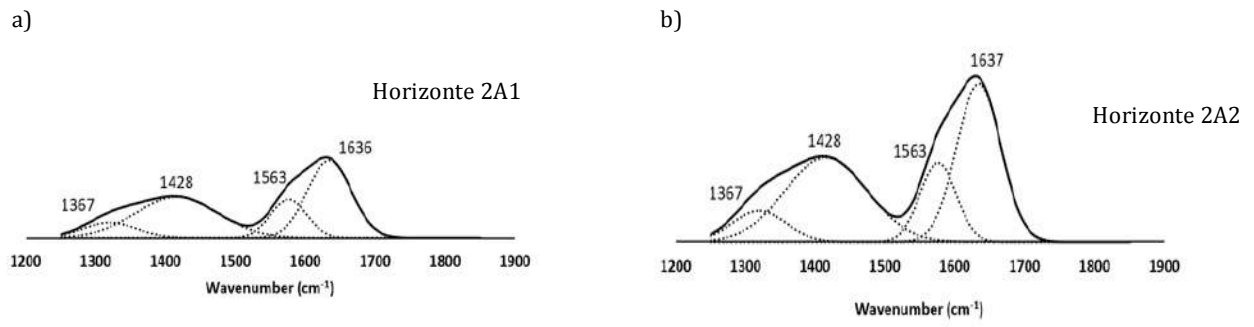


Fig. 22. Espectro FT-IR/ATR del perfil Zanja. a) Horizonte 2A1; b) Horizonte 2A2 (Ibarra-Arzave et al., 2019).

4.3. Perfil Cuatro Suelos

Este perfil se compone por lo siguientes horizontes: C, 2Ah, 2C1, 2C2, 2C3, 3Ah, 3C, 4Ah, 4C1, 4C2, 5Ah, 5C, 6Ah y 6C (Fig. 23). En donde el horizonte C es de color marrón amarillento con una textura limosa, ligeramente laminado (la laminación no es continua), tiene una estructura pobremente desarrollada y con alta porosidad biogénica.

Los horizontes orgánicos (2Ah, 3Ah, 4Ah, 5Ah y 6Ah) tienen un color marrón grisáceo más oscuro, su estructura va de granular a en bloques subangulares, tienen una alta porosidad biogénica y son de textura limosa. Aunque en general dichos horizontes muestran patrones similares, existen algunas pequeñas diferencias; este es el caso de los horizontes 2Ah, 3Ah y 5Ah, en donde se observan fragmentos de carbón vegetal. Por otro lado, el horizonte 4Ah muestra mayor compactación y coloración y presenta pequeñas concreciones de carbonato. El horizonte de 5Ah tiene una alta densidad de raíces. Tanto los horizontes 5Ah como el 6Ah muestran pequeños moteados rojizos de óxidos de hierro y manganeso dentro de la matriz.

Los horizontes C son limosos y de coloraciones claras, y tienen estructura en bloques subangulares con carbonatos en la matriz del suelo.

La descripción de campo se presenta en la Fig. 23

4.3.1. Descripción morfológica en campo

Horizonte	Espesor (cm)	Descripción
C	0 - 5	Color <i>yellowish brown</i> en húmedo (10YR 5/4) y <i>very pale brown</i> en seco (10YR 7/4), de textura limosa (L), sin estructura edáfica, con presencia de laminaciones, friable, presencia de raíces.
2Ah	5 - 15	Color <i>dark grayish brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>pale brown</i> en seco (10YR 6/3), de textura limo arcillosa, con una estructura granular y alta densidad de raíces, se observan restos de carbón. Poca compactación.
2C1	15 - 30	Color <i>dark brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>very pale brown</i> en seco (10YR 7/3), de textura arcillo limosa (RL), con una estructura en bloques subangular pequeña. Presencia de carbón y carbonatos dentro de poros.
2C2	30 - 40	Color <i>dark brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>pale brown</i> en seco (10YR 6/3), estructura en bloques angulares medianos que rompen en bloques angulares medianos. Presencia de carbonatos en poros, de textura arcillosa (R). Presencia de raíces.
2C3	40 - 62	Color <i>brown</i> en húmedo (10YR 5/3) y color <i>very pale brown</i> en seco (10YR 7/3), estructura compacta en bloques angulares medianos, presencia de carbonatos en poros; de textura limo arcillosa (LR).
3Ah	62 - 70	Color <i>brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>pale brown</i> en seco (10YR 6/3), estructura en bloques subangulares medianos que rompe en bloques subangulares pequeños. Textura limo arcilloso (LR), contiene pequeños fragmentos de carbón.

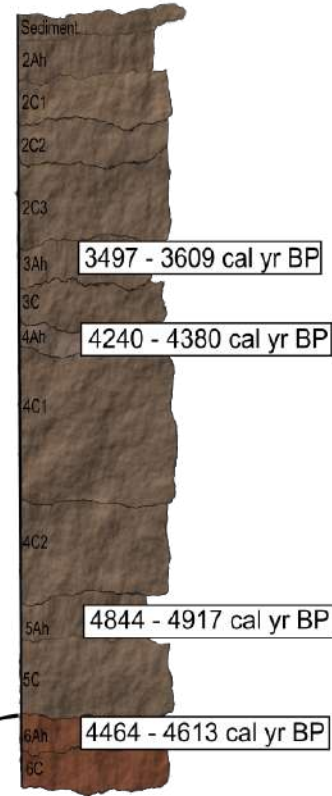


Fig. 23. Perfil Cuatro Suelos (Ibarra- Arzave et al., 2019)

3C	70 - 82	Color <i>dark brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>pale brown</i> en seco (10YR 6/3), agregado compacto con poros de raíces. Carbonatos dentro de poros. Textura arcillosa (R).
4Ah	82 - 90	Color <i>dark brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>pale brown</i> en seco (10YR 6/3). Estructura en bloques angulares medianos que rompe en bloques angulares medianos. Textura limo arcillosa (LR), muestra concreciones de carbonatos, fuerte compactación.
4C1	90 - 128	Color <i>dark yellowish brown</i> en húmedo (10YR 4/5) y color <i>pale brown</i> en seco (10YR 6/3). Estructura en bloques angulares medianos que rompe en bloques angulares pequeños. Compacto, textura limo arcillosa (LR), presencia de carbonatos y carbones.
4C2	128 - 155	Color <i>dark brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>pale brown</i> en seco (10YR 6/3). Sedimento limoso compacto con laminado fluvial, de textura limosa, muy friable.
5Ah	155 - 166	Color <i>dark brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>very pale brown</i> en seco (10YR 7/3). Estructura en bloques subangulares, presencia de raíces, carbon. Poca compactación. Presencia de óxidos de Fe y Mn de forma muy localizada. Textura limo arcillosa.
5C	166-182	Color <i>dark brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>very pale brown</i> en seco (10YR 7/3). Presencia de óxidos de Fe y Mn dentro de poros. Textura franco limosa.
6Ah	182-193	Color <i>dark brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>pale brown</i> en seco (10YR 6/3). Presencia de carbonatos dentro de los poros, óxidos de hierro en la matriz. Textura arcillo - limosa.
6C	193-206	Color <i>dark brown</i> en húmedo (10YR 4/3) y color <i>very pale brown</i> en seco (10YR 7/3). Bloques subangulares, material compacto, presencia de óxidos de Fe y Mn de forma incipiente. Carbonatos dentro de poros. Textura limosa.

4.3.2. Propiedades micromorfológicas

El perfil Cuatro Suelos registra la unidad BOP más completa, se constituye por cuatro horizontes orgánicos, evento notable, debido al alto grado de erosión que se registra en el abanico aluvial de La Playa.

Referente a las propiedades micromorfológicas observadas, tenemos lo siguiente:

El horizonte C corresponde a un material masivo y compacto con presencia de óxidos de Fe en los poros. Se compone de material grueso con una ligera gradación; y algunos fragmentos de material sedimentario (material laminado) y líticos; también se registran restos de material vegetal carbonizado (Fig. 24a).

El horizonte 2Ah tiene una estructura en bloques angulares y subredondeados, registra canales que fracturan la matriz, y se observa restos de material vegetal entre dichos canales; presencia de hueso carbonizado (Fig. 24b). Dentro de la matriz y en los poros se observan carbonatos secundarios, algunos en forma de nódulos (Fig. 24c). El horizonte C se caracteriza por la presencia de óxidos de Fe y material vegetal, algunas zonas se encuentran enriquecidas con material grueso. Se registran coprolitos dentro de los poros.

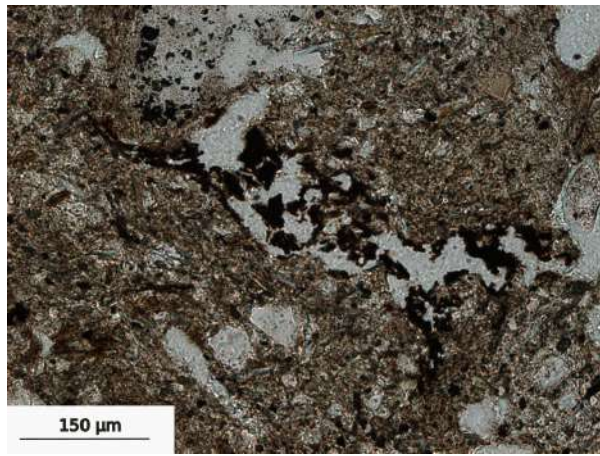
El horizonte 3Ah tiene una estructura masiva, presencia de material vegetal carbonizado dentro de los poros, abundantes óxidos de Fe en la matriz que hacen referencia a procesos de hidromorfismo (saturación con agua por riego). Se caracteriza por ser un horizonte heterogéneo. El horizonte 3C muestra menor porosidad y presencia de canales con respecto al horizonte 3Ah. Este horizonte se encuentra laminado, algunas de estas laminaciones son de limo y arcilla con presencia de óxidos de Fe.

El horizonte 4Ah muestra diferenciación en su granulometría, ya que se observan laminaciones continuas y gruesas; además de material fino. Se registra una importante presencia de diatomeas en la parte fina (Fig. 24d), por debajo de ellas se observan restos de materia orgánica. También podemos observar cutanes heterogéneos, no laminados. Debajo de estos cutanes se registran carbonatos.

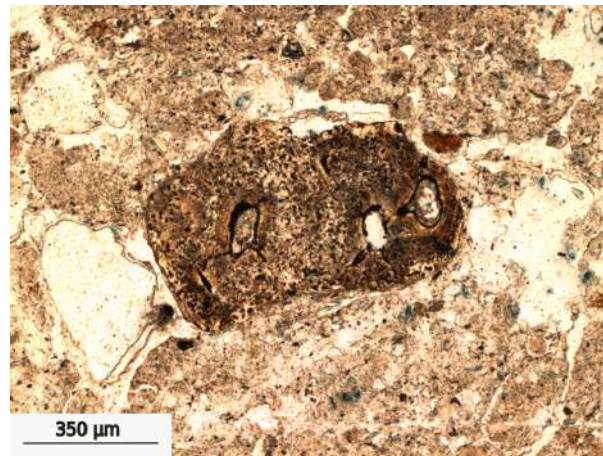
Asimismo, se hacen presentes algunos óxidos de Fe en la matriz. El horizonte 4C se caracteriza por la presencia de material grueso y la presencia de algunas micas, se observan restos de materia orgánica carbonizada.

El horizonte 5Ah se caracteriza por la presencia de material grueso de tipo limo arenoso, se observan fragmentos de costras de tipo arcilloso. Dentro de los poros se registran cutanes sucios con material limoso y materia orgánica. También se observan fragmentos de carbón asociados a eventos de quema.

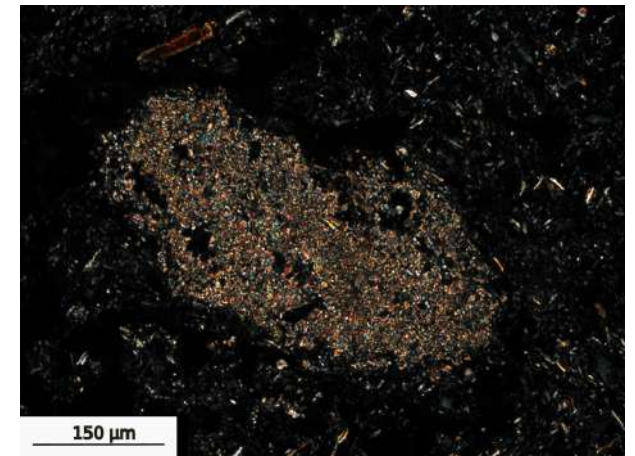
El horizonte 6Ah se caracteriza por la presencia de material grueso de tipo limo arenoso. Se observa el material laminado, restos de material vegetal, presencia de carbonatos secundarios (Fig. 24e); además, de grandes costras fragmentadas de material arcilloso (Fig. 24f).



a)



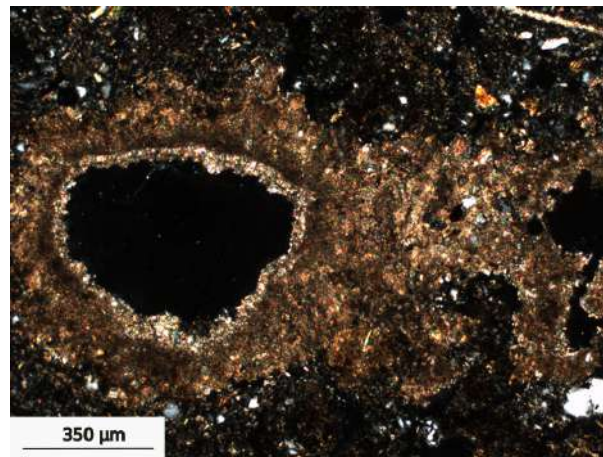
b)



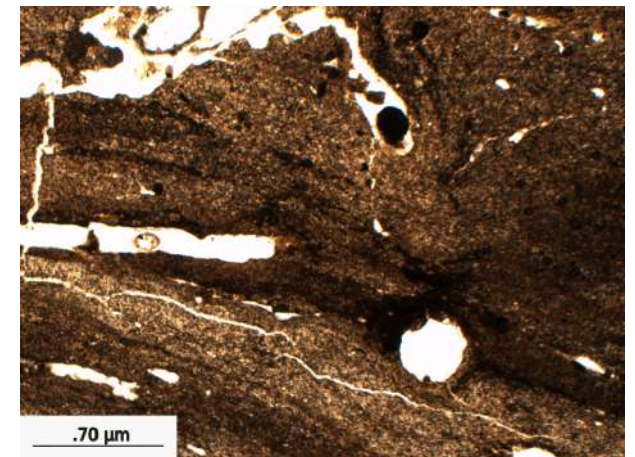
c)



d)



e)



f)

Fig. 24. Micromorfología del perfil Cuatro Suelos a) Horizonte C. Material vegetal; b) Horizonte 2Ah. Presencia de hueso; c) Horizonte 2Ah. Nódulo de carbonato (NX); d) Horizonte 4Ah. Presencia de diatomeas; e) Horizonte 6Ah. Carbonato secundario relleno de poros (NX); f) Horizonte 6Ah. Costra de suelo.

4.3.3. Análisis físicos:

4.3.3.1. Determinación del color del suelo

Los vectores a^* y b^* no registran importantes cambios a lo largo de esta secuencia (Fig. 25). Sin embargo, el parámetro L^* documenta claramente la presencia de diversas unidades del suelo. De nuevo los materiales más claros corresponden a las capas sedimentarias, mientras que los horizontes Ah y 2Ah son los más oscuros.

4.3.3.2. Fracciones granulométricas

La textura de Cuatro Suelos es homogénea y señala un claro predominio de la fracción limo (Fig. 25). A excepción del sedimento superior, todos los horizontes tienen arcilla, con valores entre 37 y 16 %. La fracción de arena muestra porcentajes bajos en todos los horizontes (<11 %).

4.3.3.3. Parámetros magnéticos

Referente a la susceptibilidad magnética (χ) tenemos que el valor más altos se encuentra en el sedimento superior, aunque la cantidad de partículas ultrafinas no es alta (Fig. 25). El suelo sepultado por este sedimento, tiene valores ligeramente más bajos y homogéneos. Los horizontes inferiores tienen valores más bajos en la susceptibilidad (χ); sin embargo, el horizonte 5Ah muestra un ligero aumento en χ , aunque la χ_{fd} no aumenta (Fig. 25). El horizonte 4C1 tiene un aumento en la presencia de partículas ultrafinas (χ_{fd} de 4 %), lo que no es común para los horizontes C, esto puede explicarse como un aporte de partículas magnéticas ultrafinas retrabajadas en el sedimento.

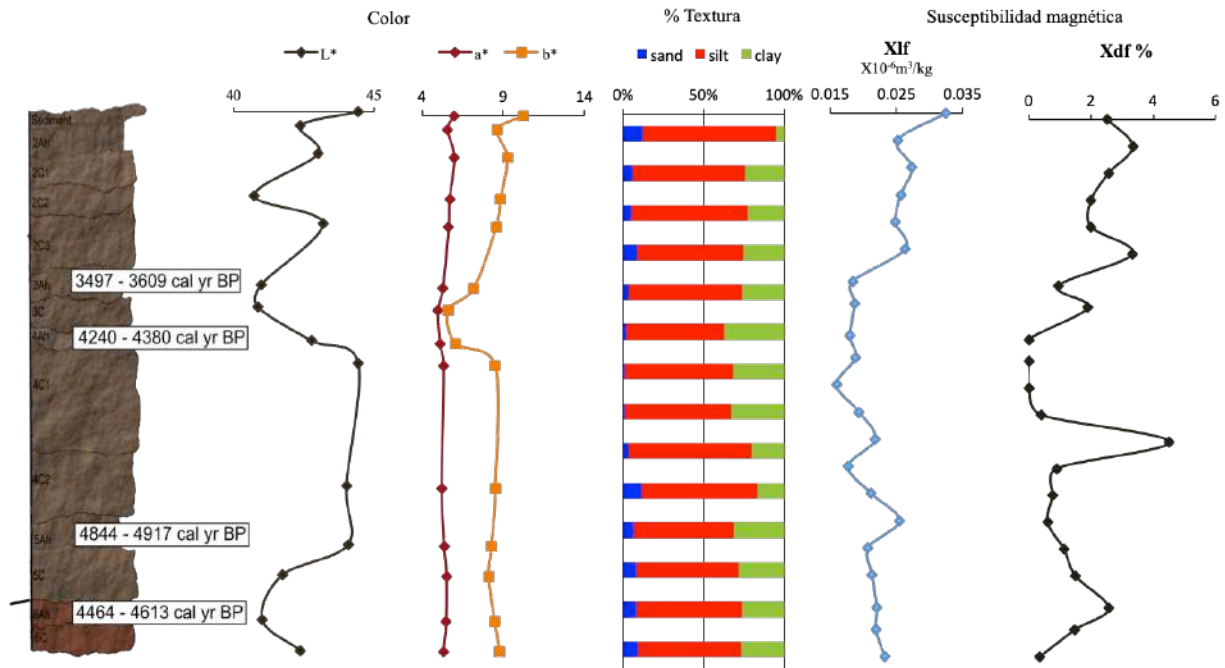


Fig. 25. Colorimetría. Lecturas en L^* , a^* y b^* ; distribución granulométrica; susceptibilidad magnética ($\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$) y dependencia de frecuencia de la susceptibilidad (χ_{fd}). Ibarra-Arzave et al, 2019.

4.3.4. Otros registros

4.3.4.1. Espectroscopia infraroja con transformada de Fourier / reflectancia total atenuada (FT-IR/ATR)

En el perfil Cuatro Suelos, los espectros FT-IR/ATR muestran formas bimodales con bandas amplias centradas en 1428 cm^{-1} y 1637 cm^{-1} , respectivamente (Fig. 26). Los espectros de los horizontes 3Ah y 4Ah exhiben compuestos aromáticos bien definidos y la presencia de N en carboncillo, que se interpreta como una señal de compuesto orgánico pirogénico (Mastrolonardo et al, 2014; 2017).

Particularmente, el horizonte 3Ah muestra una señal incipiente de la banda en 1367 cm^{-1} atribuible a los alcanos y probablemente a N en el carbón amorfo; la banda que forma un hombro en 1491 cm^{-1} se relaciona con el enlace elástico del anillo C-C de compuestos aromáticos (Fig. 26a). En el horizonte 4Ah, la señal de compuestos

aromáticos como el fuego es fuerte, probablemente por una intensa alteración térmica que aumenta la señal a 1594 cm^{-1} relacionada con el anillo C-C y compuestos nitrogenados en N=O y NH_2 lo que señala una lectura de 1468 cm^{-1} asociado al enlace elástico del anillo C-C de compuestos aromáticos y alcanos CH_2 y CH_3 (Fig. 26b).

Para el horizonte 5Ah observamos rasgos en el espectro con moléculas aromáticas y alifáticas resistentes a la descomposición con una forma común de un suelo sin señales de formación de materia orgánica pirogénica. Adicionalmente, se observaron dos bandas incipientes a 1328 cm^{-1} y a 1689 cm^{-1} , éstas se relacionan con aminos (enlace elástico Ar-N), y con C=O en ácidos carboxílicos y C=N en diversos compuestos, respectivamente (Fig. 26c).

El espectro del horizonte 6Ah muestra una intensidad más baja de la señal del IR con las bandas en 1328 y 1491 cm^{-1} , y una señal en 1577 cm^{-1} que se puede relacionar con la banda amorfa del carbón. Este último horizonte, tiene también la mayoría de los compuestos aromáticos pirogénicos y el agotamiento de la intensidad de la señal IR, éstos pueden sugerir diferencias en el acontecimiento del fuego que modifica la materia orgánica en acontecimientos de fuego natural (Fig. 26d).

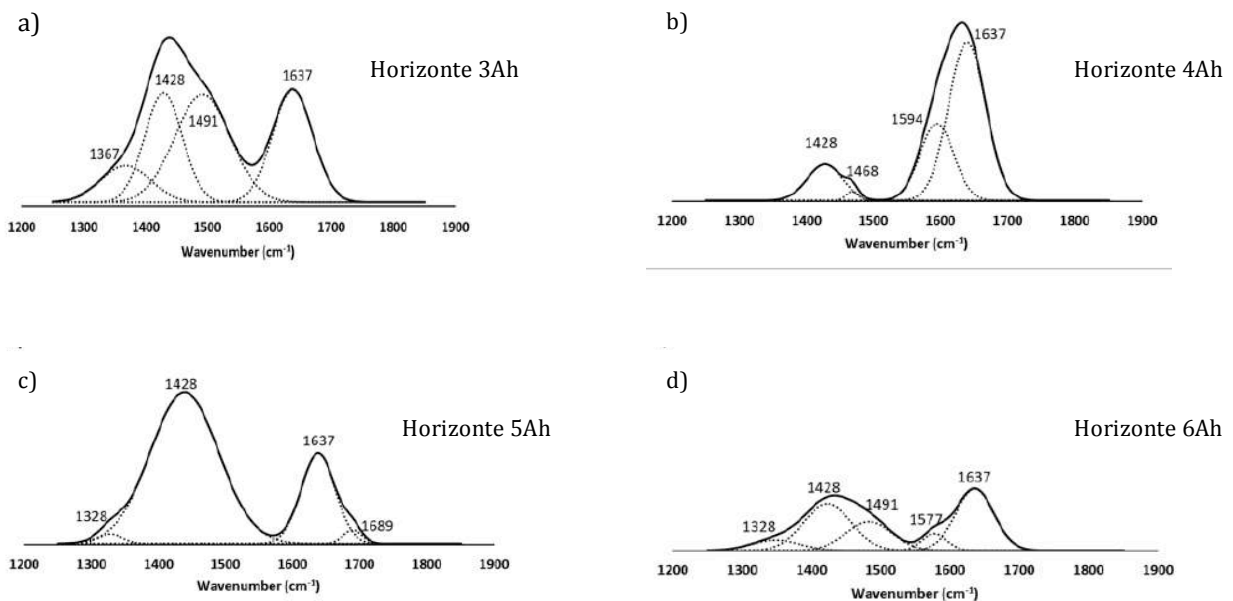


Fig. 26. Espectro FT-IR/ATR del perfil Cuatro Suelos. a) Horizonte 3Ah; b) Horizonte 4Ah; c) Horizonte 5Ah; d) Horizonte 6Ah (Ibarra-Arzave et al., 2019).

4.3.4.2. Contenido de Polen

Este análisis se realizó únicamente para el perfil Cuatro Suelos, en donde se identificaron 44 taxones. Se designaron cuatro diferentes zonas a partir de los resultados obtenidos del polen fósil y de los cuatro fechamientos obtenidos por radiocarbono procedentes de los horizontes orgánicos. Así entonces, se registro lo siguiente (de abajo hacia arriba) (Tabla 3):

Tabla 3. Zonas designadas a partir de los resultados del polen fósil en el perfil Cuatro Suelos.

Zona	Profundidad (cm)	Horizonte	Fecha (cal BP)	Descripción
4	0 - 55	2Ah	<3,400	Durante el período más reciente se registra un predominio de Asteraceae (25 %), Fabaceae y <i>Prosopis</i> (20 %), Nyctaginaceae (15 %), Myrthaceae, Chenopodiaceae, Poaceae y <i>Ambrosia</i> (10 %), y <i>Pinus</i> (media del 10 %). El grupo de esporas tiene valores mínimos en esta zona (Fig. 27). Las asociaciones se relaciona más al uso de la tierra en el sitio debido al aumento de las hierbas y los árboles del desierto tropical.
3	55 - 130	4Ah 3Ah	4,240 - 4,380 3,497 - 3,609	Durante este periodo aparecen especies de ambientes más áridos con altos porcentajes de <i>Ambrosia</i> (50 %), Poaceae (10 %), <i>Pinus</i> (5 %), <i>Prosopis</i> (5 %), <i>Parkinsonia</i> , Asteraceae y Chenopodiaceae (< 5 %). El grupo de esporas tiene valores bajos con un 10% (Fig. 27). Este tipo de taxones corresponden a aquellas asociaciones que se encuentran hoy en día en el bosque caducifolio tropical, entre 600 y 800 msnm (Ortega-Rosas et al., 2008; 2016). Esta zona representa una menor ocupación o un abandono del sitio, lo anterior, evidenciado a partir de los bajos porcentajes de <i>Chenopodiaceae</i> , <i>Poaceae</i> y otros.
2	185 - 130	5Ah	4,844 - 4,917	Se identificaron dos zonas a partir de la diferencia en porcentajes de los principales tipos de polen: Zona 2A (160 a 180 cm) - Se registra 70 % de <i>Ambrosia</i> ; posteriormente, <i>Boherhaavia</i> (no registrada anteriormente) y Chenopodiaceae con 10 %; el grupo de Pteridophyte disminuye considerablemente a un 5 %, el polen de cereales registra porcentajes cerca del 5 % a una profundidad de 180 cm (Fig. 27). Zona 2B (130 a 155 cm) - Se registró una disminución en <i>Ambrosia</i> (15 %), y un importante aumento de Chenopodiaceae y Poaceae (30 % y 35 % respectivamente). Este conjunto de polen está relacionado con la vegetación tropical moderna de pastizales (Ortega-Rosas et al., 2008; 2016) (Fig. 27). Este corto período indica la presencia de condiciones más cálidas y áridas en la región (Van Devender et al., 1990). Los porcentajes más altos de Chenopodiaceae, Poaceae y Ulmaceae (15 %) indican un período corto de intensificación de las actividades agrícolas en este sitio.

1	185 - 210	6Ah	4,464 - 4,613	<p>Esta zona se caracteriza por presentar el mayor porcentaje de Agavaceae con un valor promedio de 30 %; posteriormente, se registra <i>Ambrosia</i> con 25 %, y <i>Pinus</i> con un 10 %. El grupo de Pteridophyte, que incluye <i>Selaginella</i>, <i>Pellaea</i>, y <i>Polypodium</i>, presenta valores de 40 % (Fig. 27). Estas asociaciones son similares a los que se encuentran hoy en día en bosques de pinos abiertos o en comunidades de Chaparral (800 a 1000 msnm) a mayor altitud que el sitio de La Playa (Ortega-Rosas et al., 2016).</p> <p>Debido a la presencia de plantas cultivables como la <i>Chenopodia</i> y los cereales podríamos pensar en un periodo húmedo en donde hubo un uso intensivo del suelo.</p>
---	-----------	-----	---------------	--

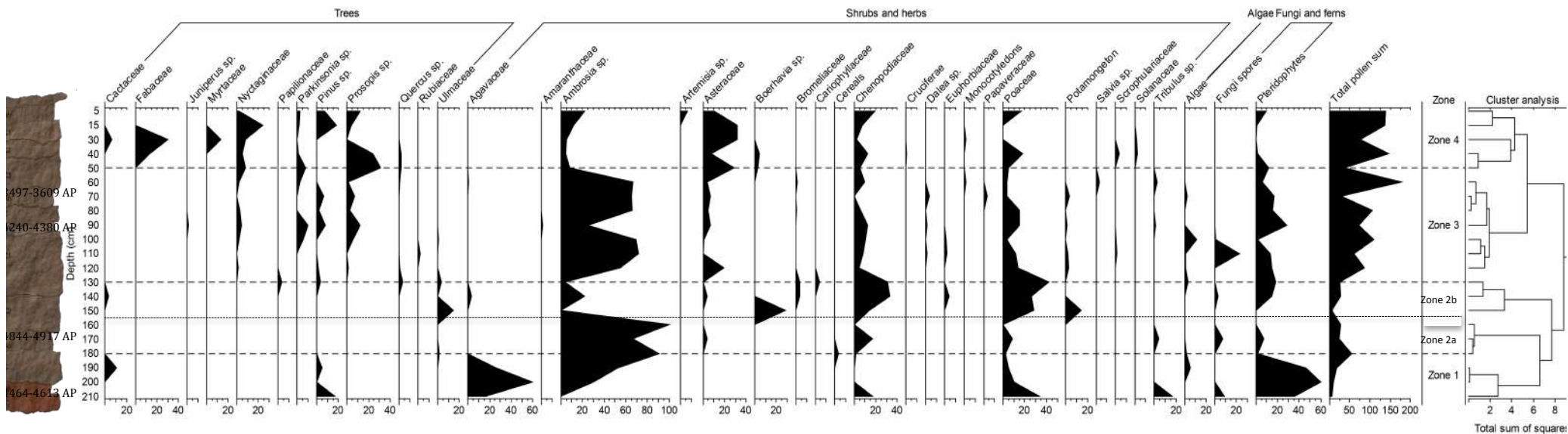


Fig. 27. Diagrama de polen de La playa, Sonora, México. El eje "x" representa el porcentaje de cada taxón de polen relacionado con la suma de polen y esporas, mientras que para el grupo de esporas representa los porcentajes calculados sólo con la suma de esporas (algas, Ferns y hongos). El eje "y" representa diferentes muestras analizadas del perfil correspondiente a los diferentes años calibrados (Ibarra-Arzave et al., 2019).

4.4. Perfil Gramal

Este perfil se conforma por los siguientes horizontes: Bt, C, 2Bw, 2Bw₂, 2Bk y 2BCK, constituyendo dos paleosuelos, los cuales se encuentran sepultados por material sedimentario correspondiente a una Duna.

Respecto a las generalidades de los diferentes ciclos pedogenéticos, tenemos que el primer ciclo corresponde a un material sin estructura y de textura arenosa.

El segundo paleosuelo muestra una textura predominantemente limo arcillosa con una estructura en bloques subangulares y angulares. En superficie se observó presencia de material lítico. Por encima de este perfil se registra una duna. El material que conforma la secuencia y la duna son predominantemente de color pardo rojizo (Fig 28).

La descripción de campo se presenta en la Fig. 28.

4.4.1. Descripción morfológica en campo


	Horizonte	Espesor (cm)	Descripción
 <p>18,203-18,644 años cal AP</p>	Bt	0-4	Color rojo amarillento con estructura en bloques subangulares que no reaccionaron al HCL
	C	4 - 8	Horizonte delgado de textura arenosa de color café rojizo oscuro.
	2Bw	8 - 13	Horizonte de textura areno arcillosa, de color rojo amarillento con estructura angular. Presencia de Mn
	2Bw ₂	13 - 20	Horizonte de textura areno limosa y color café rojizo oscuro que rompe en bloques subangulares
	2Bk	20 - 35	Textura limosa con concreciones de carbonatos. Rompe en bloques angulares y su matriz reacciona al HCl. pH 6
	2BCK	>35	Horizonte con mayor contenido de arena y poca arcilla de coloración rojiza, pequeñas concreciones de carbonatos

Fig. 28. Perfil Gramal

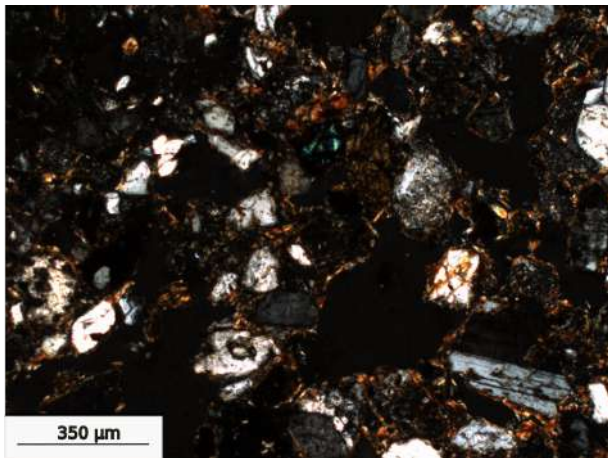
4.4.2. Propiedades micromorfológicas

La micromorfología de los dos paleosuelos que conforman el perfil Gramal se define de la siguiente forma:

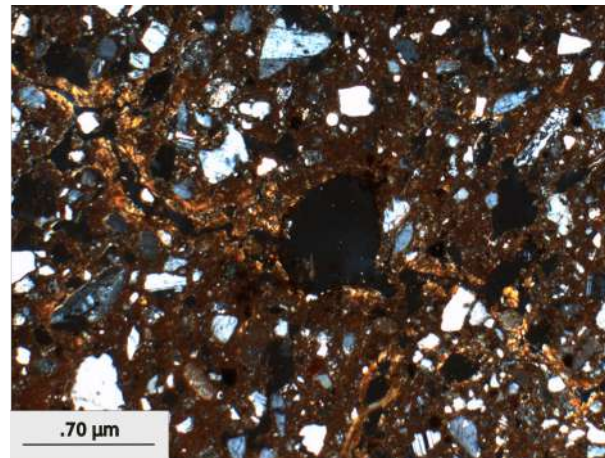
El horizonte Bt se caracteriza por ser material muy compacto con dominancia de arena gruesa. Presencia abundante de cutanes delgados de arcilla iluviada (Fig. 29a), de alta birrefringencia, localizados alrededor de los minerales y dentro de los poros. Algunos de los minerales predominantes son: plagioclasas, cuarzo y ferromagnesianos (presencia de fragmentos de basalto, y material volcánico con dominancia de plagioclasas), dichos minerales muestran sus aristas, esto señala la falta de transporte en el material. También se observan óxidos de Fe dentro de la matriz.

El horizonte 2Bw se caracteriza por la presencia de arcilla iluviada (Fig. 29b), aunque no es un comportamiento homogéneo a lo largo del horizonte. Dicha iluviación es menor con respecto al horizonte superior, aunque con mayor birrefringencia. Se observa movilización de óxidos de Fe (Fig. 29c) relacionados a la iluviación de arcilla. Los minerales predominantes son plagioclasas y cuarzo. El horizonte 2Bw2 muestra una mayor cantidad de arcilla iluviada (Fig. 29d) con respecto al horizonte superior. Poca presencia de carbonatos secundarios (Fig. 29e).

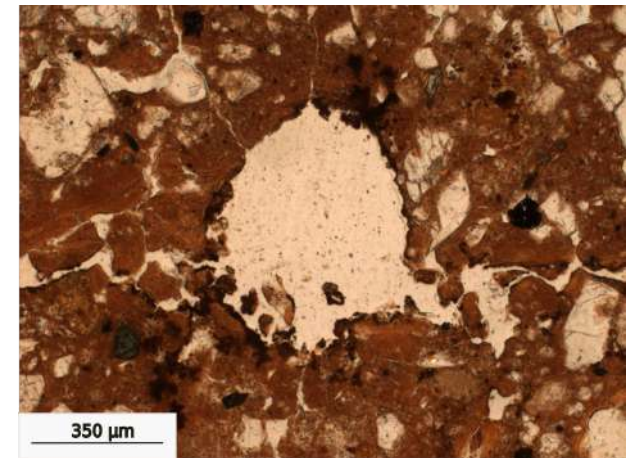
El horizonte 2Bk se caracteriza por la presencia de carbonatos secundarios (Fig. 29f), también observamos cutanes delgados de arcilla iluviada.



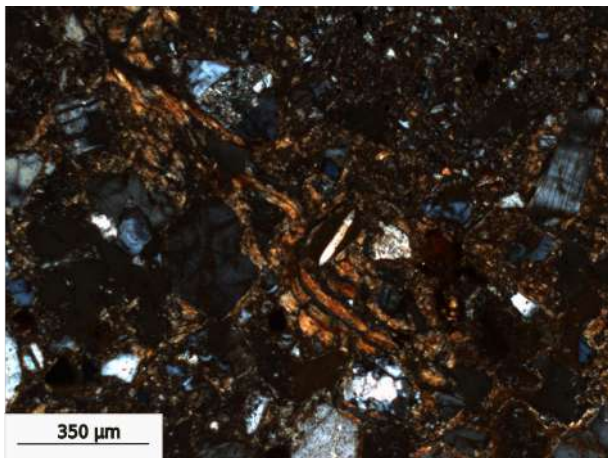
a)



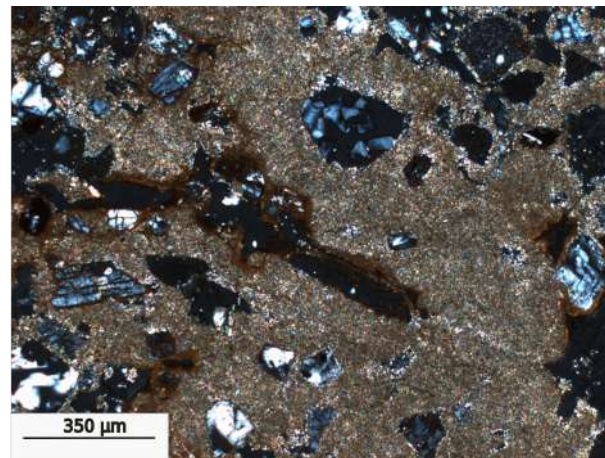
b)



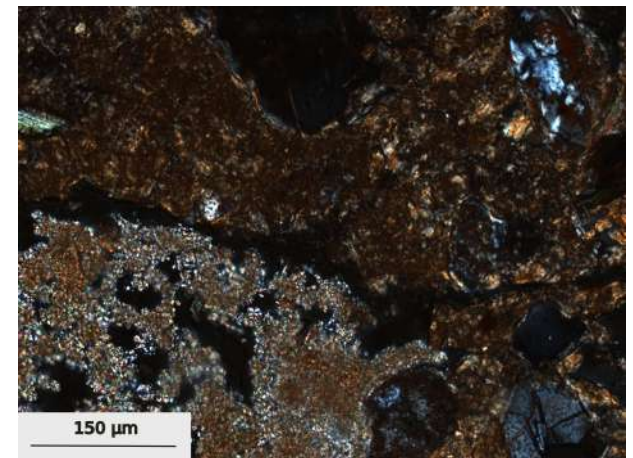
c)



d)



e)



f)

Fig. 29. Micromorfología del perfil Gramal. a) Horizonte Bt, iluviación de arcilla con alta birrefringencia (NX). b) Horizonte 2Bw, iluviación de arcilla alrededor de los minerales (NX). c) Horizonte 2Bw, presencia de Fe (LP). d) Horizonte 2Bw2. Iluviación de arcilla con alta birrefringencia (NX). e) Horizonte 2Bw2. Presencia de carbonatos secundarios (NX). f) Horizonte 2Bk, presencia de carbonatos secundarios e iluviación de arcilla (NX).

4.4.3. Análisis físicos:

4.4.3.1. Determinación del color del suelo

En cuanto al color, observamos que los valores en L^* son muy homogéneos ya que se encuentran en un intervalo de 35.42 a 36.59. Por otro lado, los valores del módulo ab^* muestran un intervalo de 9.4 a 15.15, con una mayor contribución proveniente del vector de color b^* , que varía en un intervalo de 11.37-15.15 (Fig. 30).

El valor del módulo de color ab^* se asocia a un valor alto del vector b , lo cual puede ser atribuido a los minerales presentes; según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica (USDA por sus siglas en inglés), la presencia de coloraciones amarillas en los suelos pueden ser debidas a minerales de hierro como la goethita, la jarosita y la lepidocrocita (USDA, 2015); en contraste con aquellas muestras en donde el vector a^* ejerce mayor influencia, confiriendo coloraciones rojizas a la muestra, lo cual puede ser atribuido a la presencia de hematita, lepidocrocita o ferrihidrita.

4.4.3.2. Fracciones granulométricas

Este perfil no muestra importantes contrastes respecto a la granulometría. Predominan las texturas areno limosas, los valores de la fracción arena van del 50 al un 67 %; el limo del 9.51 al 37.21 % y finalmente la arcilla del 9.07 al 29.07 % (Fig. 30).

4.4.3.3. Parámetros magnéticos

Las mediciones se encuentran en un rango de 0.056 a $0.080 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$. El valor más alto se registró en el horizonte 2BCK con $0.080 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$. Mientras que el valor más bajo se observó en el horizonte 2Bw con $0.056 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$. Respecto a las mediciones de $X_{fd}\%$, se observó que las lecturas no mostraron un patrón heterogéneo, ya que los

valores van de 0.62 y 2.80%, el valor más alto se registró en el horizonte superficial (Bt) y el más bajo en el horizonte C (Fig. 30).

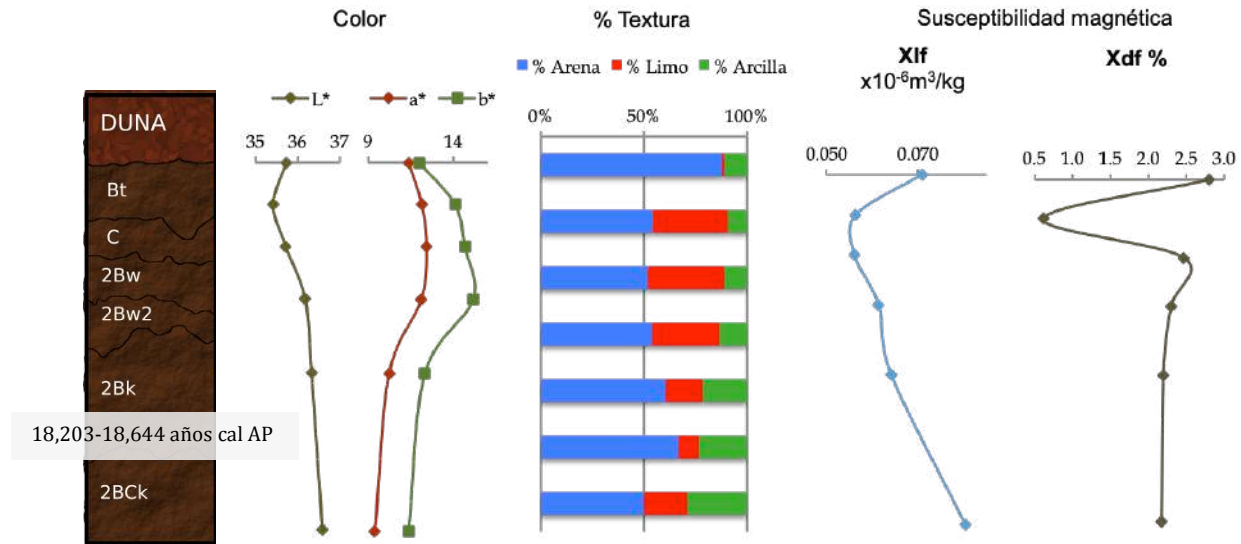


Fig. 30. Colorimetría. Lecturas en L^* , a^* y b^* ; distribución granulométrica; susceptibilidad magnética ($\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$) y dependencia de frecuencia de la susceptibilidad (χ_{fd}).

4.5. Fechamientos por radiocarbono

Se fecharon por radiocarbono ocho muestras, seis de ellas corresponden a materia orgánica y dos a carbonatos. En el caso de los horizontes orgánicos, se fecharon los ácidos húmicos, los cuales proporcionan la datación del último periodo de pedogénesis de el horizonte, en donde el proceso de descomposición disminuye drásticamente con el sepultamiento. Los horizontes datados fueron: el 4AC del perfil Maravillas con una datación de 4,420-4,729 cal AP (Ibarra-Arzave et al., 2019); el 2A del perfil Zanja con una fecha de 4,526-4,729 cal AP (Ibarra-Arzave et al., 2019); y los horizontes 3Ah, 4Ah, 5Ah y 6Ah del perfil Cuatro Suelos con las siguientes dataciones: 3,497-3,609 cal AP, 4,240-4,380 cal AP, 4,844-4,917 cal AP y 4,464-4,613 cal AP,

respectivamente (Ibarra-Arzave et al., 2019); lo anterior nos muestra que la formación de estos paleosuelos ocurrió dentro del Holoceno medio (Fig. 31, Tabla 4).

De los horizontes mas profundos de los perfiles Zanja y Gramal se dataron las concreciones de carbonato, dichas concreciones se forman por la lixiviación de compuestos, los cuales son removidos por el agua y precipitados en los poros, por lo que la datación resultante será posterior a la formación del suelo en el que se depositan. Así entonces, del perfil Zanja se fechó el horizonte 2Bck con una edad de 6,659-6,936 cal AP lo que muestra que la formación de este paleosuelo ocurrió dentro del Holoceno medio; del perfil Gramal se trabajó con el horizonte 2Bk en donde la edad obtenida oscila entre 18,203-18,644 cal AP, esto señala que el paleosuelo más antiguo del perfil se formó durante el Pleistoceno (Tabla 4).

Tabla 4. Edades obtenidas por radiocarbono.

Perfil	Horizonte	Material datado	Edad Convencional AP	Edad Calibrada	Clave
Maravillas	4AC-SRP	Materia orgánica	4070±70	4,420 – 4,729 cal AP	ICA-16OS/0702
Zanja	2A-SRP	Materia orgánica	4120±40	4,526 – 4,729 cal AP	ICA-16OS/0707
	2Bck-SRP	Carbonatos (concreciones)	5950±60	6,659 – 6,936 cal AP	ICA-16OS/0706
Cuatro Suelos	3Ah-BOP	Materia orgánica	3320±40	3,497 – 3,609 cal AP	ICA-17C/0622
	4Ah-BOP	Materia orgánica	3870±40	4,240 – 4,380 cal AP	ICA-17C/0623
	5Ah-BOP	Materia orgánica	4290±40	4,844 – 4,917 cal AP	ICA-17C/0624
	6Ah-SRP	Materia orgánica	4050±40	4,464 – 4,613 cal AP	ICA-17C/0625
Gramal	2Bk	Carbonatos (concreciones)	15170±80	18,203- 18,644 cal AP	ICA-16OS/0701

CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN*5.1. La Playa: Sedimentación y Pedogénesis, evidencia de condiciones paleoambientales.*

Dentro de las secuencias estudiadas en el abanico aluvial de La Playa, el SRP corresponde al suelo más desarrollado, esto debido a sus características macro y micromorfológicas. El material que conforma esta secuencia es de origen aluvial y está constituido, principalmente, por cuarzo, fragmentos de roca (conglomerados y areniscas), y ferromagnesianos de la Sierra Boquillas (Villalpando et al., 2007).

El SRP tiene una estructura bien desarrollada, la cual se caracteriza por la neoformación y acumulación de arcilla, el intemperismo de minerales primarios, la rubificación, y la presencia de características reductomórficas (Figs. 16 y 20). Adicionalmente, en este paleosuelo, también se pueden encontrar abundantes carbonatos pedogenéticos con diferentes morfologías, indicando diversas etapas evolutivas (Figs. 16e, 16e y 16f). Así las cosas, en los horizontes Bk y BCK existen carbonatos secundarios cubriendo las superficies de los agregados. A nivel micromorfológico, se pueden observar como cristales grandes de tipo esparítico, de tipo micrítico se encuentran dentro de la matriz o recubriendo poros. Estas características se interpretan como el resultado de la lixiviación de carbonato procedente de los horizontes superiores hacia la parte inferior. Características como las anteriormente descritas: neoformación de minerales primarios, iluviación de arcilla, presencia de características reductomórficas, y migración de carbonatos, son procesos que ocurren entre los 1,000 y 10,000 años aproximadamente (Targulian y Krasilnikov, 2007).

Relacionando los procesos anteriormente mencionados con las edades de radiocarbono (Tabla 4), se obtiene que el período de pedogénesis se extiende alrededor de los 14,000 años. Sin embargo, la edad procedente del horizonte A en el desarrollo SRP debe analizarse con particular atención ya que la mayoría de las secuencias no tienen este horizonte debido a la intensa erosión registrada en el área. En el caso del perfil Zanja, se observan algunas diferencias entre los horizontes 2A1 y

2A2 (Fig. 21), lo que nos hace pensar que corresponden a diferentes ciclos de formación de suelo.

A pesar de que existen varias secuencias estudiadas que corresponden al SRP (Figs. 7 y 31), se puede observar que no todas reflejan la misma estabilidad en el relieve, tal es el caso de los perfiles Maravillas y Zanja. El primero de ellos presenta cortezas de desecación fragmentadas (Fig. 16), lo que evidencia procesos de redepositación; mientras que el perfil Zanja registra una superficie más estable. Esto puede relacionarse a la geoposición de cada una de las secuencias, pues la presencia de cortezas de desecación en Maravillas puede deberse a que dicho perfil estuvo más cerca del canal activo durante el tiempo de su formación.

En cuanto a las condiciones paleoclimáticas, Cruz y Cruz et al (2014) concluyeron que el SRP se formó bajo condiciones ligeramente más húmedas en relación a las actuales (Fig. 1), condiciones que no fueron de forma continua. En este sentido, se registraron periodos secos en donde se formaron carbonatos pedogenéticos y periodos húmedos en donde ocurrió el intemperismo y la iluviación de acilla, dichos procesos se fueron alternando a través del tiempo.

Hacia el Holoceno medio, hubo una tendencia hacia la aridización, en donde la erosión y la sedimentación se intensificaron. Lo anterior se evidencia con la presencia de fragmentos de carbón vegetal, cortezas de desecación retrabajadas y carbonatos micríticos registrados en los horizontes orgánicos del SRP (Figs. 16 y 20).

De esta manera, se puede observar que el SRP integra información relacionada al Altitermal, evento que se caracteriza por provocar una fuerte erosión en el área. Esta situación se relaciona con la pérdida de los horizontes orgánicos en la mayoría de los perfiles SRP (Figs. 12, 19, 31). Dichas observaciones concuerdan con las de Copeland et al. (2012) quienes han descrito la unidad B₀ y la correlaciona a este período de origen sedimentario (Fig. 7).

Posteriormente, el desarrollo del SRP se interrumpe por un período de inestabilidad el cual produjo el siguiente nivel estratigráfico: el intervalo sedimentario (Figs. 11, 15 y 31).

El BOP se compone por un suelo sinsedimentario aluvial conformado por varios horizontes orgánicos incipientes separados por sedimentos aluviales (Figs. 7, 11, 31). Las partículas de arena son subangulares y angulares, lo que indica un transporte a corta distancia. También se observan finas partículas de materia orgánica carbonizada, presencia de agrocitanes, hueso, y fragmentos de corteza superficial, elementos que probablemente se relacionan al impacto antrópico (Fig. 16). Dentro de este desarrollo, también es posible observar carbonatos micríticos en poros, y pocos nódulos de Fe y Mn en la matriz, lo que se vincula a procesos reductomórficos de poca intensidad.

5.2. La evolución del paisaje en el abanico aluvial de La Playa.

Desde el punto de vista geomorfológico, se sabe que el abanico aluvial de La Playa, comenzó a formarse en el Pleistoceno tardío hace 14,000 años AP (Cruz y Cruz et al., 2014), en donde se tienen dos formas antiguas de relieve: el protoabanico y la superficie SRP (Ayala, 2018).

El Protoabanico se localiza en el sector norte del abanico, altitudinalmente se encuentra en una posición más baja que el resto de la superficie de la geoforma. Está constituido por un material rojizo y fino, probablemente SRP redepositado, intercalado con capas de grava y cantos dispuestos de forma laminar. Debido a su alto grado de disección se puede suponer que constituye la porción más antigua del abanico pleistocénico. El SRP, se localiza principalmente en la porción media y distal del abanico (Ayala, 2018; Ibarra et al, 2018). Sin embargo, aún no es posible establecer cuál de estas dos geoformas es más antigua debido a la ausencia de dataciones para el antiguo abanico (Fig. 8). Debido a la acción de la erosión, el BOP y parte de los horizontes del SRP han sido removidos. A diferencia del protoabanico el grado de disección es menor.

La superficie SRP, corresponde al desarrollo de un paleosuelo pardo rojizo formado durante un largo período de estabilidad (Figs. 1, 7, 31). Cruz y Cruz et al. (2014), establece la edad de formación de este paleosuelo a partir de la datación de los

carbonatos pedogenéticos localizados en el perfil Hornos, lo cual arrojó una edad de 14,230-14,910 años cal AP (Figs. 7 y 31); respecto a la edad final de formación de esta secuencia, se obtuvo a partir de la materia orgánica del horizonte A del perfil Maravillas y Zanja la edad de 4,250- 4,729 años cal AP (Ibarra-Arzave et al, 2019) (Fig. 31 y Tabla 4).

Por consiguiente, el tiempo estimado para la pedogénesis es alrededor de 10,000 años, probablemente más (no obstante que la pedogénesis del SRP comienza antes que la formación del carbonato). De igual forma, es importante tomar en cuenta la fuerte erosión que se registra en el SRP, situación que se refleja con la ausencia de los horizontes superficiales (sólo algunos pedestales muestran su horizonte orgánico) (Figs. 7, 11, 12, 31). Esta fase de erosión se puede asociar al inicio del período Altitermal (Antevs, 1955); periodo en donde se registró un aumento de la temperatura, una disminución de la cubierta vegetal y una rápida erosión provocando una importante aridización. Al final del Altitermal, la temperatura disminuyó, provocando un aumento en la saturación del agua debido a la reducción de la evaporación, lo anterior ocasionó el aumento en la escorrentía favoreciendo la presencia de inundaciones intensas. Esto se confirma con el desarrollo del intervalo sedimentario localizado en la parte superior del SRP en el perfil Maravillas (Figs. 11, 15, 17, 31).

Durante el Holoceno medio, el canal de alimentación localizado al norte del antiguo abanico aluvial sufrió un desplazamiento hacia su posición actual (Fig. 8), causando un aumento en los procesos de sedimentación y una reducción en la pedogénesis. Estos eventos de gran magnitud promovieron la formación de la unidad B₀ se considera análoga al intervalo sedimentario (Fig. 7) (Copeland et al., 2012). Finalmente, este período de inestabilidad climática culminó con períodos de sedimentación menos frecuentes, lo que permitió el desarrollo de una pedogénesis incipiente entre eventos aluviales. Este suelo sinsedimentario aluvial corresponde a la superficie del BOP. Durante este tiempo la frecuencia y magnitud de las inundaciones fueron bajas (Schott, 2017).

Respecto al tipo de relieve que conforma el sitio de La Playa, se ha desarrollado cierta polémica a partir del trabajo de Schott (2017). Esta publicación concluye, a través del estudio de imágenes aéreas, que el sitio corresponde a la planicie de inundación del río Boquillas. Para el autor, lo anterior se constata, debido a la ausencia de un canal distributivo, y a la falta de sedimentos que demuestren una deposición canalizada. No obstante, el intervalo sedimentario descrito anteriormente, corresponde a la unidad B₀ propuesta por Copeland et al. (2012) y Schott (2017) con facies sedimentarias similares (Fig. 7). De este modo, el análisis de facies sedimentarias apunta hacia un complejo y trenzado abanico aluvial, en donde la afluencia de sedimentos se produce principalmente durante la temporada de lluvias. Se observan laminaciones delgadas (Fig. 16), las cuales son típicas para los depósitos de planicie de inundación; sin embargo, están pobremente desarrolladas e intersectadas por diferentes tipos de barras de arena (central o lateral) (Fig. 16c) lo que puede indicar la migración del canal principal.

5.3. Las condiciones ambientales durante el Holoceno medio.

Las primeras evidencias de agricultura en La Playa coinciden con el final del período Altitermal (alrededor de 4,500 años AP; Antevs, 1955). Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que para ese momento se termina un largo período de estabilidad, marcado por la formación de un paleosuelo bien desarrollado conocido como el SRP o el Big Red Sánchez (2010) y Sánchez et al. (2014). Las fechas de radiocarbono obtenidas a partir de la materia orgánica proveniente del horizonte A de este desarrollo (Fig. 31, Tabla 4), son de alrededor de los 4,800–4,200 años AP, datación que indica la edad mínima del paleosuelo, es decir, cuando el suelo quedó sepultado.

Los activos procesos geomorfológicos dieron origen al siguiente período, el cual se caracterizó por la erosión y sedimentación, sin desarrollo de pedogénesis. Así, como ya se mencionó anteriormente, la fuerte erosión destruyó los horizontes orgánicos del SRP en la mayor parte del abanico aluvial. Sin embargo, en el área donde se registró el

perfil Zanja, fue posible observar un conjunto de pedestales con diferentes grados de pérdida de suelo por erosión, la cual se clasificó de la forma siguiente: mínima, con el horizonte A preservado; medio, ausencia del horizonte A y parte del horizonte Bw; y fuerte, referente a un perfil truncado hasta el horizonte Bk (Fig. 12). Los espectros FT-IR/ATR del perfil Zanja, horizontes 2A1 y 2A2 también demuestran este comportamiento. Aunque los espectros son similares (Fig. 22), el horizonte superior 2A1 refleja un proceso de agotamiento de la materia orgánica probablemente debido a la erosión.

En algunas ocasiones, en la parte superior del SRP (completo o truncado) se forma una secuencia sedimentaria predominantemente arenosa identificada como intervalo sedimentario (SI). En el perfil Maravillas se encuentra la secuencia más completa referente al SI (Figs. 15 y 17). A juzgar por la posición stratigráfica y la textura arenosa relativamente gruesa, dichas capas fueron correlacionadas con la unidad B₀ de Copeland et al (2012) y la B_{0?} de Schott (2017). La fecha obtenida en la base de este intervalo oscila alrededor de los 4,600 años AP, lo que se correlaciona con la fecha de 4,690 a 4,350 establecida para B₀ (Fig. 7) (Copeland et al 2012). La unidad B_{0?} no tiene datación; sin embargo, el resultado obtenido se asemeja a la edad de la unidad B₁₋₃, la cual abarca un periodo de 4,050 a 3,660 años cal AP.

Comparando el intervalo sedimentario de Maravillas con los perfiles de Dos Pisos de Copeland et al (2012) (Fig. 7) y los Montículos de Schott (2017), se concluye que la secuencia aquí estudiada es más desarrollada y diversa, ya que muestra una notable variación en los procesos de sedimentación: flujo laminar de la planicie de inundación (Fl); flujos de alta energía que forman barras de arena y depósitos de canal; e incluso depositación fluvio-eólica con una gran cantidad de componentes de limo. Los diferentes tipos de sedimentación son claramente visibles a macro y micro escala (Figs. 11, 15, 16), es decir, en campo, a través de los cambios en la distribución del tamaño de grano; y en el microscopio, a través de las secciones delgadas.

Las características pedogenéticas registradas dentro de este intervalo son muy débiles; no obstante, existen. En depósitos como la planicie de inundación, registramos una débil estructura biogénica acompañada por nódulos de Fe-Mn. Por lo

tanto, vemos que los cambios registrados dentro de estos depósitos reflejan la dinámica en el proceso de sedimentación, relacionado con las condiciones ambientales.

Sugerimos que este fenómeno geomorfológico, altamente dinámico, se desencadenó por la inestabilidad climática que se registró en Norteamérica durante el Holoceno tardío (Rasmussen et al., 2006; Perez-Cruz, 2006; Brunelle et al., 2010; Antinao y McDonald, 2013; Ortega-Rosas et al., 2017).

5.4 Las sociedades agrícolas de La Playa y su entorno ambiental

Partiendo del estudio de las características pedogenéticas y sedimentarias del BOP, registrado en los perfiles Maravillas y Cuatro Suelos, se sugiere que hubo una predominancia en las condiciones climáticas secas durante el período de su formación (4,000–1,500 años AP) que corresponde al momento de máximo desarrollo de ocupación del Periodo de Agricultura Temprana (EAP) (Huckell, 1995; Carpenter et al., 2005, 2007, 2009; Mabry, 2008). Sin embargo, a partir del estudio de polen realizado en el perfil Cuatro Suelos, se pudieron detectar los periodos cortos de mayor humedad, los cuales ocurrieron alrededor de los 3,500 y los 2,000 años AP (Fig. 27; Tabla 3). Lo anterior, puede observarse en el diagrama de polen en donde se registra una especie de ambiente másico, debido al aumento de los registros en los grupos Pteridophyte, algae, y *Prosopis*. A partir de los estudios realizados en el desierto norteamericano, se sabe que durante el Holoceno tardío se registraron altas fluctuaciones en el clima (Van Devender et al., 1990; Metcalfe et al., 2015; Holmgren et al., 2006).

De este modo, y a pesar de algunas diferencias, se correlaciona la cronología y estratigrafía (unidades A a C) propuesta por Copeland et al. (2012) (Fig. 7) con las observaciones y resultados obtenidos en esta investigación son consistentes entre si. En donde, B₀ (y tal vez parte las unidades B₁/B₂) corresponden al SI; Las unidades B₂, B₃ y B₄ se relacionan al BOP. De este modo, el B₀ no tiene material arqueológico; en

B₁/B₂ son escasos los artefactos, concentrándose así en B₄ y B₅ (Fig. 7) (Copeland et al., 2012; Schott, 2017).

Ahora bien, es preciso señalar que no hay concordancia con las inferencias paleoambientales sugeridas por Copeland et al (2012), en donde las unidades B₂, B₃ y B₄ corresponden a materiales depositados exclusivamente por procesos fluviales, en un ambiente permanentemente húmedo, incluso saturado de agua (Fig. 7). No obstante, las características pedológicas del BOP lo describen como un fluvisol sinsedimentario, por lo que este suelo no se ajusta a la anterior interpretación (Ibarra-Arzave et al, 2019). En este sentido, el BOP correspondiente a un fluvisol sinsedimentario muestra una serie de propiedades típicas de un suelo formado en un ambiente seco bien drenado: 1) desarrollo de estructura coprogénica (Fig. 16a) como resultado de la actividad de la mesofauna (proceso que no se puede llevar a cabo bajo condiciones anóxicas); 2) acumulación moderada de humus coloidal (Fig. 16a); 3) presencia de abundantes carbonatos pedogenéticos (más no hidrogénicos); 4) alta variabilidad en el contenido de polen de especies de clima seco como Asteraceae, Cactaceae (registradas a 30 cm de profundidad en el perfil Cuatro Suelos, Fig. 27).

Las fases húmedas fueron cortas y causadas por los eventos de inundación, los cuales provocaron la deposición del aluvión; sin embargo, también se registraron periodos secos que promovieron el desarrollo de un suelo bajo condiciones áridas. Justamente son estas fluctuaciones climáticas las detectadas por el polen del perfil Cuatro Suelos. De esta forma, puede advertirse la presencia de pastizales tropicales en el horizonte 5Ah (Zona 2), la existencia de bosque tropical caducifolio en el horizonte 3Ah (Zona 3), o la vegetación actual en la Zona 4 (Fig. 27; Tabla 3). La presencia de *Pinus* en esta zona (a 15 cm de profundidad) documenta periodos cortos de clima más húmedo y frío al actual, vegetación también registrada en otras secuencias en Norteamérica (Asmerom et al., 2013). La muestra de polen obtenido en el horizonte 5Ah indica un clima más frío y húmedo, que se produjo entre los 4,844 y los 4,917 años cal AP. Empero, esta conclusión debe tomarse con cuidado, ya que la edad del horizonte de 5Ah es más antigua que la del horizonte inferior (horizonte 6Ah) (Fig. 27; Tabla 3). Lo anterior, lo interpretamos como material re trabajado en donde se involucra a la

antigua materia orgánica, procedente de niveles estratigráficos más bajos (probablemente del SRP). El espectro FT-IR/ATR (Fig. 26) exhibe el predominio de las moléculas alifáticas resistentes a la descomposición, que pueden ser los residuos de la antigua materia orgánica ya mencionada.

Es posible que el clima semiárido y la deficiencia de humedad estimularon el desarrollo temprano en el manejo del agua, situación que se reflejó en la construcción de una red de canales de riego.

5.5 Los grupos humanos en el Holoceno tardío

La teoría del Oasis formulada por Childe, (1936) sostiene que las comunidades del final del Pleistoceno se vieron obligadas a recluirse en zonas más fértiles con abundancia de agua; funcionando estas zonas como pequeños refugios que sirvieron para acoger especies vegetales y animales (Quijano, 2011). Lo que les permitió ejercer actividades de tipo agrícola e iniciar un modelo de vida sedentario (Plog 2008).

Al finalizar el periodo Altitermal, durante el Holoceno medio, autores como Carpenter y Sanchez (2012) establecieron que las poblaciones proto-yuto-aztecas del Desierto de Sonora abandonaron la región, refugiándose en lugares con mayor elevación, o con un clima más favorable. Un dato relevante, es que dentro de esta historia regional, existe un hiatus estratigráfico que puede relacionarse con las condiciones inhóspitas del Altitermal (Berry y Berry, 1986; Mabry, 1998; Carpenter y Sanchez, 2013). Dichas condiciones obligaron a los grupos humanos a emigrar, formando dos grupos: los proto-yuto-aztecas del norte y los proto-yuto-aztecas del sur. De esta forma, los grupos del norte buscaron refugio en la Gran Cuenca, mientras que los del sur probablemente llegaron a la región serrana entre los ríos Mayo y Sinaloa (Carpenter y Sanchez, 2012). Carpenter et al (2007) señalan que los grupos que emigraron hacia el sur convivieron con personas que cultivaban el maíz.

Para el Holoceno tardío (4,200aC-200dC), el Desierto de Sonora registró una reocupación de los grupos proto-yuto-aztecas que anteriormente se habían refugiado de

las inclemencias del medio ambiente (Carpenter, 2009; Carpenter et al., 2002, 2003, 2005, 2007 y 2009; Carpenter y Sanchez 2012). Así, el valle Boquillas se convirtió en un paisaje altamente dinámico en donde se desarrollaron aldeas agrícolas en las planicies aluviales de los ríos, agricultura por irrigación y cultivación del maíz.

Durante el periodo de EAP, la población del valle se incrementó notablemente, evidencia de lo anterior son los numerosos elementos encontrados durante las excavaciones arqueológicas, tales como: entierros, hornos, casas, canales, bordos, artefactos (Fig. 6); entre otros. Este desarrollo cultural comenzó alrededor de 1500aC con dos fases: San Pedro (ca. 1500/1200 a 800 aC.) y Ciénega (800 aC.-ca. 200 dC) (Huckell, 1995, 1996).

Debido a la fuerte erosión provocadas por el viento y el agua, los vestigios de los canales quedan expuestos, lo que ha permitido a los arqueólogos conocer la red de irrigación del sitio.

Análisis adicionales realizados en los contenidos de los hornos (Fig. 6) revelan que aunque el maíz fue un importante recurso, los elementos silvestres como el amaranto, mezquite, y algunos cactus fueron el elemento principal de los grupos humanos (Diehl, 2005, Mabry 2008). Esto nos muestra, que mientras el maíz fue el principal alimento para Mesoamérica, en el norte de México fungió como un complemento en su dieta de recolección y caza (Carpenter y Sánchez, 2012).

A partir de los estudios paleopedológicos aquí expuestos, existe registro de que para el Holoceno comenzó una etapa de aridización en la región, lo que provocó una disminución en el recurso del agua para los procesos de cultivación. A pesar de lo anterior, y a partir de las evidencias arqueológicas, se ha visto que los grupos humanos, por medio de un sistema de canales para la irrigación lograron una intensificación de las estrategias agrícolas. Dicho sistema también fue registrado para el EAP en el sitio arqueológico Las Capas, Tucson, (Herr, 2009; Vint, 2018); en relación a lo anterior, podemos pensar que este sistema era ampliamente utilizado entre los agricultores tempranos del suroeste de EUA y noroeste de México. El éxito de la agricultura en climas semiáridos tiene antecedentes desde el Neolítico en las regiones

áridas de Asia (Israel, Jordania, Yemen), África; norte y Sudamérica (EUA, México, Perú, Chile), a través de la implementación de sistemas de recolección de agua de lluvia (Bruins et al 1986).

5.6 Correlación entre La Playa y El Gramal

El perfil Gramal estudiado en el sitio del mismo nombre, muestra la presencia de un suelo pardo rojizo (Figs. 14 y 28), suelo que muestra características similares a las del SRP localizado en el sitio La Playa (Fig. 31). El material parental que conforma el suelo del perfil Gramal es de origen aluvial y está constituido principalmente por plagioclasas y cuarzo (Fig. 29).

Este suelo pardo rojizo tiene una estructura bien desarrollada la cual se caracteriza por la neoformación e iluviación de arcilla (Fig. 29b), el intemperismo de minerales primarios; además, de la presencia de características reductomórficas (Fig. 29c). Adicionalmente, en este paleosuelo se pueden encontrar abundantes carbonatos pedogénicos de tipo micrítico dentro de la matriz (Fig. 29f). Esta característica, al igual que en las secuencias de La Playa se interpreta como el resultado de la lixiviación de carbonato procedente de los horizontes superiores hacia la parte inferior. Particularidades como la iluviación de arcilla y la migración de carbonatos, son procesos que ocurren entre los 1,000 y 10,000 años aproximadamente (Targulian y Krasilnikov, 2007), lo que implica largos periodos de estabilidad de la superficie sin sedimentación.

En cuanto a la relación de los procesos antes mencionados y las edades de radiocarbono (Fig. 31, Tabla 4), sabemos, a partir del fechamiento de los carbonatos secundarios que el periodo de pedogénesis se extiende alrededor de los 18,000 años cal AP. Desafortunadamente no pudimos obtener una datación del horizonte orgánico, debido a que no se encontró, probablemente a consecuencia de la erosión del sitio (Fig. 28).

Referente a la historia deposicional del sitio, Gaines et al (2009b) explica que en los últimos 24,000 años se ha registrado una serie de eventos eólicos y aluviales como

resultado de cambios climáticos drásticos. Hoy en día, aún es posible observar parte de esa inestabilidad climática a través de las dunas activas que se encuentran en el lugar.

Por otro lado, Sánchez et al (2017) estableció que El Gramal corresponde a un sitio con un registro deposicional de sedimentos eólicos, aluviales y paleosuelos con más de 7 m de historia; por medio de fechas de radiocarbono y luminiscencia óptica se dio a conocer que los suelos y sedimentos del sitio tienen un registro de más de 70,000 años (Fig. 10) (Sánchez et al., 2017).

Respecto a la gran duna localizada en la zona central del sitio, sabemos se encuentra activa y sus dimensiones son de varios kilómetros. Los restos arqueológicos revelan que todo el rango de ocupación humana está presente en el sitio; desde los cazadores Clovis, pasando por los cazadores-recolectores arcaicos del Holoceno temprano y medio; los grupos recolectores y pescadores Seri; hasta los grupos de tiempos relativamente recientes (Fig. 10) (Gaines et al. 2009^a, 2009b; Sanchez et al. 2008; Sanchez 2010).

En cuanto a las condiciones paleoclimáticas, creemos que el suelo pardo rojizo, al igual que el suelo SRP se formó bajo condiciones ligeramente más húmedas en relación a las actuales, condiciones que no fueron de forma continua, ya que hay registro de periodos secos, en donde se formaron carbonatos pedogenéticos y periodos húmedos en donde ocurrió el intemperismo y la iluviación de arcilla (Fig. 29), procesos que se fueron alternando.

El suelo pardo rojizo integra información relacionada al Altitermal, de ahí, la ausencia de los horizontes orgánicos de la secuencia estudiada. Lo anterior concuerda con lo también observado dentro de el sitio de La Playa (Fig. 31).

Finalmente, este momento de estabilidad fue interrumpido por un periodo de inestabilidad, el cual, a diferencia del el sitio de La Playa, no desarrolló un paquete sedimentario de facies aluviales, sino más bien sedimentos de duna relacionados a procesos eólicos (Fig. 31).

Sobre las bases de las consideraciones anteriores, proponemos que el suelo SRP de La Playa y el suelo pardo rojizo de El Gramal, tienen relación en cuanto a génesis y temporalidad; sin embargo, el desarrollo sedimentario que los va a caracterizar tendrá diferente origen. De este modo, La Playa, localizada dentro de un abanico aluvial formará un intervalo sedimentario a partir de facies aluviales; mientras que, El Gramal, localizado en la costa, formará un paquete sedimentario a partir de procesos eólicos de duna; así entonces, el material sedimentario estará relacionado a la geoposición de cada sitio (Fig. 31).

EL GRAMAL

LA PLAYA

Cuatro Suelos

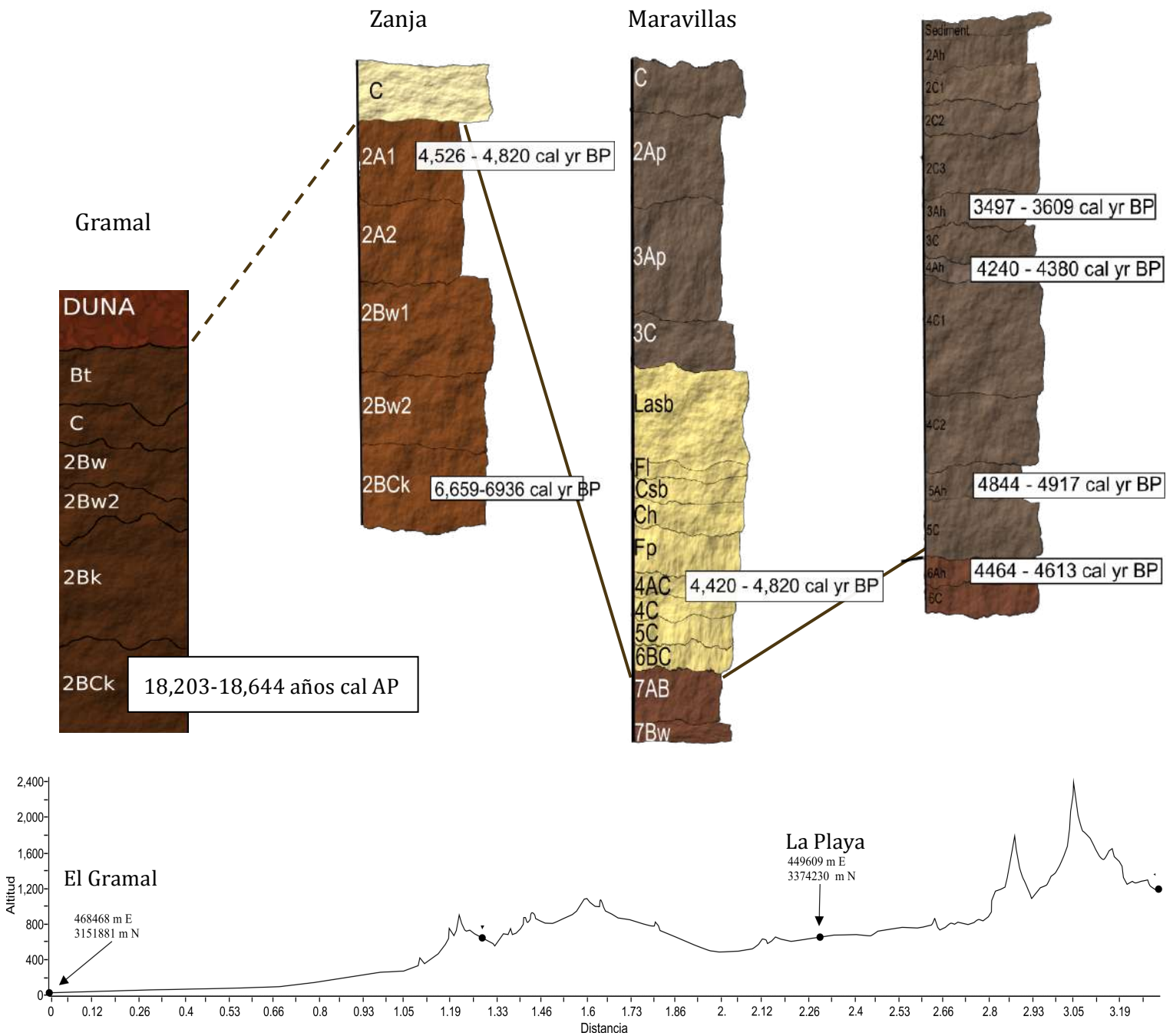


Fig. 31. Arriba. Correlación estratigráfica de los perfiles trabajados: Gramal, Zanja, Maravillas y Cuatro Suelos. Abajo. Mapa topográfico con los sitios: El Gramal y La Playa.

CAPÍTULO 6 - CONSIDERACIONES FINALES

1- La historia paleoambiental del sitio de La Playa, desde el Pleistoceno tardío hasta el Holoceno tardío, es muy compleja; sin embargo, a partir de las secuencias estudiadas y con base en la recopilación de los trabajos anteriormente realizados en el sitio puede considerarse lo siguiente.

2- El SRP corresponde a la unidad pedostratigráfica más antigua, y es producto de un largo período de estabilidad paisajística. No obstante, su pedogénesis fue interrumpida por una etapa de fuerte inestabilidad climática causando erosión del SRP y una importante sedimentación, lo que dio lugar a la formación del intervalo sedimentario (SI) justo al final del Altitermal. En cuanto al BOP, éste se formó en el Holoceno tardío y corresponde al paleosuelo más joven, está menos desarrollado y fuertemente afectado por la ocupación de EAP, información que fue corroborada con los resultados de polen recolectados en el perfil Cuatro Suelos.

3- Por lo anterior, se propone que las condiciones ambientales durante el Altitermal fueron más húmedas (con mayores precipitaciones) lo que aumentó los procesos geomorfológicos. Durante esta etapa, fue que se registraron las primeras evidencias de cultivo de maíz (alrededor de 4,200 años AP) (Sánchez, 2016), este aumento en las precipitaciones podría ser un atractor para las sociedades agrícolas. Lo anterior se relaciona bien con el registro de polen ya que se halló polen tipo cereal alrededor de los 4,500 años AP en el perfil Cuatro Suelos indicando actividades de cultivo en el sitio. Sin embargo, dichas condiciones no fueron permanentes, y los ambientes más secos aparecieron durante el comienzo del Holoceno tardío con la presencia de vegetación más seca. En consecuencia, los habitantes de La Playa tuvieron que implementar estrategias para sostener sus actividades.

REFERENCIAS

Alley, R. B. 2000. The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland - Quaternary Science Reviews. Vol. 19, No. 1.

Alley, K.D., 2002. On the Banks of the Ganga: When Waste Water Meets a Sacred River. Ann Arbor: University of Michigan Press.

Andersen BG, Lundqvist J, and Saarnisto M. 1995. The Younger Dryas margin of the Scandinavian Ice Sheet – An introduction - Quaternary International 28.

Anderson R. S. y Van Devender T. R., 1995. Vegetation history and paleoclimates of the coastal lowlands of Sonora, Mexico-pollen records from packrat middens - Journal of Arid Environments 30.

Andersson G. 1896. Svenska vaˆxtvaˆrldens historia. Stockholm: P.A. Norstedt & Soˆner.

Antevs, E., 1948. The Great Basin, with emphasis on Glacial and Postglacial times. University of Utah Bulletin 38 (20), 168-191.

Antevs, E., 1955. Geologic-climatic dating in the West. American Antiquity 20, 317-335.

Antinao, J.L., McDonald, E., 2013. An enhanced role for the Tropical Pacific on the humid Pleistocene-Holocene transition in southwestern North America. Quaternary Science Reviews 78, 319–341.

Arroyo-Cabrales J., Carreˆno A.L., Lozano-Garcıa S., Montellano-Ballesteros M., 2008. La diversidad en el pasado - Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México.

Asmerom, Y., polyak, V.J., rasmussen, J., Burnsc, S. J., Lachniet, M., 2013. Multidecadal to multicentury scale collapses of Northern Hemisphere monsoons over the past millennium. Proceeding of the National Academy of Sciences 110 (24), 1-6.

Ayala, R., E. 2018. Control paleopedológico en la configuración del relieve actual del abanico aluvial de La Playa, Sonora. Tesis que para optar por el grado de Maestrıa en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geologıa, UNAM.

Ballenger, J.A.M., Holliday, V.T., Kowler, A.L., Reitze, W.T., Prasciunas, M., Miller, S., Windingstad, J.D., 2011. Evidence for Younger Dryas global climate oscillation and human response in the American Southwest - Quaternary International 242.

Barceinas H., 2015. Uso de propiedades magnéticas en suelos como indicadores paleo-ambientales y de actividades humanas antiguas. Tesis Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geologıa. UNAM.

- Barron, J.A., Bukry, D. and Bischoff J. 2004. High resolution paleoceanography of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the past 15 000 years - *Marine Micropaleontology*, No. 50.
- Berry, C.F. and Berry M.S., 1986. Chronological and Conceptual Models of the Southwestern Archaic. En *Anthropology of the Desert West: Essays in Honor of Jesse D. Jennings*, editado por C.J. Condie and D.D. Fowler, pp. 253-327. *Anthropological Papers* No. 110. University of Utah Press, Salt Lake City
- Betancourt, J., 1990. Late Quaternary Biogeography of the Colorado Plateau, en *Packrat Middens: The Last 40,000 Years of Biotic Change*, editado por J.L. Betancourt, T.R. VanDevender y P.S. Martin, Tucson, University of Arizona Press.
- Birkeland, P. W., 1990. Soil-geomorphic research - a selective overview - *Geomorphology*, 3. Elsevier Science Publishers, Amsterdam Holland.
- Bond, G. 1992. Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial period - *Nature*, 360.
- Bond, G., Broecker, W.S., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J., and Bonani, G., 1993. Correlations between climate records from North Atlantic sediment and Greenland ice - *Nature*, 365.
- Bond, G.C., y Lotti, R., 1995. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science* 267, 1005.
- Booth, R.K., Jackson, S.T., Forman, S.L., Kutzbach, J.E., Bettis, III, E.A., Kreig, J. and Wright D.K., 2005. A severe centennial-scale drought in midcontinental North America 4200 years ago and apparent global linkages. *The Holocene*. 15 (3): 321-328
- Brauer A, Endres C, Günter C, Litt T, Stebich M, and Negendank JFW. 1999. High resolution sediment and vegetation responses to Younger Dryas climate change in varved lake sediments from Meerfeld Maar, Germany - *Quaternary Science Reviews* 18.
- Bronger A. y Catt J.A., 1989. Paleosols: problems of definitions, recognition and interpretation-Catena supplement.
- Bronger, A., R. Winter y S. Sedov., 1998. Weathering and clay mineral formation in two Holocene soils and in buried paleosols in Tadjikistan : toward a Quaternary paleoclimatic record in Central Asia - *Catena* 34.
- Bruins, H.J., Evenari, M., Nessler, U., 1986, Rainwater-harvesting agriculture for food production in arid zones: the challenge of the African famine: *Applied Geography*, 6. 13-32.

Brunelle, A., Minckley, T.A., Blissett, S., Cobabe, S.K., Guzman, B.L., 2010. A ~8000 year fire history from an Arizona/Sonora borderland ciénega. *Journal Arid Environments* 74, 475–481.

Bull, W. B. 1991 *Geomorphic Responses to Climatic Change*. Oxford University Press.

Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., and Babel, U., 1985. *Handbook for Soil Thin Section Description*. Waine Research Publications, Wolverhampton, UK.

Cabadas Báez H. 2007. *Paleosuelos del Centro de México como indicadores de cambios ambientales ocurridos durante los últimos 30,000 años*. Tesis Posgrado en Ciencias de la Tierra - Instituto de Geología, UNAM, México.

Caballero-Miranda M., Lozano-García S., Vázquez-Selem L., Ortega B., 2010. Evidencias de cambio climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el Último Máximo Glacial - *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* vol. 62, núm. 3.

Caballero-Miranda, M., Ortega, B., Valadez, F., Metcalfe, S.E., Macías J.L., Sugiura Y., 2002. Sta. Cruz Atizapán: a 22-ka lake level record and climatic implications for the late Holocene human occupation in the upper Lerma basin, central Mexico - *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 186.

Camou, E., 1998. De rancheros, poquiteros, orejones y criollos: Los productores ganaderos de Sonora y el mercado internacional. *El Colegio de Michoacán*. Zamora, Michoacán, pp. 55-57.

Carlson, A. E. 2010. What Caused the Younger Dryas Cold Event? - *The Geological Society of America*, 38.

Carpenter, J., 2009. La Playa, Sonora, en: *Arqueología Mexicana*, vol. XVII. no. 97.

Carpenter, J., Sánchez G., y Villalpando E., 2002. Of Maize and Migration: Mode and Tempo in the Diffusion of *Zea mays* in Northwest Mexico and the American Southwest. En *Traditions, Transitions, and Technologies: Themes in Southwestern Archaeology*, editado por Sarah Schlanger. University of Colorado Press, Boulder.

Carpenter, J., Villalpando, M.E., Sánchez, G., Martínez, N., Montero, C., Morales, J.J., and Villalobos, C., 2003. Proyecto Arqueológico La Playa: Quinto Informe de la Temporada Verano 2002, Análisis de los Materiales Arqueológicos y Propuesta para la Temporada Invierno 2003. Unpublished site report submitted to INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia), Hermosillo, Sonora, México.

Carpenter, J., Sánchez, G., and Villalpando, E., 2005. The Late Archaic/Early Agricultural Period in Sonora, Mexico, in: Vierra, B. (Ed.). *New Perspectives on the Late Archaic Across of the Borderlands*, University of Texas Press, Austin.

Carpenter, J., Sánchez, G., y Villalpando, E., 2007. El Período de Agricultura Temprana en Sonora. *Memoria del Seminario de Arqueología del Norte de México*, editado por Cristina García M. y Elisa Villalpando C. pp. 59-78. Coordinación Nacional de Arqueología/Centro INAH Sonora. Hermosillo, Sonora.

Carpenter, J., Villalpando, E., Sánchez, G., 2009. La Playa: an early agricultural period landscape. *Archaeology Southwest* 23 (1).

Carpenter J., y Sánchez G., 2012. 4000 años de Cultivo: la llegada del maíz y los inicios de la agricultura prehispánica en Sonora. Ponencia presentada en el XXV Simposio de Historia "Alimentación y Desarrollo en el Noroeste de México. Perfil y Carácter", Hermosillo, Sonora

Carpenter, J., Sánchez, G., 2013. Los cambios ambientales del Holoceno medio/Holoceno tardío en el Desierto de Sonora y sus implicaciones en la diversificación del yutoazteca y la difusión del maíz. *Diálogo Andino* 41, 199-210. Chile.

Carpenter, J., Sánchez, G., Watson, J. Villalpando, E., 2015. The La Playa Archaeological Project: Binational interdisciplinary research on long-term human adaptation in the Sonoran Desert. *Journal of the Southwest Special Issue: Seeds in the Sand: Emerging Approach for Understanding the Sonoran Desert*, Volume 57, Numbers 2 and 3, Summer-Autum 2015, pp. 213-264.

Carpenter, J., Sánchez, G., Solleiro, E., 2017. Informe de las actividades de campo y laboratorio realizadas en el sitio El Gramal (SON:I:12:21) 2016 dentro del proyecto Adaptaciones humanas y cambios climáticos en el Desierto de Sonora. INAH-UNAM, México.

Childe, V. G., 1928. *The most ancient east. The oriental prelude to european prehistory*. London.

Childe, V. G., 1936. *Man Makes Himself*, London, Watts and Co.

Chung S.L. et al. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago, *Nature* 394.

Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W., McCabe, A.M., 2009, *The Last Glacial Maximum - Science*, 325.

Cohen M., 1977. *The food crisis in Prehistory*. New Haven: Yale University Press.

- COHMAP Members. 1988. Climatic Changes of the last 18,000 years: observations and model simulations. *Scienc*. 241.
- Copeland, A., Quade, J., Watson, J.T., Mclaurin, B.T., Villalpando, E., 2012. Stratigraphy and geochronology of La Playa archaeological site, Sonora, Mexico. *Journal of Archaeological Science* 39, 2934-2944.
- Cruz y Cruz T. 2011. Paleoambientes del Cuaternario tardío en Sonora a partir del registro paleopedológico. Tesis Posgrado en Ciencias de la Tierra - Instituto de Geología, UNAM, México.
- Cruz y Cruz T., Sedov S., Sánchez G., Pi-Puig T., Pustovoytov K., Barceinas-Cruz H., Ortega-Guerrero B. y Solleiro - Rebolledo E. 2014. Late Pleistocene - Holocene palaeosols in the north of Sonora, Mexico: chronostratigraphy, pedogenesis and implications for environmental history - *European Journal of Soil Science* 65.
- Cruz y Cruz T., Sánchez G., Sedov S., Terrazas-Mata A., Solleiro-Rebolledo E., Tovar-Liceaga R.E., Carpenter J. 2015. Spatial variability of Late Pleistocene/Early Holocene soil formation and its relation to early human paleoecology in Northwest Mexico - *Quaternary International* 365.
- Davis, O., 1984. Multiple Thermal Maxima During the Holocene. *Science* 225.
- Davis, Owen K, and Shafer D., 1992. A Holocene Climatic Record from the Sonoran Desert from Pollen Analysis from the Moctezuma Well, Arizona. *Paleogeography, Paleoclimatology - Paleoecology* 92.
- Dean, W. E., 2006. The Geochemical Record of the Last 17,000 Years in the Guaymas Basin, Gulf of California - *Chemical Geology*, No. 232.
- Diamond J., y Bellwood, P., 2003. Farmers and their languages: The first expansions. *Science* 300 (5619): 597-603.
- Diehl, M.W., 2005. Early Agricultural period foraging and horticulture in Southern Arizona: implications from plant remains. En: Diehl MA. *Subsistence and resource use strategies of early agricultural communities in Southern Arizona. Anthropological papers*. No . 34, Tucson.
- Diehl, M.W., 2009. Early Agricultural period food provisioning and foraging. *Archaeology Southwest*, 23(1), 12.
- Dixon, E.J., 2001. Human colonization of the Americas: timing, technology and process- *Quaternary Science Reviews*. No. 20, pp. 277-299.

- Dodonov A.E., Sadchikova T.A., Sedov S., Simakova A.N y Zhou L.P.,2006. Multidiciplinary approach for paleoenvironmental reconstruction in loess – paleosol studies of the Darai Kalon section, Southern Tajikistan – Quaternary International no. 152 – 153.
- Duplessy J.C, E. Bard, L. Labeyrie, J. Duprat, J. Moyes. 1993. Oxygen Isotope Records and Salinity Changes in the Northeastern Atlantic Ocean during the Last 18,000 Years – Paleoceanography, vol 8.
- Eissmann, L., 1994. Grundzüge der Quartäogeologie Mitteldeutschlands (Sachsen-Anhalt, Südbrandenburg, Thüringen). In: Das Quartär Mitteldeutschlands (eds. L. Eissmann and T. Litt.). Altenb. Naturwiss. Forsch., 7.
- Evans, M. E. and Heller, F., 2003. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics. Academic Press.
- Exon Neville, Jim Kennett, Mitch Malone, Henk Brinkhuis, George Chaproniere, et al., 2002, Drilling reveals climatic consequences of Tasmanian gateway opening, EOS.
- Faegri, K., Iversen, L., 1989. Textbook of pollen analysis. John Wiley & Sons, Amsterdam.
- Fanning, Delvin S. and Mary C.B. FANNING., 1989. Morphology, genesis, and classification. John Wiley and Sons. New York. USA.
- FAO-UNESCO., 1988. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Clave de unidades de suelos del mundo, mapa mundial de suelo.
- Fernández Armesto, F., 2002. Civilizaciones. La lucha del hombre por controlar la naturaleza. Madrid: Taurus.
- Flohn, H., 1970. Clima y Tiempo. Madrid: Guadarrama.
- Foth D.H., 1997. Fundamentos de la ciencia del suelo. Compañía editorial continental S.A. de C.V, México.
- Gaines, Edmund P., Guadalupe Sanchez and Vance Holliday2009b Geoarchaeology of El Gramal a Multi-component site in central Sonora, México. Poster presented at the Society for American Archaeology, April 2009 Atlanta, Georgia,
- Genty D, et al. 2006. Timing and dynamics of the last deglaciation from European and North African d13C stalagmite profiles-comparison with Chinese and Southern Hemisphere stalagmites - Quaternary Science Reviews 25.

- Gibbard, P.L., Zalasiewicz J.A., Mathers S.J., 1998. Stratigraphy of the marine Plio-Pleistocene crag deposits of East Anglia. *Meded. Nederl. Inst. V. Toegepaste Geowetensch. TNO.* 60.
- Gribbin, J., 1986. *La Tierra en movimiento.* Barcelona.
- Grimm, E.C., 2004. Illinois State Museum, Research and Collections Center, Springfield, IL: Tilia Graph.
- Guilderson, T.P., Fairbanks R.G. y Rubenstone J.L., 1994. Tropical temperatures variations since 20,000 years ago: Modulating interhemispheric climate change - *Science* 263.
- Harlan, J. R., 1995. *The Living Fields: Our Agricultural Heritage.* Cambridge: Cambridge University Press
- Hartz I and Milthers V. 1901. Det senglacie ler i Allerød tegelværksgrav. *Meddelelser Danks Geologisk Foreningen* 8.
- Hayden, B., 1990. Nimrods, piscators, pluckers and planters: The emergence of food production, *Journal of Anthropological Archaeology* 9, 31-69.
- Heine, K. 1994. Present and past geocryogenic processes in Mexico - Permafrost and Periglacial Processes, 5.
- Heinrich, H., 1988. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years. *Quaternary Research* 29, 142-152.
- Heiri O, Cremer H, Engels S, Hoek WZ, Peeters W, and Lotter AF. 2007. Lateglacial summer temperatures in the northwest European lowlands: A chironomid record from Hijkermeer, the Netherlands - *Quaternary Science Reviews* 26.
- Hemming, S.R., 2004, Heinrich events: massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint. *Review of Geophysics* 42, RG1005.
- Hemming, S.R., 2009. Heinrich events. *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, 409-414.
- Herr, S., 2009. The latest research on the earliest farmers: *Archaeology southwest*, 23 (1), 1-3.
- Hernando, A., 1994. El proceso de neolitización, perspectivas teóricas para el estudio del neolítico. *Zephyrus*, n. 46; pp. 123-142.
- Heusser, C.J., 1971. Spore of Chile. Modern Types of the Pteridophyta, Gymnospermae and Angiospermae. The University of Arizona Press, Tucson Arizona, 167pp.

Hodell D., Curtis J., Jones G., Higuera – Gundy, A., Brenner, M., 1991. Reconstruction of Caribbean climate change over the past 10, 500 years, *Nature* 352.

Holliday, V.T., 1989. Middle Holocene Drought on the Southern High Plains. *Quaternary Research* 31.

Holliday, V.C., Haynes, Jr., Hofman, J.L., Meltzer, D.L., 1994. *Geoarchaeology and Geochronology of the Miami*

Holmgren, C.A., Peñalba, M., Rylander, K.A., Betancourt, J.L., 2003. A 16,000 14 C yr B.P. packrat midden series from the U.S.A.eMexico Borderlands. *Quaternary Research* 60.

Holmgren, C.A., Norris, J. and Betancourt, J. L. 2006. Inferences about winter temperatures and summer rains from the late Quaternary record of C4 perennial grasses and C3 desert shrubs in the northern Chihuahuan Desert. *J. Quaternary Sci.*, Vol. 22 pp. 141–161. ISSN 0267-8179.

Holmgren, C.A., Norris, J., Betancourt, J.L., 2007. Inferences about winter temperatures and summer rains from the Late Quaternary record of C4 perennial grasses and C3 desert shrubs in the northern Chihuahua Desert. *Journal of Quaternary Science* 22, 141-161.

Holmgren, C.A., Pen M.C., Rylander K.A., Betancourt. J.L., 2003. A 16,000 14 C yr B.P. packrat midden series from the USA–Mexico Borderlands - *Quaternary Research*, No. 60.

Huckell, B.B., 1995. Of marshes and maize: Preceramic agricultural settlements in the Cienega Valley, southeastern Arizona. *Anthropological Papers of the University of Arizona* Number 59. Tucson, AZ: The University of Arizona Press.

Huckell, B.B., 1996. The archaic prehistory of the North America Southwest. *Journal World Prehistory* 10, 305- 373.

Ibarra, G., Solleiro-Rebolledo, E., Ayala, E., Cabadas, H., López-Martínez, R., 2018. Paleopedogenesis and sedimentation in La Playa archaeological site, Sonora: evidences of the paleoenvironmental conditions from landscape to micromorphology. *Spanish Journal of Soil Science* 8, 275-292.

Ibarra, G., Solleiro-Rebolledo, E., Chávez, B., Sedov, S., Ortega-Rosas, C., Sánchez, G., Gamez, G., Barceinas-Cruz, H., Ayala, E., 2019. Environmental setting of the early irrigation in Oasisamerica: paleopedological evidences from the alluvial palaeosols in la Playa/Sonoran Desert. *Quaternary International*.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.09.041>.

- Imbrie, J., Hays, J. D., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., 1984. The orbital theory of Pleistocene climate: support from a revised chronology of the marine $\delta^{18}O$ record - Milankovitch and Climate (A. Berger, J. Hays, G. Kukla, and B. Salzman, eds.). Dordrecht: Reidel.
- Imbrie, J., Mix, A. C., Martinson, D.G., 1993. Milankovitch theory viewed from Devils Hole - Nature, v. 363.
- Kershaw, A.P., and Nanson, G.C. 1993. The last full glacial cycle in the Australian región - Global and Planetary Change, 7.
- Kirchhoff, P., 1954-55. Calendario tenochca, tlatelolca y otros. Revista Mexicana de Estudios Antropológicos, Vol. 14 :257-267, México
- Kudrass H. R., H. Erlenkeuser, R. Vollbrecht, W. Weiss. 1991. Global nature of the Younger Dryas cooling event inferred from oxygen isotope data from Sulu Sea cores - Nature 349.
- Labeyrie, L. 2000. Glacial Climate Instability. Science. 290.
- Labeyrie, L., Cole J., Alveson K., y Stocker T., 2003. The History of Climate Dynamics in the Late Quaternary. En: Alverson, K. D; R. S. Bradley y T. F. Pedersen (eds.). Paleoclimate, Global Change and the Future. Springer-Verlag.
- Labeyrie, L., Skinner, L., Cortijo, E., 2006. Sub-Milankovitch (DO/Heinrich) Events - Elias, S.A. (ed.), Encyclopedia of Quaternary Science, Vol. III, Elsevier, 1964-1974.
- Lachniet, M.S., y Vázquez-Selem L. 2005. Last glacial equilibrium lines altitudes in the circum-Caribbean (Mexico, Guatemala, Costa Rica, Colombia, and Venezuela) - Quaternary International 138-139.
- Lagerlöf, J., 2002. The importance of field boundaries for earthworms (Lumbricidae) in the Swedish agricultural landscape-Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 89, Issues 1-2, 91-103.
- Licciardi JM, Kurz MD, and Curtice JM. 2007. Glacial and volcanic history of Icelandic table mountains from cosmogenic ^3He exposure ages - Quaternary Science Reviews 26.
- Liu, Z., Otto-Bliesner, B., He, F., Brady, E., Tomas, R., Clark, P., et al., 2009. Transient Simulation of Last Deglaciation with a New Mechanism for Bølling-Allerød Warming - Science , 325.
- López, A., y López, L., 2011. El pasado indígena. Fondo de Cultura Económica. El Colegio de México, México.

- Lozano, M.S., 2007. Evidencia de cambio climático: cambios en el paisaje, en: A. Fernández B. Y Julia Martínez (comp). Cambio climático: una visión desde México. 3ª Reimp. INE, SEMARNAT, México.
- Lozano-García, M.S., Ortega-Guerrero B., y Sosa-Nájera S., 2002. Mid-to Late Wisconsin Pollen Record of San Felipe Basin, Baja California - Quaternary Research. No.58.
- Lubbock J., 1865, Pre-historic Times, As Illustrated by Ancient Remains, and the Manners and Customs of Modern Savages, London: Williams and Norgate
- Mabry, J.B., Deborah, L., Swartz, Helga, Wocherl, Jeffrey, J. Clark, Gavin, H. Archer, Michael, W. Lindeman (Eds.), 2002. Archaeological Investigations of Early Village Sites in the Middle Santa Cruz Valley. Center for Desert Archaeology, Tucson, Arizona.
- Mabry, J., Carpenter, J., Sánchez, G., 2008. Archaeological Models Of Early Uto-Aztecan Prehistory in the Arizona-Sonora Borderlands. En *Archaeology Without Borders: Contact, Commerce, and Change in the U.S. Southwest and Northwestern Mexico*, editado por Laurie Webster y Maxine McBrinn.
- Mabry, J., 2008b. Introduction. Chapter 12: Las Capas; Early irrigation and sedentism a southwestern floodplain. Anthropological paper, no. 28. Center for Desert Archaeology. Tucson.
- McAuliffe J. R., y Van Devender T., 1998. A 22,000-year record of vegetation change in the north-central Sonoran Desert-Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. No. 141.
- Martin, S. P., 1963. *The Last 10,000 Years*. The University Arizona Press. Arizona.
- Martin, M.M., 2017. La revolución neolítica ¿Por qué adoptar la agricultura y una forma de vida sedentaria?, Departamento de Prehistoria. Universidad Complutense de Madrid.
- Mark, B.G., and Helmens, K.F., 2005. Reconstruction of glacier equilibrium-line altitudes for the Last Glacial Maximum on the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia: climatic and topographic implications. *J. - Quaternary Sci.*, Vol. 20.
- Maslin, M.A., y Shackleton, N.J., 1995. Surface water temperatures, salinity, and density changes in the northeast Atlantic during the last 45,000 years: Heinrich events, deep water formation, and climatic rebounds. *Paleoceanography* 10, 527-544.
- Mastrolonardo, G., Francioso, O., Di Foggia, M., Bonora, S., Rumpel, C., Certini, G., 2014. Application of thermal and spectroscopic techniques to assess fire-induced changes to

soil organic matter in a Mediterranean forest. *Journal of Geochemical Exploration* 143:174-182. 10.1016/j.gexplo.2014.04.010.

Mayewski, P.A., Meeker, L.D., Morrison, M.C., Twickler, M.S., Whitlow, S., Ferland, K.K., Meese, D.A., Legrand, M.R., y Steffenson, J.P., 1993. Greenland ice core "signal" characteristics: An expanded view of climate change, *J. Geophys. Res.*, 98, 12,839-12,847.

Mayewski, P.A., Meeker L. D., Twickler M. S., Whitlow S., Yang Q., Lyons W. B., Prentice M., 1997. Major features and forcing of high latitude northern hemisphere atmospheric circulation using a 110,000 year long glaciochemistry series. *Jour - Geophys. Research*, 102C.

Mayewski, P.A., Rohling, E.E., Stanger, J.C., Karlén, W., Maasch K.A., Meeker, L.D., Meyerson, E.A., Gasse, F., Van Kreveld, S., Holmgren, K., Lee-Thorp, J., Rosquist, G., Rack, F., Staubwasser, M., Schneider, R.R., Steig, E.J., 2004. Holocene climate variability. *Quaternary Research* 62.

Mead, J.I., White, R.S., Baez, A., Hollenshead, M.G., Swift, S.L., Carpenter, M.C., 2010. Late Pleistocene (Rancholabrean) *Cynomys* (Rodentia, Sciuridae: prairie dog) from northwestern Sonora, Mexico. *Quaternary International* 217.

Mehring, P.J., Haynes Jr., C.V., 1965. The pollen evidence for the environment of early man and extinct mammals at the Lehner mammoth site, southeastern Arizona - *American Antiquity* 31.

Meltzer, D. J., 1991. Altithermal Archaeology and Paleoecology at Mustang Springs, on the Southern High Plains of Texas, *American Antiquity* 56.

Menking, K. M., y Anderson R. Y., 2003. Contributions of La Niña and El Niño to middle Holocene drought and Late Holocene moisture in the American Southwest. *Geology*. 31.

Metcalf, S., Say A., Black S., McCulloch., and O'Hara S., 2002. Wet Conditions during the Last Glaciation in the Chihuahuan Desert, Alta Babicora Basin, Mexico - *Quaternary Research* No. 57.

Metcalf, S.E., 2006. Late Quaternary Environments of the Northern Deserts and Central Transvolcanic Belt of Mexico. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 93 (2), 258-273.

Metcalf, S.E., Barron, J.A., Davies, S.J., 2015. The Holocene history of the North American Monsoon: known knowns and know unknowns in understanding its spatial and temporal complexity. *Quaternary Science Reviews* 120, 1-27.

- Mix, A.C., Bard, E., Schneider, R., 2001, Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG): Quaternary Science Reviews, 20.
- Molina-Garza, R.S. e Iridondo, A. 2005. La Megacizalla Mojave- Sonora: la hipótesis, la controversia y el estado actual de conocimiento. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen conmemorativo del Centenario Grandes Fronteras Tectónicas de México. 1. Tomo LVII. Instituto de Geología, UNAM. México. Pp.87-98.
- Nesje A. 2009. Latest Pleistocene and Holocene alpine glacier fluctuation in Scandinavia - Quaternary Science Reviews 28.
- Nordt, L. 2003. Late Quaternary fluvial landscape evolution in desert grasslands of northern Chihuahua, Mexico - Geological Society of America Bulletin No. 115.
- North, D. C. and Thomas, R. P., 1977. The first economic revolution. Economic History Review 30: 229–241.
- Núñez, E.E., Macfadden, B.J., Mead, J., Baez, A., 2010. Ancient forests and grasslands in the desert: Diet and habitat of Late Pleistocene mammals from Northcentral Sonora, Mexico. Paleogeology, Paleoclimatology and Paleoecology 297.
- Olsson, Ola., 2001. The rise of Neolithic agriculture, working paper in economics 57, Department of Economics, Goteborg University.
- Ortega-Rosas, C.I., Peñalba, M.C., Guiot, J., 2008. Holocene altitudinal shifts in vegetation belts and environmental changes in the Sierra Madre Occidental, Northwestern Mexico. Review of Palaeobotany and Palynology 151, 1–20.
- Ortega-Rosas, C.I., Vidal-Solano, J.R., Williamson, D., Peñalba-Garmendia, C., Guiot, J., 2017. Geochemical and magnetic evidence of change from winter to summer rainfall regimes at 9.2 cal ka BP in northwestern Mexico. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 465, 64–78.
- Perez-Cruz, L., 2006. Climate and ocean variability during the middle and late Holocene recorded in laminated sediments from Alfonso Basin, Gulf of California, Mexico. Quaternary Research 65, 401–410.
- Pérez, R.G., 1985. Geografía de Sonora. In: Historia General de Sonora I. Periodo Prehistórico y Prehispánico (ed A. Hopkins). Gobierno del Estado de Sonora, Hermosillo, Sonora.
- Peteet, D. M. 2009. Younger Dryas. In V. Gornitz, Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments. Dordrecht: Springer.

- Pillans, B., Chappell, J., Naish, T.R. 1998. A review of the Milankovitch climatic beat: template for Plio–Pleistocene sea-level changes and sequence stratigraphy - *Sedimentary Geology* No. 122.
- Plog S. 2008. *Ancient peoples of the American Southwest*. 2nd edition. London: Thames and Hudson.
- Polyak, V.J., Rasmussen, J., Asmerom, Y., 2004. Prolonged wet period in the southwestern United States through the Younger Dryas. *Geology* 32.
- Quijano, D., 2011. Del Neolítico a las sociedades urbanas del Próximo Oriente: Mesopotamia y Egipto. *Clío* 37. <http://clio.rediris.es>. ISSN: 1139-6237.
- Rahmstorf, S. 2002. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years - *Nature*, 419.
- Rasmussen, J.B.T., Polyak, V.J., Asmerom, Y., 2006. Evidence for Pacific-modulated precipitation variability during the late Holocene from the southwestern USA. *Geophysical Research Letter* 33, 1–4.
- Rasmussen SO, et al. 2006. A new Greenland ice core chronology for the last glacial Termination - *Journal of Geophysical Research* 111.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, ChB., Buck, C.E., Cheng, H., Lawrence, R.E., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hafliðason, H., Hajdas, I., Hatté, Ch, Heaton, T., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, Ch, Van der Plicht, J., 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon* 55 (4), 1869–1887.
- Retallack, G.J., 1990. *Soils of the past. An introduction to paleopedology*. Blackwell Science. U. K. pp. 404
- Rind, D. and Peteet, D. 1985. Terrestrial conditions at the last glacial maximum and CLIMAP sea surface temperature estimates: are they consistent? - *Quaternary Research* 24.
- Riser, J.A.M., 2002. *Quaternary geology and the environment*. Serie Springer-Praxis books in geophysical sciences. Springer, New York .
- Ritter, E.W., 1991. Los primeros bajacalifornianos: enigmas cronológicos, ecológicos y socioculturales en: *Estudios fronterizos*. Revista del Instituto de Investigaciones Sociales, UABC, no. 24-25, pp. 175-216.
- Rivet, P., 1995. *Los orígenes del hombre americano*. México. Fondo de Cultura Económica. Colección popular, no. 20

- Rhode, D., 2002. Early Holocene Juniper Woodland and Chaparral Taxa in the Central Baja California Peninsula, Mexico - Quaternary Research. No.57.
- Sánchez, G., 2010. Los Primeros Mexicanos: Late Pleistocene/Early Holocene Archaeology in Sonora. Tesis de Doctorado no publicada del School of Anthropology de la University of Arizona.
- Sánchez, G., and Carpenter, J., 2003. La ocupación del Pleistoceno Terminal/Holoceno Temprano en Sonora, México, en: Noroeste de México, CONACULTA-INAH, México; 27-34.
- Sánchez, G., Gaines, E4., Holliday, V., and Carpenter, J. 2008. Proyecto Geoarqueología y Tecnología Lítica de los sitios Paleoindios de Sonora: I Informe Técnico de las Investigaciones de Campo Enero-Febrero 2007 II. Analisis de los artefactos líticos recolectados durante la temporada 2005 y 2007 del Proyecto Geoarqueología y Tecnología Lítica de los sitios Paleoindios de Sonora y Apéndice 1: Resultados de fechamientos por radiocarbono y OSL del proyecto. Informe presentado al Consejo de Arqueología, Octubre, 2008
- Sánchez, G., Gaines, E., y Holliday, V., 2009. El Fin del Mundo, Sonora. Cazadores Clovis de megafauna del Pleistoceno terminal- Arqueología Mexicana, vol. XVII, no. 97, pp 46-49.
- Sanchez, G., and Carpenter, J., 2012. Paleoindian and Archaic Traditions in Sonora, Mexico. In From the Pleistocene to the Holocene: Human organization and cultural. Texas A&M University Press, pp. 125-148.
- Sandweiss, D., 1999. Transitions in the mid-holocene. Science, 283.
- Schott, A., 2017. Site Formation Processes and Depositional Environment of a Fine-Grained Alluvial Floodplain at La Playa Archaeology Site, Sonora, Mexico. Geoarchaeology 32, 283-301.
- Schulz M. et al. 1999, Amplitude variations of 1470-year climate oscillations during the last 100,000 years linked to fluctuations of continental ice mass, Geophysical Research Letters, 26, 22, 3385-3388
- Sher H. & E. Martin. 2006, Timing and climatic consequences of the opening of Drake Passage, Science, 312.
- Smith, V.L., 1975, The primitive hunter culture, Pleistocene extinction, and the rise of agriculture. Journal of Political Economy 83, 727-755.
- Stocker, T. F. y Marchal O., 2000. Abrupt climate change in the computer: Is it real?. Proceedings of the National Academy of Sciences. 97.

- Sugiura Y., 1988. La revolución neolítica a través de un análisis casuista, Jomon, Japón: la reevaluación del concepto de Childe. Coloquio V. Gordon Childe. Estudios sobre las revoluciones neolítica y urbana. IIA-UNAM.
- Targulian V.O. y Solokova, T.A., 1996. Soils as a biotic/abiotic natural system: a reactor, memory and regulator of biospheric interactions- Eurasian Soil Science, no. 29.
- Targulian V. O. y Krasilnikov P.V., 2007. Soil system and pedogenetic processes: Self – organization, time scales, and environmental significance – Catena, vol. 71, no 31.
- Taylor, C.V., Haynes, Jr., y Struiver, M., 1996. Clovis and Folsom age estimates: stratigraphic context and radiocarbon calibration-Antiquity, no. 70, pp515-525.
- Terrazas, M.A. y Benavente, M., 2006. Poblamiento temprano en el noroeste de Sonora. Región El Arenoso-El Sásabe. Informe técnico, temporada 2006. Archivo técnico del INAH. 99pp.
- Thompson, R., Whitlock, C., Bartlein, P., Harrison, S., and Spaulding, W. 1993. Climatic changes in the western United States since 18 , 000 BP. En: Global climates since the Last Glacial Maximum. University of Minnesota Press.
- Urban, B., 1995. Palynological evidence of younger Middle Pleistocene. Interglacials (Holsteinian, Reinsdorf and Schöningen) in the Schöningen open cast lignite mine (eastern Lower Saxony, Germany). Meded. Rijks Geol. Dienst, 52.
- Uriarte, A., 2003. Historia del Clima de la Tierra. 1a ed. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco, España.
- USDA., 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report no. 42. U.S. Department of Agriculture, National Resources Conservation Services, National Soil Survey Center.
- Van Devender, T.R., 1973. Late Pleistocene Plants and Animals of the Sonoran Desert: A Survey of Ancient Packrat Middens in Southwestern Arizona. Ph.D. Dissertation, Univ. of Arizona, Tucson.
- Van Devender, T.R., Spaulding, W.C., 1979. Development of vegetation and climate in the southwestern United States. Science 204.
- Van Devender, T.R., Thompson, R.S. y Betancourt, J.L., 1987. Vegetational history in the Southwest: The nature and timing of the late Wisconsin-Holocene transition. En North America and Adjacent Oceans During the Last Deglaciation, editado por Ruddiman,

- W.F. y H.E. Wright Jr. Geology of North America, Volume K-3, Geological Society of America, Boulder.
- Van Devender, T.R., 1990. Late Quaternary vegetation and climate of the Sonoran Desert, United States and Mexico, pp 134-165. In: Betancourt et al., editors. Packrat Middens: the last 40,000 years of biotic change, University of Arizona Press.
- Van Devender, T.R., Burgess, T.L., Felger, R.S., Turner R.M., 1990. Holocene vegetation of the Hornaday Mountains of northwestern Sonora, México. Proceedings of the San Diego Society of Natural History, 2:1-19.
- Van Devender, T. R., T. Burgess; J. Piper y R. Turner., 1994. Paleoclimatic implications of Holocene plant remains from the Sierra Bacha, Sonora, Mexico - Quaternary Research No. 41.
- Vázquez-Selem, L. 2007. Investigaciones de los glaciares y del hielo de los polos, en: A. Fernández B. y Julia Martínez (comp.). Cambio climático: una visión desde México. 3a. Reimp. INE, SEMARNAT, México.
- Vidal-Zepeda, R., 2005. Las regiones climáticas de México. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Villalpando, E., Carpenter, J., 2004. Proyecto Arqueológico La Playa, VI Informe, Temporada 2003. Análisis de los materiales arqueológicos. Archivo Técnico del INAH.
- Villalpando, E., y Carpenter J., 2005, Proyecto arqueológico La playa, VII Informe, Temporada 2004. Análisis de los materiales arqueológicos, 284pp.
- Villalpando E, Carpenter J, Watson J. 2007. Proyecto Arqueológico La Playa, VIII Informe, Temporadas 2005 y 2006. Archivo Técnico del INAH.
- Vint, J.M., 2018, The southwest archaic in teh Tucson Basin, in Vierra, B (ed.). The archaic southwest: foragers in an arid land, University of Utah Press. Southlake, Utah. 66-97.
- Von Grafenstein U., et al. 1999. A Mid-European Decadal Isotope-Climature record from 15, 500 to 5,000 years BP – Science 284.
- Wagner, J., Cole, J., Beck J., Patchett, P., Peachey, B., 2010. Moisture variability in the southwestern United States linked to abrupt glacial climate change. Nature Geoscience 3.
- Willard, D., Bernhardt, C.L., Weimer, L., Cooper, S., Gamez, D., Jensen, J., 2004. Atlas of Pollen and Spores of The Florida Everglades. Palynology 28, 175–227.

Winterhalder, B.; Kennett, D.J. 2006. Behavioral Ecology and the Transition from Hunting and Gathering to Agriculture. Berkeley: University of California Press, pp. 1-21.

World Reference Base for Soil Resources (WRB). 2006. World Soil Resource Reports no. 103. FAO, Rome 2007. IUSS Working Group WRB.

Zagwijn, W.H., 1996. The Cromerian Complex Stage of the Netherlands and correlation with other areas in Europe - The Early Middle Pleistocene in Europe (ed. Ch. Turner). Balkema. Rotterdam.

Pedosedimentary records of Holocene paleoenvironments in a dryland alluvial fan system in Sonora, NW-Mexico

Registros pedosedimentarios de paleoambientes del Holoceno en abanicos aluviales de zonas secas de Sonora, NO-México
Registros pedosedimentarios de paleoambientes do Holocénico em sistemas secos de cones aluvionares em Sonora, NW-México

Received: 05.05.2017 | Revised: 09.06.2018 | Accepted: 12.06.2018

AUTHORS

Ibarra G.^{@,1}
gigiotas81@yahoo.com.mx

Solleiro-Rebolledo E.²

Ayala E.¹

Cabadas H.³

López-Martínez R.²

® Corresponding Author

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510 Ciudad de México, México.

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. México

³ Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México. México

ABSTRACT

In this work we present a detailed micromorphological analysis of a sequence of palaeosols and sedimentary units at La Playa archaeological site. This sequence is from the Late Pleistocene (Marine Isotopic Stage 2) to the Late Holocene. Complementing the micromorphological study, a geomorphological analysis is provided, in order to establish the origin of the landscape units. The results show that according to the geomorphology, La Playa constitutes an alluvial fan, formed by a complex, braided channel. The older unit, the San Rafael Palaeosol (SRP) is the most developed and has a set of features associated with the changing paleoenvironmental conditions such as weathering of the primary minerals, clay illuviation (evidencing humid conditions of the Terminal Pleistocene), pedogenic carbonate accumulation in the A horizon (related to dry environments of Altithermal). The SRP is buried by fluvial sediments, which include different facies interpreted as: floodplain, sandbars, and channels. These sedimentation events are associated with the end of the Altithermal period and evidence more active geomorphic processes, probably due to strong storms causing flooding and the migration of the main tributary. Above the sedimentary unit, the Boquillas Palaeosol (BOP), formed during the Late Holocene, is derived from fluvial-alluvial deposits causing a syn-sedimentary soil, with a more incipient development as indicated by micromorphological features.

RESUMEN

En este trabajo presentamos un detallado análisis micromorfológico de una secuencia de paleosuelos y unidades sedimentarias en el sitio arqueológico La Playa. Esta secuencia se forma desde el Pleistoceno superior (Etapa Isotópica Marina 2) hasta finales del Holoceno. Complementando el estudio micromorfológico se proporciona un análisis geomorfológico para establecer el origen de las unidades paisajísticas. Los resultados muestran que de acuerdo con la geomorfología, La Playa constituye un abanico aluvial constituido por un complejo canal trenzado. La unidad más antigua, el Paleosuelo San Rafael (SRP) es la más desarrollada y tiene un conjunto de características asociadas a los cambios en las condiciones paleoambientales tales como la meteorización de los minerales primarios, iluviación de arcilla (que evidencian las condiciones húmedas de finales del Pleistoceno), acumulación de carbonatos pedogénicos en el horizonte A (relacionados con los ambientes secos del Altithermal). El SRP está enterrado por sedimentos fluviales, que incluyen diferentes facies interpretadas como: llanuras de inundación, barras de arena y canales. Estos eventos de sedimentación se asocian al final del período Altithermal y evidencian procesos geomórficos más activos, probablemente debido a fuertes tormentas que causaban inundaciones y la migración del principal afluente. Por encima de la unidad sedimentaria, el Paleosuelo Boquillas (BOP), formado durante finales del Holoceno, se deriva de depósitos fluvio-aluviales originando un suelo sin-sedimentario, con un desarrollo más incipiente como lo indican las características micromorfológicas.

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se uma análise micromorfológica detalhada de uma sequência de paleossolos e unidades sedimentares do sítio arqueológico de La Playa. Esta sequência formou-se desde o Plistocénico superior (Etapa Isotópica Marina 2) até aos finais do Holocénico. Complementando o estudo micromorfológico apresenta-se uma análise geomorfológica para estabelecer a origem das unidades de paisagem. Os resultados mostram que de acordo com a geomorfologia, La Playa constitui um cone aluvionar, constituído por um complexo canal entrançado. A unidade mais antiga, o Paleossolo San Rafael (SRP) é a mais desenvolvida e tem um conjunto de características associadas às alterações das condições paleoambientais, tais como a meteorização dos minerais primários, iluviação de argila (que evidenciam as condições húmidas do final do Plistocénico), acumulação de carbonatos pedogenéticos no horizonte A (relacionados com os ambientes secos do Altitérmico). O SRP está coberto por sedimentos fluviais, que incluem diferentes fácies interpretados como: planícies de inundação, barras de areia e canais. Estes eventos de sedimentação estão associados ao final do período Altitérmico e evidenciam processos geomorfológicos mais ativos, provavelmente devidos a fortes tempestades que causaram inundações e a migração do afluente principal. Acima da unidade sedimentar, o Paleossolo de Boquillas (BOP), formado durante os finais do Holocénico, deriva de depósitos fluvio-aluvionares originando um solo sin-sedimentar, com um desenvolvimento mais incipiente como é indicado pelas suas características micromorfológicas.

1. Introduction

Paleoenvironmental research in the northwest Mexico (extracted from different archives) has documented that during the Marine Isotope Stage (MIS) 2 (Last Glacial Maximum and late Glacial) the climate was more humid and cooler than today (Betancourt et al. 1990; Metcalfe et al. 1997, 2002; Ortega-Ramírez et al. 1998; Holgrem et al. 2003; Nordt 2003). On the contrary, the Holocene climate was characterized by an aridity trend that ended with the modern environmental conditions. The driest and warmest conditions prevailed during the Altithermal period (7,500 to 4,500 cal BP), which was defined by Antevs (1948), a period of severe aridity and drought, accompanied by intense erosion. The importance of this stage in SW United States – Northwest Mexico is the adaptive response of humans groups to such conditions (Meltzer 1999).

Several studies for the NW Mexico and S-SW United States have documented dry and warm conditions during that period (Gile and Grossman 1968; Nettleton et al. 1975; Byrne et al. 1979; Weide 1985; Holliday 1989; Smith and McFaul 1997). However, questions are still unanswered, such as: How warm and dry was this period? How did these environmental conditions impact human settlements? Were these conditions identical in the entire region (NW Mexico and SW United States)?

La Playa archaeological site, located in Sonora, NW Mexico, has a long history of human occupation (Carpenter et al. 2005; Carpenter 2009) and a well preserved record of paleosols formed during the Late Pleistocene and the Holocene (Cruz-y-Cruz et al. 2014). It represents a promising locality to document the regional environmental change in the Altithermal. Copeland et al. (2012) has established the stratigraphy of the Holocene units (Units B and C) concluding that the interaction between humans and the environment was

KEY WORDS

Palaeosols, micromorphology, geomorphology, Altithermal, alluvial fan facies.

PALABRAS

CLAVE

Paleosuelos, micromorfología, geomorfología, Altithermal, facies de abanicos aluviales.

PALAVRAS-

CHAVE

Paleossolos, micromorfologia, geomorfologia, Altitérmico, fácies de cones aluvionares.

very dynamic and that the increase in the settlements was driven by the favorable conditions occurring just after the Altithermal period. The paleopedological record at La Playa has shown two different pedogenetic pathways: one belonging to the Late Pleistocene-Middle Holocene (> 15,000 to 4,000 cal BP), characterized by the San Rafael Palaeosol (SRP); and another for the Late Holocene (< 4,000 cal BP), when the Boquillas palaeosol (BOP) formed (Cruz-y-Cruz et al. 2014). These two pedogenetic pathways do not evidence contrasting climatic conditions between the two periods of soil formation, but longer periods of landscape stability.

In consequence, the objective of this work is to reconstruct the environmental conditions that promote the formation of paleosols and sedimentary units at different scales of observation from landscape to micromorphology. With this information, to understand the interaction between the geomorphic processes related to stages of stability (when paleosols are formed) and instability (when sedimentation occurs) and the environmental conditions during the Altithermal period, contributing to a better understanding of the paleoenvironmental mosaic of the NW of Mexico.

2. Material and Methods

2.1. Characteristics of the study area

La Playa is located in Sonora state, northwest Mexico (Figure 1). The geology of the site is characterized by Late Cretaceous metasedimentary rocks (McLaurin et al. 2012). These rocks outcrop at the mountain crests (Sierra Boquillas), whereas extensive Quaternary alluvial sediments cover lower areas. The average annual temperature ranges from 18 to 22 °C and the average annual precipitation is 200 to 400 mm, with rainfall occurring between summer and winter (Vidal-Zepeda 2005). The predominant vegetation is desert shrub type, represented by mesquite (*Prosopis* spp.), palo verde (*Cercidium* spp.), ironwood (*Olesea tesota*), chollas and nopales (*Opuntia*), ocotillo (*Fouquieria splendens*), saguaro (*Carnegiea gigantea*), pitahaya (*Lemaireocereus turberi*), vinoramas (*Acacia anteccea*), candles and cat's claw (*Mimosa* spp.), vegetation of low hills and ridges (Pérez 1985).

The site has been extensively investigated because of the abundance of fossils of Pleistocene fauna such as prairie dog (*Cynomys ludovicianus*), bison, mammoths, camel (cf. *Camelops*), pronghorn (*Capromeryx* sp.) and tortoises (*Hesperotestudo* sp). (Mead et al. 2010), as well as archaeological material of early human occupation (Villalpando and Carpenter 2004; Carpenter et al. 2009). However, most of the human evidence belongs to the last 3,000 years (Carpenter et al. 2005; Carpenter 2009; Copeland et al. 2012).

La Playa, an alluvial fan or a fine-grained alluvial floodplain as described by Schott (2017), has an extension of at least 10 km² on both sides of the Río Boquillas. Today, the Río Boquillas is dry for most of the year.

The main channel is in the western side of the area, near the Sierra. Before 1960, the Río Boquillas was less entrenched than today (Johnson 1960).

The main channel is in the western side of the area, near the Sierra. Before 1960, the Río Boquillas was less entrenched than today (Johnson 1960).

2.2. Field survey

A detailed study of two representative profiles of alluvial palaeosol-sedimentary sequences at La Playa archaeological site were selected for identification, description and sampling of the buried Late Quaternary palaeosols. It was supplemented by the geomorphological subdivision of the alluvial fan using satellite images. Further field palaeopedological surveys focused on the older geomorphological units and resulted in identifying exposures with the most complete sequences and best represented palaeosols and sedimentary units.

The location of the study area is shown in Figure 1. Field description is focused on the morphological features which indicate the grade and type of palaeosol pedogenesis (color pattern, structure, porosity, and pedofeatures) as well as other features related to the erosion and/or sedimentation processes (lamination, thickness of the soil horizons and the type of boundaries).

Undisturbed blocks of soil for micro-morphological research were taken from exposures of the palaeosol genetic horizons and associated sedimentary strata. All field descriptions and profile designations were based on the World Reference Base (IUSS Working Group WRB 2006). Soil samples were collected from each horizon, and were air-dried.

During the fieldwork over La Playa site, Cruz-y-Cruz et al. (2014) identified areas covered by red weathered soils (Chromic Cambisols, according to IUSS Working Group WRB (2006)) that show clear discordance with the present day bioclimatic conditions. Here we present results from two new profiles: Zanja and Maravillas, and compare these with the Hornos 1 and 2; and Canal 2 profiles already studied by Cruz-y-Cruz et al. (2014).

At Hornos 1, the SRP, a Chromic Cambisol, represents the older phase of pedogenesis; at Hornos 1 and Canal 2, the BOP is a cummu-

lic palaeosol, formed by several pedosediments and poorly developed palaeosols. The SRP is considered a marker for finding Late Pleistocene archaeological sites and megafauna localities. In contrast, BOP is related to the human occupation surface during the period of early agriculture, in the Middle Holocene. Both palaeosols, SRP and BOP are separated by silty sediment layers. In most cases, the top of the horizon is disturbed or eroded in these profiles.

The Zanja profile (30°29'57.40" N, 111°31'55.89" W), at a distance of 320 m from the Hornos 1 profile, is described in a 1.10 m deep section exposed among various pedestals, where SRP showed a high degree of erosion. In some profiles, the Bw horizon is preserved and in others, the underlying Bk horizon is directly beneath the silt sediments, with no Bw and A horizons. At the studied Zanja profile, we have found the most complete profile of the SRP, which includes the A, Bw, and Bk horizons.

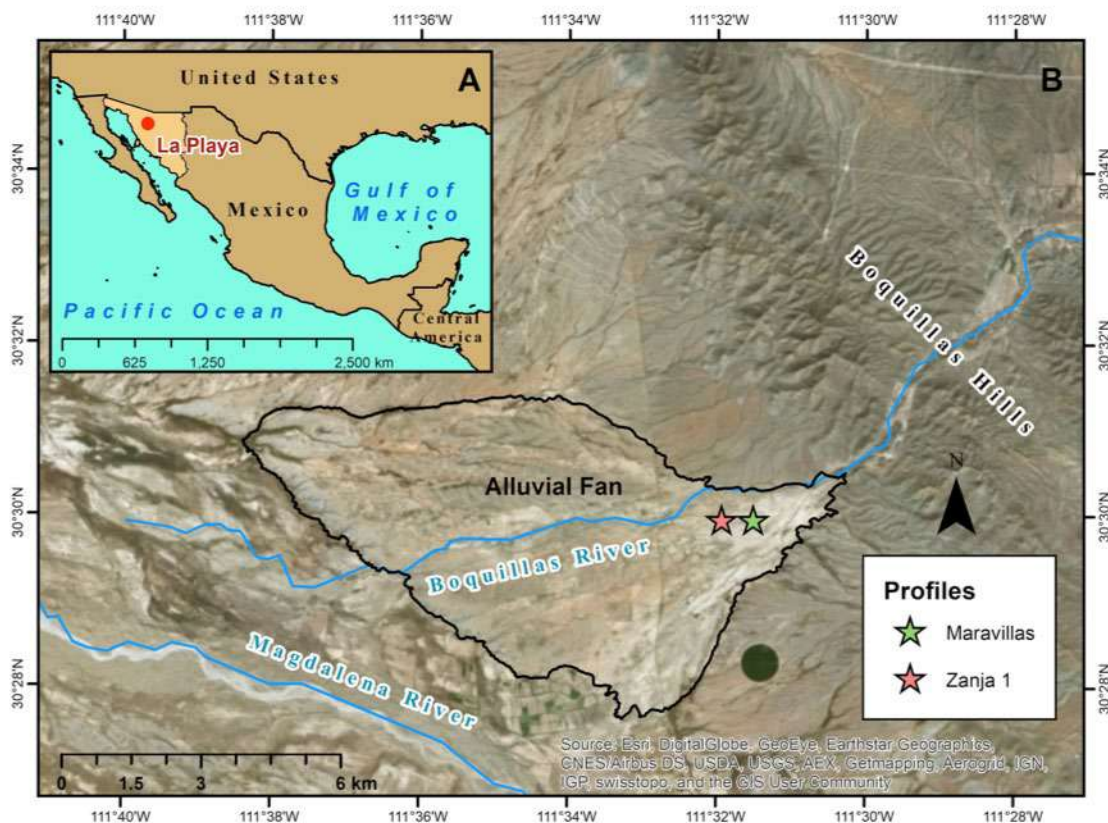


Figure 1. A) Location of the study site. B) The satellite image shows the location of profiles at La Playa site. Satellite image taken from Google Earth, modified by the authors.

The Maravillas profile (30°29'57.44"N, 111°31'30.41"W) is located 364.5 m from Hornos 1, at a gully. This profile is 3.66 m thick and shows the most complete sequence with three pedomorphological units: the SRP at the base, a thick sedimentary sequence, and the BOP on top. This upper part is formed in the Late Holocene and shows a strong affectation of anthropogenic processes (Copeland et al. 2012; Schott 2017).

2.3. The macro scale observations: geomorphology of the study site

The different landforms were outlined using satellite images and ArcGIS 10.3. Because of the flatness of the terrain, the topography was not the main aspect in recognizing individual landforms over the alluvial fan. Color and texture of the surface, the drainage pattern, the vegetation distribution and the limits between features were the criteria taken into account to delineate the most remarkable elements in the relief. The forms were classified according to Blair and McPherson (1994). To corroborate the units, established by image analyses, field observations were also considered. In this way, soil profiles from previous works as well as from this paper were used to correlate the identified features with those observed in the field.

2.4. Micromorphology of the palaeosol and sediments

For this analysis undisturbed samples were taken from nine horizons (BOP-2Ap and 3Ap; sedimentary unit-sandbars, floodplain and channel facies, 4AC, 4C, 5C; and SRP-7Bw) of the Maravillas profile; and four samples (2A1, 2A2, 2Bw1 and 2Bck horizons) of the Zanja profile. After air-drying, they were impregnated with polyester resin with a low viscosity and a refractive index of 1.5. After their hardening, they were cut to a thickness of 30 microns. The micromorphological observations were done with an Olympus petrographic microscope, using transmitted, polarized and reflected light, following the terminology of Bullock et al. (1985). The observations were especially focused on the features of pedogenic, sedimentary, and diagenetic processes, which help to trace stages of soil development and sedimentation/erosion and their spatial relation to the pedogenic features.

2.5. Chronological framework

To establish the age of the palaeosols, three samples were sent to International Chemical Analysis Inc. (ICA), Miami, Florida, for radiocarbon dating with AMS (Accelerator Mass Spectrometry), two from organic matter (Zanja-2A1, and Maravillas-4AC horizons), and one from pedogenic carbonates in the 2Bck horizon of the Zanja profile.

3. Results

3.1. Landforms in the alluvial fan

La Playa alluvial fan is located in a bajada system at southwestern piedmont of the Sierra Boquillas. The identified landforms with their individual features are described below (Figure 2):

- a) Ancient alluvial fan. This lobe, found in the northern portion of the fan, has a slightly more elevated relief than the rest of the alluvial fan. This part is highly dissected and reflects the oldest fan. Its surface is reddish but covered by a greyish material; probably due to the redeposition of the SRP.
- b) SRP surface. This Pleistocene reddish surface (Cruz-y-Cruz et al. 2014) is mainly distributed at the middle and distal part of the fan; the erosion in this landform has entirely removed the BOP and the surficial horizons of SRP. Furthermore, incisive channels affected the distal part. The SRP surface is flatter than the ancient alluvial fan. However, it is hard to know if it is older or both were formed at the same time.
- c) BOP surface. This landform extends from the apex, near the Sierra Boquillas until eastern border of the fan. One of most conspicuous aspect of this unit is the presence of mounds or pedestals, which are the remains left by coalescent gullies that affect almost all the surface. The relief is also flat and is composed of sand and silt grains, often arranged in laminated layers of well sorted materials. The profiles found

- in this area are pedestals. Particularly in the central area, the SRP, the sedimentary unit, and BOP can be observed.
- d) Colluvium. Landform restricted to the apex of the fan, consists of high energy deposits of rounded rocks inserted in a matrix of BOP. These deposits probably were transported by gravitational process due to their proximity to the mountain front and later partially reworked by water.
 - e) Fluvial deposits. These are deposits of cobbles and pebbles located on the margins of the feeder channel in the middle portion of the fan. They represent the highest energy segment of the fan and their development was contemporary to the BOP surface.
 - f) Modern feeder channel. The feeder channel is at the north of the fan between the ancient fluvial fan and the SRP and the BOP surfaces, dissecting the whole surface of the fan and creating lateral deposits of sand.

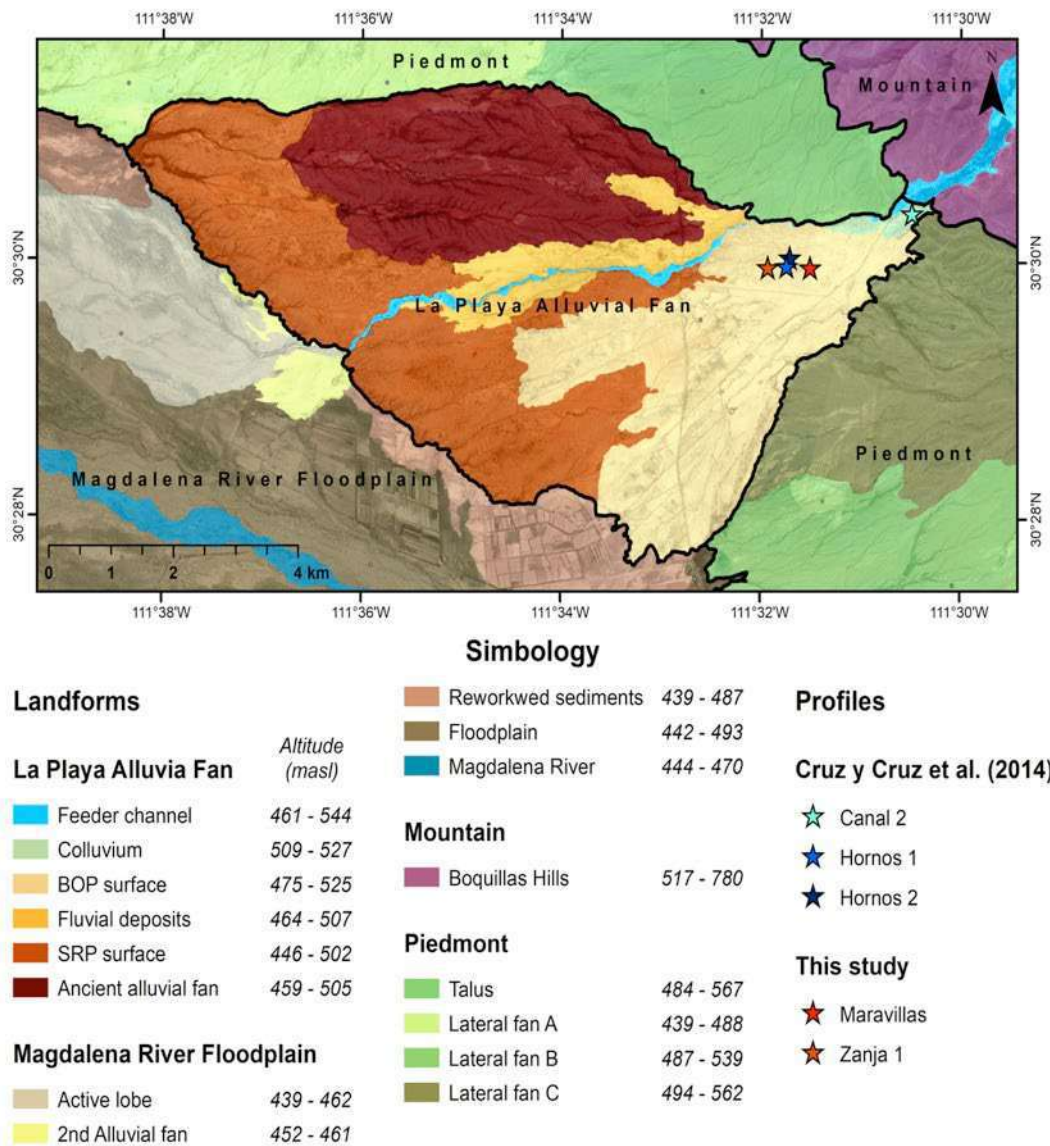


Figure 2. Geomorphic units of La Playa. Google Earth. Google Inc. (2016). Google Earth Pro 7.1.7.2606 [Computer software]. North of Trincheras, Sonora, Mexico (June 25, 2010). DigitalGlobe 2018. Google Inc. Mountain View, CA. <http://www.earth.google.com>

- g) The active lobe, the 2nd alluvial fan and the reworked sediments constitute the current progradation from of the alluvial fan. While the reworked sediments are composed of SRP and BOP eroded from alluvial fan surface, the active lobe and the 2nd alluvial fan are materials coming from the basin.

3.2. Field descriptions

3.2.1. Maravillas profile

The soil-sedimentary sequence consists of the BOP and the SRP separated by a sedimentary sequence, with the following horizons (from top to bottom): C, 2Ap, 3Ap, 3C, (these horizons constitute the BOP); a sedimentary interval, horizons 4AC, 4C, 5C, 6BC; and the SRP with horizons 7AB, 7Bw (Figure 3). The BOP shows gray coloration associated with a higher amount of organic matter. The sedimentary material has a very light brownish coloration; the SRP is reddish brown.

The BOP has a clayey-silt texture in all its horizons. Some differences are observed in the color and structure. The 2Ap and 3Ap horizons are the darkest and show a subangular blocky structure.

The 3Ap has abundant charcoal fragments and is more compact than the 2Ap horizon which has secondary carbonates and rounded rock fragments. The C horizon in the top includes soil fragments in a silty matrix.

The sedimentary sequence (overlying directly the SRP) includes several facies distributed along the profile, interpreted as lateral accretion sandbars (Lasb), floodplain deposits (FI), central sandbars (Csb), channel (Ch) and floodplain facies (Fp) and four horizons (4AC, 4C, 5C and 6BC). The following is a more detailed description:

- Lasb facies (130-173cm): This facies is sandy with cross lamination which represents lateral accretion sand bars thus a result of a moderate energy flow.
- FI facies (173-176cm): This facies is silty (> 70%) with fine plane lamination and small ripples. This facies is interpreted as flood deposits of low energy.
- Csb facies (176-188 cm): This facies consists of sandy sediments with cross-lamination, forming central sand bars, thus representing a flow of moderate energy.
- Ch facies (188-203): This facies is characterized by the presence of pebbles



Figure 3. Landscape photo and Maravillas profile.

supported a sandy matrix with a weak stratification. In some parts an incipient imbrication is detected. This facies represents high energy flows of a channel.

- Fp facies (203-218cm): This is a whitish, silty sediment with a fine lamination and is the result of a low energy flow. It is around 15 cm thick.

The 4AC horizon is reddish-brown, silty, with a subangular blocky structure. A predominant feature in this horizon is the presence of little fragments of charcoal and carbonates. The 4C and 5C horizons are lighter than the previous and siltier, with laminated and oriented material and carbonates inside the root pores. The most remarkable features in 5C horizon are the presence of clay coatings, and carbonates. The 6BC horizon is pale reddish brown, sandy with an angular blocky structure that breaks into sub-angular blocks. Concerning the SRP, The 7AB horizon is less sandy. The 7Bw horizon is more reddish, silty and with a compact angular blocky structure. It has small carbonate and manganese concretions.

3.2.2. Zanja profile

The exposed palaeosol consists of the following horizons: C, 2A1, 2A2, 2Bw1, 2Bw2 and 2BCK (Figure 4). This pedostratigraphic unit belongs to the SRP. Almost all horizons of this profile

have a similar silty texture, except in the 2Bw1 horizon where the sandy texture prevails. The C horizon has a pale brown color and shows fine plane lamination indicative of low fluvial energy. The pedogenic structure is poorly developed. In the dark brown 2A1 horizon, the structure is sub-angular blocky. The 2A2 horizon has a more complex structure: subangular blocks breaking into granular aggregates. The 2Bw1 horizon is more compact. It shows a reddish brown color. The texture is a sandy loam and has a strong subangular blocky structure. The 2BCK horizon is pale reddish-brown, silty, and shows a subangular blocky structure.

3.3. Micromorphological observations of selected horizons of studied profiles

3.3.1. Maravillas profile

The micromorphological analysis reveals contrasting differences between pedogenic and sedimentary features through the Maravillas profile. The 2Ap horizon of the BOP denotes dominance of blocky microstructure, however some areas show granular aggregation and spongy fabric (Figure 5a). The coarse material is poorly-sorted and consists of silt and minor proportion of sand particles (with preeminence of quartz and plagioclase). Organic matter is present organic pigment in the clayey micromass and



Figure 4. Landscape photo and Zanja profile.

some charcoal retaining the cellular structure of plant tissues (**Figure 5b**). In the most uppermost buried humus horizon (2Ap) fragments of bone are present (**Figure 5c**). Reworked impure

silty-clay coatings are common in the unit, particularly in the 2Ap horizon. The 3Ap horizon contains calcite hypocoatings in pore infillings (**Figure 5d**), gypsum is occasionally present

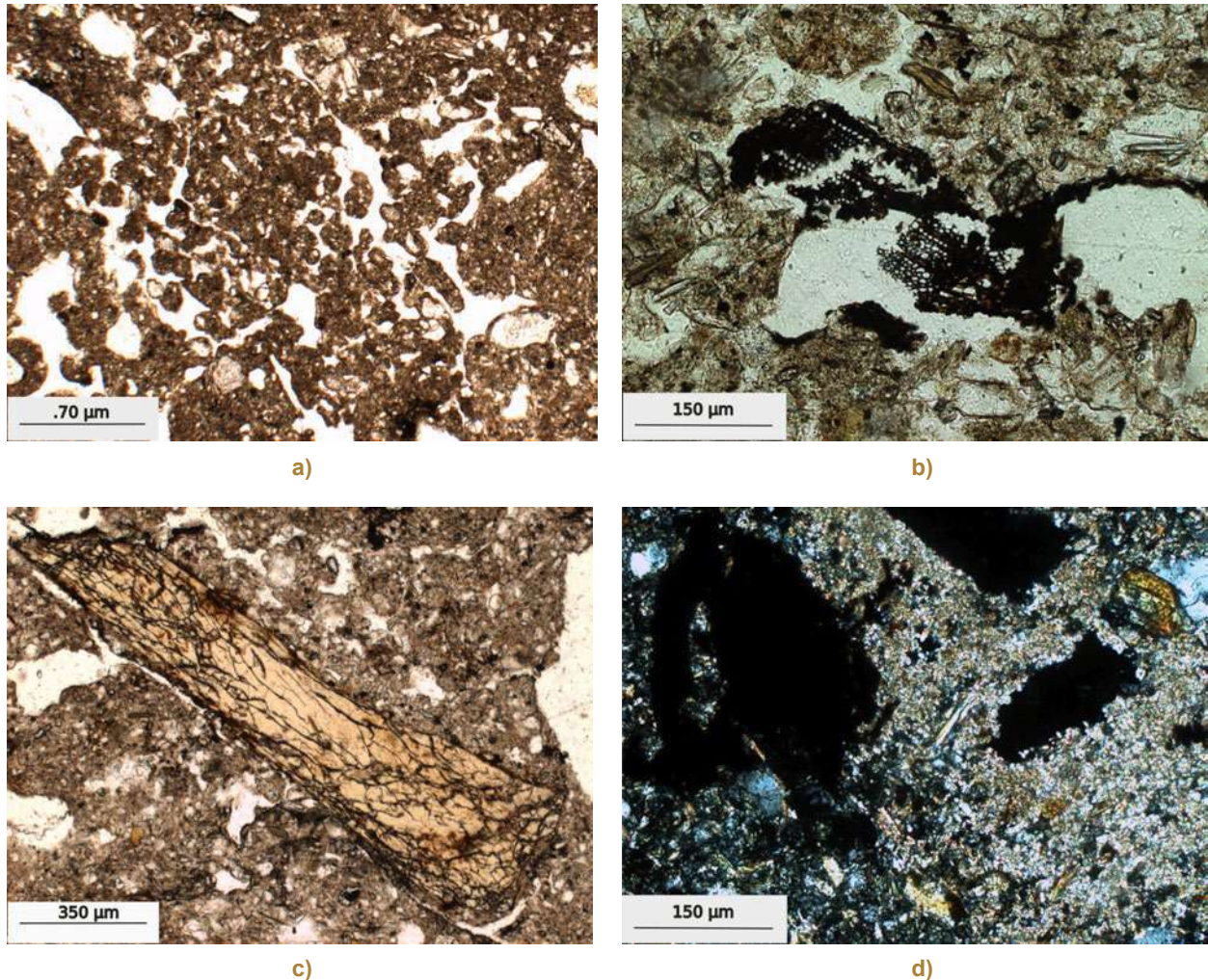


Figure 5. Micromorphology of selected BOP horizons the Maravillas profile. a) Granular aggregation and spongy fabric, 2Ap horizon (PPL – plane polarized light); b) Charcoal fragments with preserved tissue structure, 2Ap horizon (PPL); c) Bone fragment, 2Ap horizon (PPL); d) Calcite hypocoatings in pore infillings, 3Ap horizon (NX).

in this horizon. The presence of reworked or fragmented laminated silty desiccation crusts is very common in the 2Ap and 3Ap horizons.

The Sedimentary Unit is the most diverse regarding pedogenic development. In the upper part of the unit dominated a single grain microstructure; in the lower part we observe a moderately developed sub-angular blocky microstructure. The sandbars facies showed a

cross-bedding deposition structures (**Figure 6a**) typical of current ripples. The lee-side is defined by the presence of opaque minerals; imbrication and normal gradation are common in the central sandbar facies. The same ripple type is found on the top of modern sheet flow deposits in the site. An incipient chitonic c/f related distribution is observed: very thin discontinuous clay coatings are present around sand particles. Quartz and feldspars are abundant, mainly from

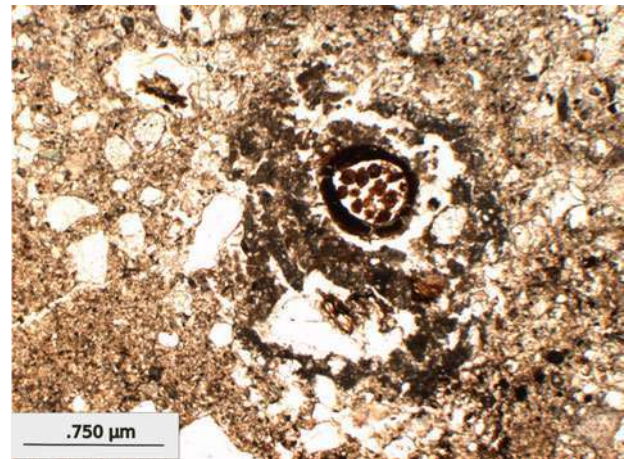
schists (with muscovite, chlorite and epidote) and microcrystalline rocks; isolated particles of garnet, volcanic glass, microcline, hornblende and goethite are scarce.

The laminations in the floodplain and channel facies are finer than in other areas of the sequence, with the dominance of quartz-feldspathic silt mineral particles (including well oriented particles of muscovite, biotite and chlorite, resembling zones with a reticular fabric pattern) (Figures 6c and 6d). An incipient pedogenesis is evident by the presence of root traces and micrite hypo-coatings, as well as redoximorphic ferruginous coatings and mottles (Figures 6b and 6c). Few fragments of the silty surface crust were observed.

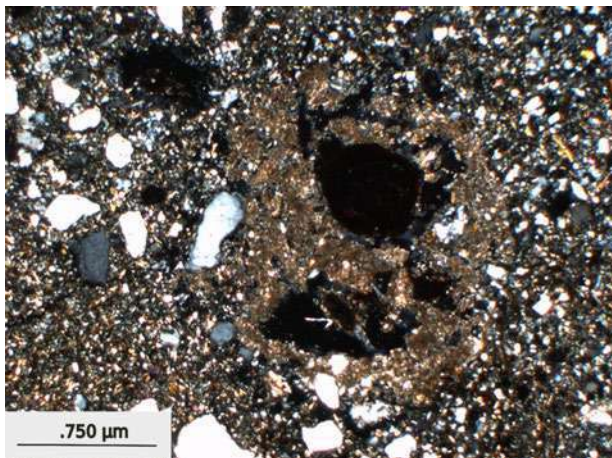
In the lower part, the grain supported microstructure is still present in the horizons 4C and 5C, enriched in well-sorted silty mineral particles. Particularly in horizon 4C there are complex areas with coalescent aggregates of biogenic origin (Figure 6e). Charcoal particles are very common, mostly in the upper part of the unit (4AC and 4C horizons). Secondary carbonates and gypsum are concentrated in the top of the unit: 4AC-4C-5C horizons. In 4C and 5C horizons, micritic carbonates are concentrated in pore infillings and sporadic sparite crystals in nodules. Impure silty-humus-clay coatings cover the walls of larger pores in these horizons (Figure 6f).



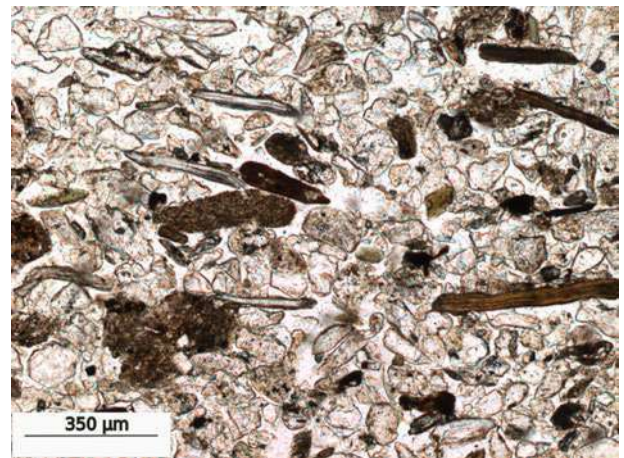
a)



b)



c)



d)

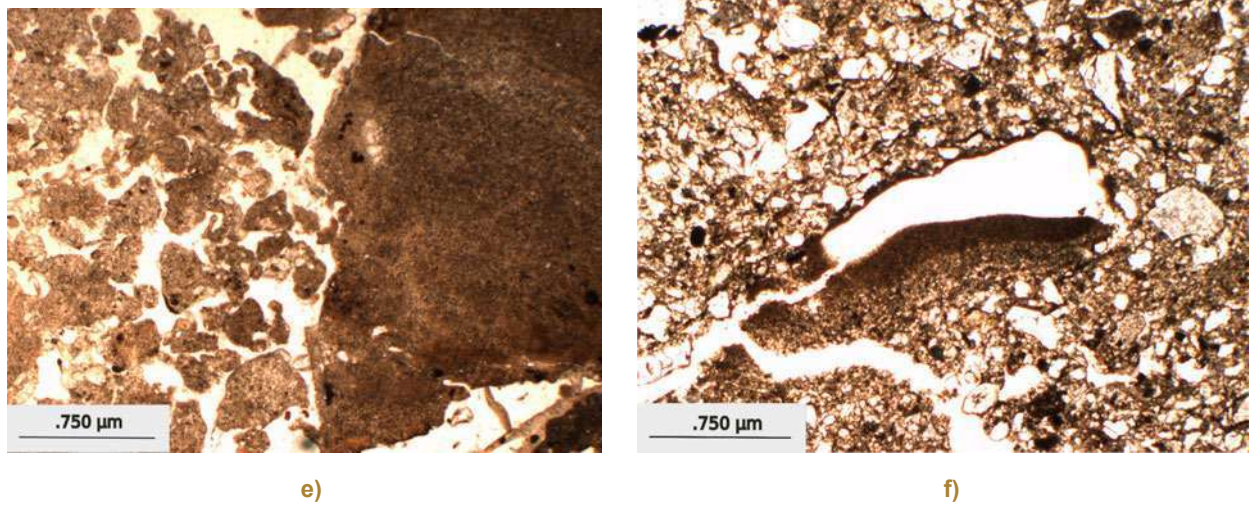


Figure 6. Micromorphology of selected sedimentary unit facies in the Maravillas profile. a) Sandbars facies - crossed lamination - horse tale type (PPL); b) Floodplain facies - carbonates associated with coprolites; c) Same as b, with NX (crossed polarizers); d) Channel facies - oriented particles and Fe coating in a pore (PPL); e) Biogenic aggregation and sedimentary material, 4C horizon (PPL); f) Silty-humus-clay coatings, 4AC horizon (PPL).

The SRP Unit is dominated by moderately developed sub-angular blocky microstructure, notably in 7Bw horizons, where thin illuvial clay coatings are deposited over silty and sand particles (**Figure 7a**). Redoximorphic

pedofeatures such as Fe-Mn mottles and nodules in the groundmass are present in the 7AB and 7Bw horizons. Thin surface crusts incorporated into groundmass have an important presence in the 7Bw horizon (**Figure 7b**).

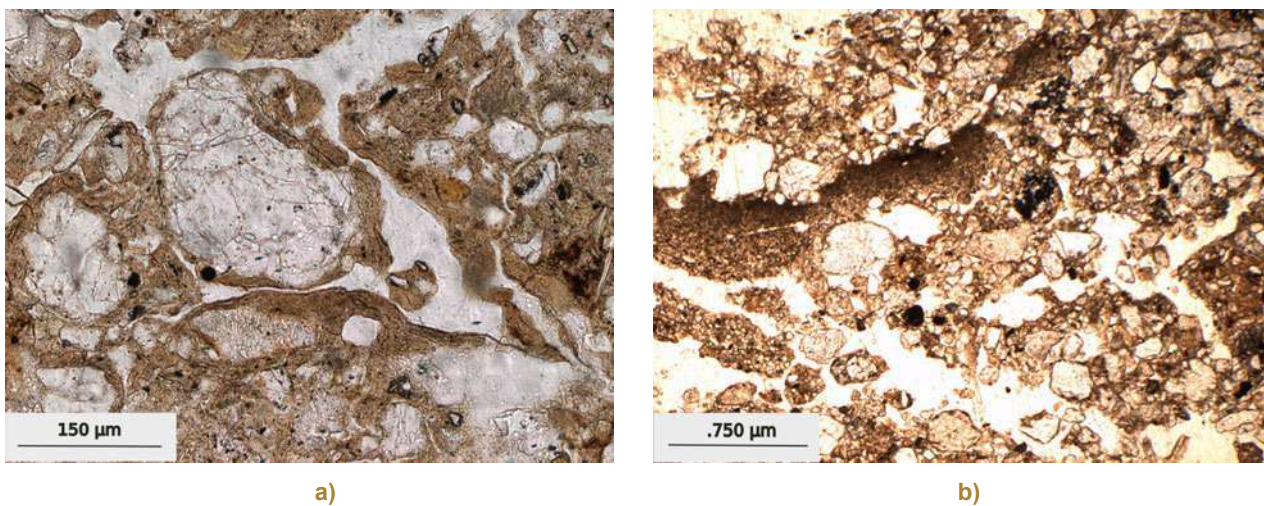


Figure 7. Micromorphology of selected SRP horizons the Maravillas profile. a) Thin illuvial clay coating inside the pores, 7Bw horizon (PPL); b) Fragmented desiccation crust, 7Bw horizon (PPL).

3.3.2. Zanja profile

The Zanja profile shows a more complete unit SRP, particularly in the organic horizons. The 2A1 horizon presents a more defined microgranular structure with fine humic pigmentation and

high porosity. Mesofauna activity is evident by crescent shaped infillings (**Figure 8a**), the pedogenic micritic carbonates are associated with the crescent shape (**Figure 8b**). The blocky microstructure of the 2A2 horizon is well differentiated by planar voids; nevertheless,

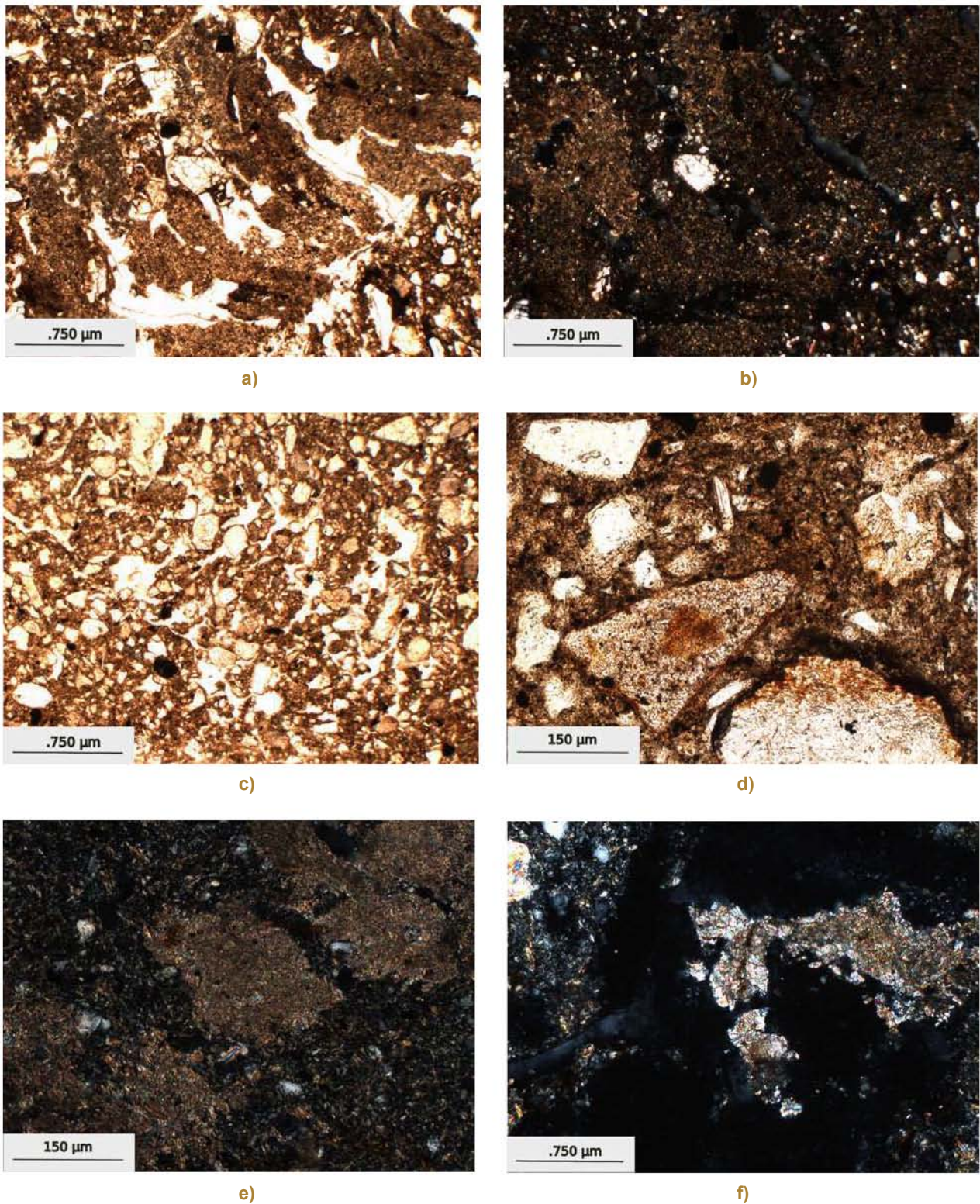


Figure 8. Micromorphology of selected palaeosol horizons in the SRP of the Zanja profile. a) Mesofauna activity in crescent shapes infillings, 2A1 horizon (PPL); b) Crescent shaped carbonates, 2A1 horizon (NX); c) Microgranular biogenic zones, 2A2 horizon (PPL); d) Redoximorphic processes by occurrence of Fe-Mn impregnations in the groundmass, 2Bw horizon (PPL); e) Secondary carbonates, 2Bck horizon (NX); f) Carbonate concretions, 2Bck horizon (NX).

Table 1. Details of samples and their radiocarbon dates

Profile	Horizon	Dated material	Conventional Age BP	Calibrated age	Laboratory code	Reference
Maravillas	4AC	Organic matter	4,070 ± 70	4,420 – 4,729 cal BP	ICA – 16OS/0702	This work
Zanja	2A1	Organic matter	4,120 ± 40	4,526 – 4,729 cal BP	ICA – 16OS/0707	This work
	2BCK	Carbonates	5,950 ± 60	6,659 – 6,936 cal BP	ICA – 16OS/0706	This work
Hornos 2	3A	Organic matter	3,660 ± 40	3,880 – 4,090 cal BP	BETA - 277563	Cruz-y-Cruz et al. 2014
Hornos 1	2A	Charcoal	3,930 ± 40	4,250-4,440 cal BP	BETA - 300442	Cruz-y-Cruz et al. 2014
	3Bgk	Carbonates	12,490 ± 60	14,230-14,910 cal BP	BETA - 277564	Cruz-y-Cruz et al. 2014
Dos Pisos	B ₀	Charcoal	4,170 ± 30	4,610-4,768 cal BP	-	Copeland et al. 2012
	B ₁ /B ₂	Charcoal	3,910 ± 30	4,280-4,421 cal BP	-	Copeland et al. 2012
Los Montículos	Unit B ₁₋₃	Charcoal	4,040 ± 110	3,959-4,095 cal BP	-	Schott 2017
	Unit B ₁₋₃	Humates	3,430 ± 30	3,592-3,730 cal BP	-	Schott 2017

the coalescent excremental infillings generate locally granular biogenic microzones (Figure 8c), evidenced by fine dark humus pigmentation. The deepest horizons (2Bw1-2Bw2-2BCK) prove the redoximorphic processes by occurrence of Fe-Mn impregnations in the groundmass (Figure 8d) and ferruginous typical nodules. In the Bw horizons stipple-speckled b-fabric is observed in the clayey fine material, while no primary carbonates were found within the groundmass. Clay illuviation is more evident in the 2Bw2 horizon.

Carbonates are common in the profile, including a micrite component in the groundmass. Some secondary carbonates are related to biogenic channels infillings (2A1 horizon), as well as reworked material. Especially, the 2BCK horizon includes primary and secondary carbonates (Figures 8e, 8f).

3.4. Radiocarbon dating

The radiocarbon dates of the selected horizons are shown in Table 1, where dates from other

works are included. The age of the 2A1 horizon of the Zanja profile is 4,526-4,729 cal BP; and 6,659-6,936 cal BP for the carbonates found in the 2BCK horizon. In the Maravillas profile, the age of the 4AC horizon is 4,420-4,729 cal BP.

4. Discussion

4.1. Sedimentation vs. pedogenesis in La Playa from the morphological point of view: evidence of paleoenvironmental conditions

The SRP is the most developed soil in the alluvial fan, reflected by the set of macro and micromorphological features. The parent material is, in consequence, of alluvial origin and is mainly constitutes quartz, rock fragments (conglomerates and sandstones) and ferromagnesian minerals from the Sierra Boquillas (Villalpando et al. 2007). These components are not easily weathered. Although it shows a multi-cycle-welded profile (2A, 2Bw,

2BCK, 3Bgk, 3C in Hornos 1; 2A1, 2A2, 2Bw1, 2Bw2, 2BCK in Zanja; 7AB, 7Bw in Maravillas), it has a well-developed structure with clay neoformation and accumulation, weathering of the primary minerals and redoximorphic features (Figures 7a, 8d). Additionally, the SRP has abundant pedogenic carbonates with different morphologies, indicating diverse evolutionary stages (Figures 8b, 8e, 8f). All the Bk and BCK horizons have dense carbonates, covering the ped surfaces, as well as nodules. In the thin sections, they form big sparitic crystals (Figure 8f), as well as micrite in the matrix and hypocrotings around the pores. In the upper horizons (2A, 2Bw in Hornos, 2A1, 2A2, 2Bw1 in Zanja, 7AB, 7Bw in Maravillas), some parts of the matrix are decalcified (Figure 8a), but around the pores and passage features, they accumulate (Figure 8b). These features are interpreted as the result of carbonate leaching from the upper horizons to the bottom. These characteristics are the result of weathering, clay illuviation and carbonate migration, which are considered to occur in NX103 years (Targulian and Krasilnikov 2007) that is, moderate-term processes (some millennia). According to the radiocarbon ages (Table 1), the pedogenesis period spans around 14,000 years (from > 18,000, the age of carbonates in SRP-BCK horizon, to 4,200 cal BP, from charcoal and organic matter in the upper SRP horizons). However the age of the upper A horizons in the SRP should be taken cautiously because in most of the area this palaeosol is truncated and in the Zanja profile the age comes from the 2A1 horizon which shows some micromorphological differences with the 2A2 horizons (Figures 8a and 8c), possibly indicating two cycles of soil formation separated in time but until now no instrumental dating is available from the second A horizon.

The 7Bw horizon in the Maravillas profile, showed fragmented desiccation crusts evidencing redeposition processes. On the contrary, in Hornos 1 and Zanja, the SRP suggests a more stable landform. It is probable that Maravillas profile was closer to the active channel during the time of its formation.

Previously, Cruz–y-Cruz et al. (2014) concluded that the SRP was formed under slightly more humid conditions than today. However, these

conditions were not continuous in time, it was interrupted and inverted by the aridization trend in the Middle Holocene. The presence of charcoal fragments, reworked desiccation crusts, and micritic carbonates, in the SRP humus horizons supports this conclusion. In consequence, the SRP integrates the information related to the Al-tithermal conditions. Strong erosion is also evident as most of the SRP profiles have lost their uppermost horizons. These observations are in good agreement to those made by Copeland et al. (2012) who have described the Bo unit, which is of sedimentary origin, as corresponding to this period.

The SRP development is interrupted by a period of instability that produced the next stratigraphic level: the sedimentary unit (Figure 9). The presence of this level is not unexpected in the development of an alluvial fan.

The BOP is composed a poorly sorted alluvial fan sediment with low textural maturity. The sand particles are sub angular and angular, indicating a short distance transport. We also observed fine charred organic particles and impure clay coatings (agrocutans), probably related to the anthropic impact. Palaeosols contain secondary micritic carbonates in pores, and few Fe and Mn nodules in the matrix, indicative of weak redoximorphic processes. The upper horizons sowed a fragment of bone, this is associated with human occupation. The presence of clay aggregates with silt material, charcoal fragments and fragments of the surface crust, suggests that the soil was disturbed, possibly as result of manufacturing furnaces (Figure 9).

4.2. Landscape evolution of the La Playa alluvial fan

The history of the alluvial fan of La Playa, from the geomorphological point of view, started in the Late Pleistocene when the two oldest landforms were formed (Figure 2): the ancient alluvial fan and the SRP surface. The ancient fan represents the area of the older river channel. It is higher in altitude and highly dissected. The SRP does not appear in this geoform, thus supposing that the SRP is younger than the ancient fan because it is located at a lower elevation (Figure 2), although no absolute dates are available to confirm this supposition.

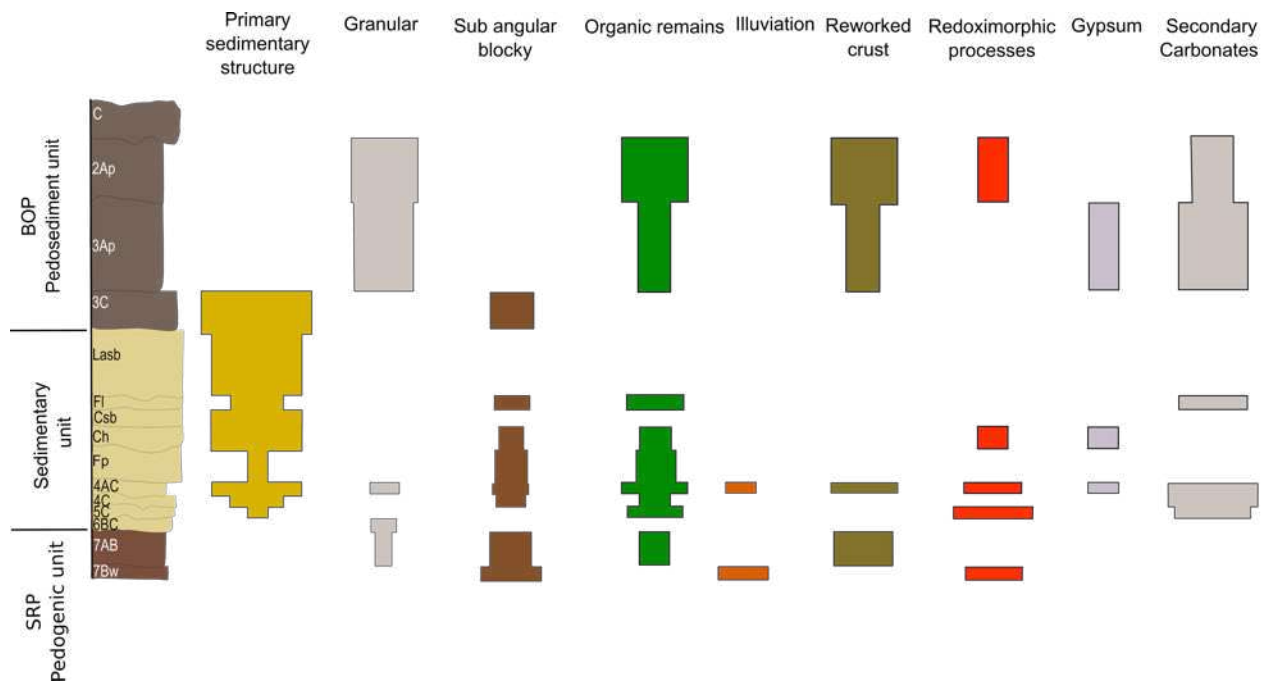


Figure 9. Semi-quantitative differences in the micromorphological properties of BOP, sedimentary unit and SRP in Maravillas profile.

The SRP surface represents a stable area favoring the development of the reddish palaeosol, formed during a long period of landscape stability. According to the instrumental dates, the age from pedogenic carbonates in the Hornos profile is 14,230-14,910 cal BP (Cruz-y-Cruz et al. 2014) and from the organic matter of the A horizon in Maravillas and Zanja is 4,250 to 4,729 cal BP. In consequence the estimated time for pedogenesis is around 10,000 years (taking also into account that the pedogenesis of the SRP begins earlier than the carbonate formation). However, the record of the SRP in the area shows a strong erosional phase. Therefore, in most profiles, the surficial horizon is lost (only some pedestals have the rest of its A horizon). This erosional phase can be associated to the beginning of the Altithermal period because the more arid conditions registered during this time caused a diminishing of the vegetation cover allowing rapid erosion. By the end of the Altithermal, temperature decreased, the water saturation increased because of the lessening evaporation, and the runoff increased, favoring the formation of intense floods. The upper part of the SRP in Maravillas is in agreement with this observation.

In the Middle Holocene, the feeder channel abandons the ancient fan and moves to its current position, causing an increase in the sedimentation processes and an abatement in the pedogenesis. After that, a period of high storm intensity and frequency storms occurs, bringing new sediments deposited over the remnant horizons of SRP. Schott (2017) show similar considerations that are registered in other works. These high magnitude events promote the formation of the B0 unit that we consider as the analogue of the sedimentary unit (Copeland et al. 2012). This unit represents the end of the Altithermal. Finally, this period of climatic instability culminates with less frequent sedimentation periods, and more time to develop an incipient pedogenesis between alluvial events. These new sediments and the cumelic soil correspond with the BOP surface. During this time the flooding frequency and magnitude are low (Schott 2017).

There is a controversy around the type of landform that La Playa constitutes. Schott (2017) concluded that the site represents the floodplain of the Rio Boquillas, based on aerial imagery. The author supported this conclusion because

considers that there is no a distributary channel system, and the sediments do not show evidence of channelized deposition, however the facies analysis is not provided. As we have mentioned, the sedimentary unit, studied here, corresponds to the B0 Unit, proposed by Cope-land et al. (2012) and Schott (2017) that shows similar sedimentary facies. Our analysis of the sedimentary facies point to a complex, braided alluvial fan, in which the sediment influx occurs mainly during the rainy season. The set of facies in this unit is not unexpected in the development of an alluvial fan. The thin laminations are typical for floodplain deposits but they are poorly developed and are intersected by different types of central and lateral sand bars (Figures 6a to 6d) that could correspond to the migration of the main channels.

4.3. From the macro to the regional scale: the influence of pedogenic properties in the geomorphology

Landforms on the alluvial fan are deeply affected by a recent erosional phase that seems to vary according the different palaeosol properties: in the SRP surfaces, rill forms prevail, whereas gullies were dominant in the BOP surface (Figure 2).

Rills and gullies are product of water reworking on the alluvial fans. Rills appear when runoff goes through the fan surface and converge as a consequence of slight topographic and textural variations. Gullies, by the other hand, are a more advance stage of dissection and are produced when water has sufficient energy to detach and transport great portions of soil and sediment particles. Gully depth is limited by the characteristic of the underlying materials and they can be particularly deep on alluvial or colluvial soils (Blair and McPherson 1994; Carey 2006).

It can be inferred from this situation that the advance of pedogenesis in each surface plays an important role in the prevailing style of erosion. Because of a better structure development, SRP has been less affected by water erosion than the BOP, a much younger soil with an incipient structure that makes it highly prone to removal. Furthermore, it is important to consider that most of the time gully erosion is triggered not only by

natural factors but also by human impact such as land use change, and in this context BOP is the surface with more evidence of anthropic activity.

5. Conclusions

La Playa, from the geomorphological point of view, represents an alluvial fan, with a complex history from the Late Pleistocene (MIS2) to the Late Holocene (MIS1), fed by a migrant braided river. The older surface is characterized by the presence of the ancient alluvial fan, located to the northwest. The SRP are found to the south of the ancient fan, constituting the stable surface. This SRP has a multi-cycled-welded profile, the properties of which are the product of different environmental conditions, with alternation between dry and humid periods. The development of this palaeosol takes place over more than 10,000 years and its pedogenesis is interrupted by a period of strong climatic instability causing erosion of the SRP and sedimentation, presumably during the Altithermal. The sedimentary facies analysis reveals a combination of channel, sandbar and floodplain deposits. This event coincides with the end of the Altithermal period. The younger palaeosol, the BOP, has a strong human impact and shows a more unstable landscape.

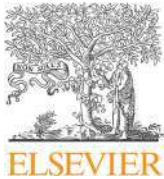
6. Acknowledgements

This research was funded by the Project CONACYT 236623. We acknowledge the support of the Instituto de Geología, UNAM; Estación Regional del Noroeste, IGL, UNAM; Archaeological Project La Playa of INAH-Sonora (Dir. Villalpando E.). The technical assistance of Jaime Díaz is highly appreciated. Finally, thank for the valuable contributions and comments of Miguel Castillo-Rodríguez, Lorenzo Vázquez-Selem and Sergey Sedov.

REFERENCES

- Antevs E. 1948. The Great Basin: With Emphasis on Glacial and Postglacial times. University of Utah Bulletin V38, No 20.
- Betancourt JL, Van Devender TR, Martin PS. 1990. Packrat middens: the last 40,000 years of biotic change. Tucson: University of Arizona Press.
- Blair TC, McPherson JG. 1994. Alluvial fan processes and forms. In: Abrahams AD, Parsons AJ, editors. *Geomorphology of desert environments*. London: Chapman & Hall.
- Bullock, Fedoroff PN, Jongerius A, Stoops G, Tursina T, Babel U. 1985. *Handbook for Soil Thin Section Description*. Wolverhampton, England: Waine Research Publications.
- Byrne R, Busby C, Heizer RF. 1979. The Altithermal Revisited: Pollen evidence from the Leonard Rockshelter. *Journal of California and Great Basin Anthropology* 1:280-294.
- Carey B. 2006. Gully erosion. In: *Facts. Land series sheets of the Department of Natural Resources and Water. The State of Queensland. L81*. Available in <https://www.qld.gov.au/dsiti/assets/soil/gully-erosion.pdf>.
- Carpenter J. 2009. La Playa, Sonora. *Arqueología Mexicana* Vol. XVII, 97:50-53.
- Carpenter J, Sánchez G, Villalpando E. 2005. The Late Archaic/Early Agricultural Period in Sonora, Mexico. In: Vierra B, editor. *New Perspectives on the Late Archaic Across of the Borderlands*. Austin: University of Texas Press. p. 3-40.
- Carpenter J, Villalpando E, Sánchez G. 2009. La Playa: an early agricultural period landscape. *Archaeology Southwest* 23(1):14.
- Copeland A, Quade J, Watson JT, McLaurin BT, Villalpando E. 2012. Stratigraphy and geochronology of La Playa archaeological site, Sonora, Mexico. *Journal of Archaeological Science* 39:2934-2944.
- Cruz-y-Cruz T, Sedov S, Sánchez G, Pi-Puig T, Pustovoytov K, Barceinas-Cruz H, Ortega-Guerrero B, Solleiro-Rebolledo E. 2014. Late Pleistocene-Holocene palaeosols in the north of Sonora, Mexico: chronostratigraphy, pedogenesis and implications for environmental history. *European Journal of Soil Science* 65:455-469.
- Gile LH, Grossman RB. 1968. Morphology of the argillic horizon in desert soils of southern New Mexico. *Soil Science* 106:6-15.
- Holliday VT. 1989. Paleopedology in Archeology. In: Bronger A, Catt JA, editors. *Paleopedology: Nature and Applications of Paleosoils*. *Catena Supplements* Volume 16. p. 187-206.
- Holmgren A, Peñalba C, Rylander A, Betancourt L. 2003. A 16,000 ¹⁴C yr B.P. packrat midden series from the USA-Mexico Borderlands. *Quaternary Research* 60:319-329.
- IUSS Working Group WRB. 2006. *World Reference Base for Soil Resources 2006*. *World Soil Resource Reports* no. 103. Rome: FAO.
- Johnson AE. 1960. The Place of the Trincheras Culture of Northern Sonora in Southwestern Archaeology. Master of Science thesis. Department of Anthropology, University of Arizona, Tucson.
- McLaurin BT, Elliott AC, Watson JT, Villalpando E. 2012. Quaternary stratigraphy of the La Playa archaeological site (SON F:10:3), Northern Sonora, Mexico. In: McLaurin BT, Elliott AC, Torres N, editors. *Reconstructing human-landscape interactions*. Berlin: Springer Briefs in Earth System Science. p. 3-20.
- Mead JI, White RS, Baez A, Hollenshead MG, Swift SL, Carpenter MC. 2010. Late Pleistocene (Rancholabrean) *Cynomys* (Rodentia, Sciuridae: prairie dog) from northwestern Sonora, Mexico. *Quaternary International* 217:138-142.
- Meltzer DJ. 1999. Human responses to Middle Holocene (Altithermal) climates on the North American Great Plains. *Quaternary Research* 52:404- 416.
- Metcalfe S, Bimpson A, Courtice AJ, O'Hara SLO, Taylor DM. 1997. Climate change at the monsoon/Westerly boundary in Northern Mexico. *Journal of Paleolimnology* 17:155-171.
- Metcalfe S, Say A, Black S, McCulloch R, O'Hara S. 2002. Wet conditions during the Last Glaciation in the Chihuahuan Desert, Alta Babicora Basin, Mexico. *Quaternary Research* 57:91-101.
- Nettleton WD, Witty JE, Nelson RE, Hawley JW. 1975. Genesis of argillic horizons in soils of desert areas of the southwestern United States. *Soil Sci Soc Am Proc*. 39:919-926.
- Nordt L. 2003. Late Quaternary fluvial landscape evolution in desert grasslands of northern Chihuahua, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 115:596-606.
- Ortega-Ramírez J, Valiente-Banuet A, Urrutia-Fucugauchi J, Mortera-Gutiérrez C, Alvarado-Valdez G. 1998. Paleoclimatic changes during the Late Pleistocene-Holocene in Laguna Babicora near the Chihuahuan Desert, Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences* 35:1168-1179.
- Pérez G. 1985. *Geografía de Sonora*. In: Hopkins A, editor. *Historia General de Sonora I. Periodo Prehistórico y Prehispánico*. Hermosillo, Sonora: Gobierno del Estado de Sonora.
- Schott A. 2017. Site formation processes and depositional environment of a fine-grained alluvial floodplain at La Playa Archaeology Site, Sonora, Mexico. *Geoarchaeology* 32:283-301.

- Smith GD, McFaul M. 1997. Paleoenvironmental and geoarchaeologic implications of late Quaternary sediments and paleosols: North-central to southwestern San Juan Basin, New Mexico. *Geomorphology* 21:107-138.
- Targulian VO, Krasilnikov PV. 2007. Soil system and pedogenetic processes: Self-organization, time scales, and environmental significance. *Catena* 71:373-381.
- Vidal-Zepeda R. 2005. Las regiones climáticas de México. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Villalpando E, Carpenter J. 2004. Proyecto Arqueológico La Playa, VI Informe, Temporada 2003. Análisis de los materiales arqueológicos. Archivo Técnico del INAH (unpublished).
- Villalpando E, Carpenter J, Watson J. 2007. Proyecto Arqueológico La Playa, VIII Informe, Temporadas 2005 y 2006. Archivo Técnico del INAH.
- Weide DL, editor. 1985. Soils and Quaternary geology of the southwestern United States. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper 203.



Contents lists available at ScienceDirect

Quaternary International

journal homepage: www.elsevier.com/locate/quaint

Environmental setting of the early irrigation in Oasisamerica: Paleopedological evidences from the alluvial palaeosols in la Playa/Sonoran Desert

Georgina Ibarra – Arzave^{a,*}, Elizabeth Solleiro-Rebolledo^b, Bruno Chávez-Vergara^c, Sergey Sedov^b, Carmen Ortega-Rosas^d, Guadalupe Sanchez^e, Thanairi Gamez^d, Hermenegildo Barceinas-Cruz^a, Emmanuel Ayala^a

^a Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, México

^b Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México

^c Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Colonia UNAM, CU, Delegación Coyoacán, CP: 04510, México

^d Universidad Estatal de Sonora, México

^e Instituto Nacional de Antropología e Historia, Sonora, México

ARTICLE INFO

Keywords:

Palaeosols
Micromorphology
Geomorphology
Altitheermal
Alluvial fan facies

ABSTRACT

Environmental conditions and human-landscape interaction during the onset of the irrigated agriculture in Oasisamerica are not clear yet. In la Playa site (Sonora, NW Mexico), the evidences of sedentary population, land cultivation, and water management developed after the end of Altithermal period (around 4500 yr BP) include more than 550 archaeological features including hundreds of human cremations and a net of buried artificial channels. These findings were closely associated with several palaeosol levels alternating with sediments within a large alluvial fan. We studied micromorphological features, physical characteristics (color, texture, rock magnetic properties), and composition of organic matter, from three profiles (Maravillas, Zanja, and Cuatro Suelos), to reconstruct pedogenesis and sedimentary environment of the palaeosol sequences. Additional paleoenvironmental information was extracted from pollen assemblages, extracted from the Cuatro Suelos profile. The results pointed to a long period of geomorphic and climatic stability in the early-middle Holocene marked by a well-developed red Cambisol. This period was followed by an unstable interval around 4.5 kyr BP marked by severe erosion of earlier soil profiles and sedimentation of different kind: channel, floodplain, and fluvio-eolian. Later synsedimentary Fluvisols were formed showing signs of predominantly arid pedogenesis, interrupted by occasional flooding; indicators of human impact were also encountered. We conclude that the shift to irrigated agriculture as the main subsistence activity occurred during the period of major climatic and geomorphic fluctuation and then irrigation developed further under dry environment with limited water resources during the Late Holocene.

1. Introduction

The Early Agriculture Period (EAP) in the SW of USA and NW of Mexico begins just after the Altithermal period (7500 and 4500 yr BP), which represents the warmest and driest stage of the Holocene (Antevs, 1948, 1955). During the EAP agricultural societies cultivated corn and constructed canals for irrigation (Mabry *et al.*, 2002; Diehl, 2009).

La Playa archaeological site in Sonora, NW Mexico, contains evidence of human occupation during the last 10,000 years (Hayden, 1967, 1976; García, 2005; Gaines, 2006), however it is highly probable that in the Altithermal, the site is abandoned (Sanchez and Carpenter,

2012) due to the extreme environmental conditions. The returning to wetter climatic conditions at the end of the Altithermal coincides with the beginning of the corn cultivation around 4475 cal BP (Sanchez and Carpenter, 2012), consequently, La Playa is the largest EAP site of the NW Mexico/SW United States. In this period a permanent occupation is recorded (Carpenter and Sánchez, 2013) with permanent agriculture villages (Sánchez, 2016). These agriculture societies modify the site to adapt to the environmental conditions, developing several activities: construction of canals, digging of pits, and burning for funerary, cooking, and ritual activities (Cruz-y-Cruz *et al.*, 2014).

From the La Playa paleopedological records, the late Pleistocene

* Corresponding author. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, Ciudad de México, México.

E-mail address: gigiot81@yahoo.com.mx (G. Ibarra – Arzave).

<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.09.041>

Received 2 March 2018; Received in revised form 9 August 2018; Accepted 30 September 2018

1040-6182/ © 2018 Elsevier Ltd and INQUA. All rights reserved.

and early Holocene is characterized by a well-preserved palaeosol, the San Rafael Palaeosol (SRP) which formation documents a long period of landscape stability (Cruz-y-Cruz et al., 2014; Ibarra et al., 2018). This stability is interrupted by dynamic geomorphic processes causing erosion and sedimentation. Records of such activity are the sedimentary layers that covers the SRP (Copeland et al., 2012; Ibarra et al., 2018). The dates of the upper horizons of the SRP coincides with the end of the Altithermal period, around 4500 cal BP (Cruz-y-Cruz et al., 2014; Ibarra et al., 2018). The question arises about the mechanisms driving the changes in the landscape stability, which produce the sedimentary layers and the overlying palaeosols, the Boquillas palaeosol (BOP), where the archaeological materials are found: Are the changes produced by the climate variability, or by the human activities, or both?

In this work we present a set of selected properties of paleosols and sedimentary strata from three profiles: Maravillas, Zanja, and Cuatro Suelos, with the aim to interpret them as paleoenvironmental archives of the conditions prevailing prior, during, and after the Altithermal period, and particularly during the Early Agricultural Period. Palaeosols are used as evidences of landscape stability in contrast to sedimentary units which reflects instability and activation of geomorphic processes. With this information we offer a view of which challenges the first agriculture communities faced in order to manage the resources (for instance irrigation).

2. Site description

2.1. Characteristics of the study area

La Playa archaeological site is located in the Sonoran Desert biome where the average annual temperature and the annual precipitation ranges from 18 to 22 °C, and 200–400 mm, respectively, with rainfall concentration between summer and winter (Vidal-Zepeda, 2005). On this site, there are remains of Pleistocene fauna (and megafauna) as prairie dog (*Cynomys ludovicianus*), bison, mammoths, camel (cf. Camelops), and pronghorn (*Capromeryx* sp.) along with tortoises (*Hesperotestudo* sp.) (Mead et al., 2010), as well as evidence of early human occupation (Villalpando and Carpenter, 2004; Carpenter et al., 2009). The modern vegetation is the desert scrub type, represented by mesquite (*Prosopis* spp), palo verde (*Cercidium* spp), ironwood (*Olesea tesota*), chollas (*Cylindropuntia cholla*) and nopales (*Opuntia* spp.), ocotillo (*Fouquieria splendens*), saguaro (*Carnegiea gigantea*), pitahaya (*Lemairococcus turberi*), vinoramas (*Acacia aniantecia*), candles and cat's claw (*Mimosa* spp), vegetation of low hills and ridges (Pérez, 1985).

The site comprises at least 12 km² on both sides of the Río Boquillas, approximately 10 km north of Cerro de Trincheras, a Quaternary basaltic cone. The geology of the region is characterized by intrusive igneous rocks of the Proterozoic crystalline basement, metamorphosed gneisses and schists, and folded sedimentary rocks. They outcrop at the mountain crests, whereas lower areas are covered by extensive Quaternary fluvial sediments (Valencia Moreno, 2007). Geomorphologically, La Playa site is an alluvial fan with accumulative-erosional alluvial land surfaces of different ages (Ibarra et al., 2018).

Today, the Río Boquillas is dry most of the year and deeply entrenched; however, during the site occupation, the surrounding terrace was the active alluvial fan and floodplain (Carpenter et al., 2005).

2.2. Archaeology of the study sites

According to the archaeological investigations, La Playa is one of the biggest sites of Northern Mexico (Carpenter, 2009). It is located near the town of Trincheras, the famous type-site for the Trincheras culture of northwestern Sonora. Most of the cultural artifacts are found in the sediments of the alluvial fan, which is formed in the foothill of the Sierra Boquillas. The artifacts have been exposed due to the high erosion of the site.

The Late Pleistocene occupation of La Playa has been represented by

a Clovis occupation with the presence of one Clovis point and a Clovis preform, and a Malpais complex (Hayden, 1967, 1976; García, 2005; Gaines, 2006; Carpenter et al., 2015). The Malpais artifacts consist of crude stone tools (mainly cutters and scrapers), with thick patina, that have been found on ancient alluvial terraces and surfaces of the Pleistocene palaeosols. The Malpais complex is represented on La Playa site (García, 2005; Sánchez and Carpenter, 2003), which chronology spans from 37,000 BP to 4000 BP (Hayden, 1976; Carpenter et al., 2003; Sánchez and Carpenter, 2003; Gaines, 2006). At present, there are no radiometric dates associated to Malpais artifacts (Gaines, 2006). The technological analysis of the La Playa Malpais assemblage indicates that the lithic technology of the tools is the same that the rest of the archaic technology. Also, a heavily patinated grooved ax fragment, and thus dating to no earlier than 950 BP, is also identified within the La Playa Malpais assemblage, contributing to suspicions regarding the presumed correlation between the formation processes of desert varnish and the purported antiquity of artifacts (Carpenter et al., 2015).

The middle Holocene is characterized by a gradual shift towards drier conditions (less precipitation and higher temperatures), which result in changes in the ecosystem. This period is named as Altithermal (Antevs, 1955). The absence of archaeological artifacts in the Sonora desert suggests the inhospitable environmental conditions. Particularly in La Playa site, the evidences point to a partial and intermittent abandonment (Carpenter, 2009).

At the end of the Archaic, the human occupation increases in the Boquillas Valley, which coincides with the return to better climatic conditions. In this stage, cultivation arises, and the Early Agriculture Period (EAP) emerges, around 4500 yr. BP. In this period, the human groups developed new artifacts such as hunting instruments for small mammals and utilization of mollusks. In addition, there is evidence of maize cultivation (probably one of the earliest date for the NW-Mexico), houses, irrigation canals, ovens, and the biggest collection of pre-ceramic burials (Carpenter, 2009).

3. Material and methods

3.1. Field survey

The methods used in this study included field descriptions, soil and sediment laboratory analyses, and radiocarbon dating which provided a chronological control and documented the different depositional events.

Three profiles were considered for this work: Maravillas, Zanja, and Cuatro Suelos, (Fig. 1). The morphology and micromorphology of the Maravillas and Zanja profiles were already published by Ibarra et al. (2018), but here, we took part of the information (micromorphology of selected horizons) and added new analyses not considered before (texture, rock magnetic properties, and organic matter analyses).

The profile descriptions included soil and sedimentological characteristics as type of horizons, color, texture, structure, lithology, bedding, which were used to understand the soil-forming environments and the phases of landscape stability. All field descriptions and profile designations were based on the World Reference Base (IUSS Working Group WRB, 2007).

Bulk samples for laboratory analyses and unaltered blocks were collected from the genetic horizons as well as from the sedimentary layers. A total of 35 samples were air dried at room temperature. The bulk samples were sieved (< 2 mm) and the unaltered blocks were used for thin sections.

In addition, samples for magnetic susceptibility measurements were taken: in Maravillas and Cuatro Suelos, every 10 cm along the profiles, while in Zanja, they were obtained from each genetic horizon.

3.2. Laboratory analyses

The laboratory methods were selected to evaluate stable

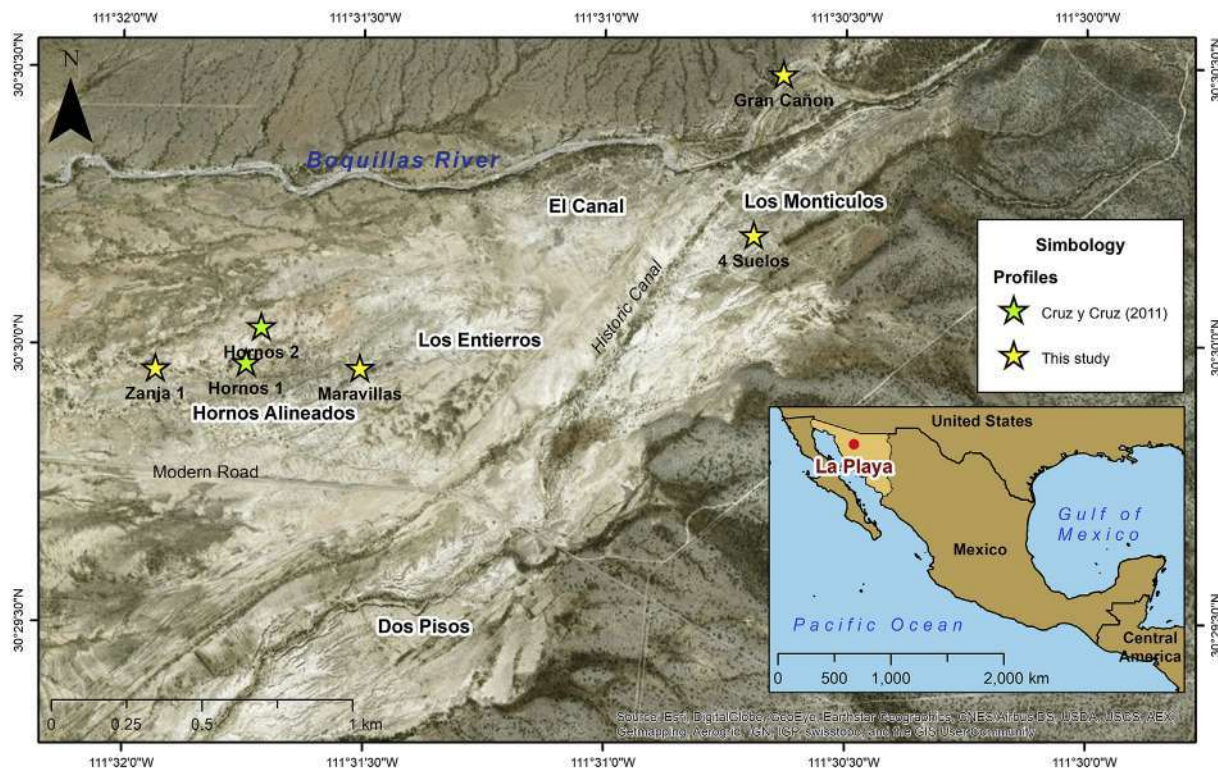


Fig. 1. Location of the study area. The satellite image of the site La Playa shows the location of profiles (Maravillas, Zanja and Cuatro Suelos). Satellite image taken from Google Earth and modified by the authors. **Vector data source:** 1) INEGI. (June 2017). Marco Geoestadístico Nacional. Áreas Geoestadísticas Estatales. Polygons [Shapefile geospatial data]. INEGI, Mexico; 2) Esri Inc. (2014). ArcMap 10.2.2 [Computer software]. ArcGlobeData. Continent. Polygons [Shapefile geospatial data]. Esri Inc., Redlands, CA.

Image source: Esri Inc. (2014). ArcMap 10.2.2 [Computer software]. North of Trincheras, Sonora, Mexico (June 12, 2014). DigitalGlobe 2014. Esri Inc., Redlands, CA.

characteristics of palaeosols, which did not change significantly with recent pedogenesis and diagenetic processes, and were interpreted for the palaeoenvironmental reconstruction.

3.2.1. Grain size distribution

It was evaluated to verify differences in soil forming processes and detect discontinuities. The sand fraction (2–0.063 mm) was separated by sieving; the silt (0.063–0.002 mm) and the clay (< 0.002 mm) fractions were obtained by gravity sedimentation and pipette, with no pre-treatments.

3.2.2. Color

The soil color was measured in all horizons and used to detect the presence of iron minerals that can be related to pedogenetic processes (Siebe et al., 2006). It was evaluated with a spectrometer Colorlite sph860/sph900. The results are presented in the following coordinates: L* (lightness, which ranges from 0 to 100); a* (redness, from green to red), and b* (yellowness, from blue to yellow).

3.2.3. Magnetic susceptibility

Mass-specific magnetic susceptibility was measured in the studied profiles in low (0.47 kHz) and high (4.7 kHz) frequencies (χ_{lf} and χ_{hf}) with a Bartington MS2B susceptibility meter with dual sensor. The magnetic susceptibility and the frequency dependent magnetic susceptibility reflect the contents of magnetic minerals, which are associate to both to pedogenetic processes and fire effects (Maher, 1986). The frequency dependent magnetic susceptibility (χ_{fd}) was calculated as $\chi_{fd} = (1 - \chi_{hf}/\chi_{lf}) * 100\%$. For details see Cruz y Cruz et al. (2018).

3.2.4. Loss-on-ignition (LOI) at 450 °C as an indicator of the soil organic matter (SOM) content

The loss-on-ignition (LOI) method for the determination of organic matter involves the heated destruction of all organic matter in the soil or sediment. Sequential loss on ignition followed the method proposed by Heiri et al. (2001), with the modification by Bengtsson and Enell (1986).

3.2.5. Attenuated total reflection fourier transform infrared spectroscopy (ATR/FT-IR) of soil organic matter

SOM was characterized by ATR/FT-IR for recognizing some chemical behaviors that can be used as environmental proxies, mainly related to the species substitution or alteration by fire.

The ATR/FT-IR spectrum, of treated and non-treated samples, was obtained in accordance to Mastrolonardo et al. (2014). We recorded the ATR-FTIR spectrum by using a FT-IR Nicolet iS 50 (Thermo-Corporation) interferometer equipped with a diamond attenuated total reflectance (ATR) accessory (GladiATR, Pike Technologies). The samples spectrum was obtained with 100 scans at a resolution of 4 cm⁻¹ in the range 4000–400 cm⁻¹. A background spectrum using a diamond crystal was recorded prior to the analysis. The interpretation of bands associated to fire events were focused on aromatic, aromatic N, carboxyl and aliphatic compounds (Mastrolonardo et al. (2014, 2017).

For a better characterizing of the SOM spectrum, we focused only in the 1850–1250 cm⁻¹ region and smoothed with the Savitzky–Golay function, to define the number and position of peak components. This procedure minimized the interference and signal overlap, caused by the sample mineral phase (Mastrolonardo et al., 2014) The fit was performed on the original spectrum by the OMNIC 9.1 software (Thermo Scientific Inc.) after a baseline correction by the Levenberg–Marquardt algorithm. The deconvolution process of the spectrum was fitted using

the pure Gaussian distribution peak shapes and their significance was verified with the Chi-Square goodness of fit test (< 0.001). The deconvolution process was made with the software Origin 8.0. The IR band components were described as pure Gaussian functions (Mastrolonardo et al., 2014).

3.2.6. Pollen content

The procedure for the pollen extraction was only applied to the Cuatro Suelos profile and was based on Faegri and Iversen (1989) adapted to archaeological samples (Ortega-Rosas et al., 2017). From each level, 40 g of sediment was taken. HCl (diluted 10%) was added and left the solution for 20 min. Distilled water was applied to stop the reaction. After 24 h, the sample was rinsed, and HF was added and left for a day. Then the sample was washed until was acid free. Finally, a treatment with KOH (10%) was employed in water bath. In some samples additionally, we applied a flotation method (separation by heavy liquids) with $ZnCl_2$. The final residue of the chemical treatment was stored in glycerin.

A pollen analysis was made with an optical microscope at 40X and 100X. We observed many slides to achieve the minimal pollen and spores, counting 100 to 300 grains per sample. Pollen identification was supported with pollen rain samples from the region (Ortega-Rosas et al., 2008), several pollen atlases (Heusser, 1971; Willard et al., 2004) and a digital pollen atlas available online (e.g. University of Arizona pollen atlas, Australasian Pollen and Spore Atlas). Counting data of pollen and spores was managed in Tilia 2.0.4 software to obtain a pollen diagram. Pollen counts were expressed in percentage with respect to the total pollen and spore group sum (ferns and fungal), whereas Pteridophyte group was expressed with respect only to the total sum of spores (ferns and fungal). Additionally, the pollen zones were divided using a cluster analysis with CONISS (Grimm, 2004).

3.2.7. Micromorphology

For this analysis, undisturbed samples were collected, preserving the structure and orientation. After air-drying, they were impregnated with Crystal resin for further elaboration of thin sections. The micromorphological observations were done in an Olympus petrographic microscope, using transmitted, polarized, and reflected light, following the terminology of Bullock et al. (1985). The observations were especially focused on the features of pedogenic, sedimentary, and diagenetic processes, which help to trace stages of soil development and sedimentation/erosion and their spatial relation to the pedogenic features.

3.3. Chronological framework

We dated total organic matter from the Cuatro Suelos profile (3Ah, 4Ah, 5Ah, and 6Ah horizons). Samples were sent to the International Chemical Analysis Inc. (ICA), Miami, Florida; and were dated by the AMS technique (Accelerator Mass Spectrometry). All calibrated dates are expressed at 2 sigma cal yr BP, based on the INTCAL 13: IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP (Reimer et al., 2013; Table 1). Besides the information from these dated samples, the integral time-scale for this study was based on radiocarbon ages of palaeosols and sediments provided by Copeland et al. (2012), Cruz y Cruz et al. (2014), Schott (2017), and Ibarra et al. (2018); Table 1.

In addition, an incipient soil, buried by 10 m of alluvial sediments in the mouth of the alluvial fan, was dated (Fig. 2a).

4. Results

4.1. Field descriptions

The Maravillas profile (30°29′57.44″ N, 111°31′30.41″ W) is located in central part of the alluvial fan, at a gully (Fig. 1). This profile is 3.66 m thick and shows the most complete sequence, including the

three pedostratigraphic units, described by Ibarra et al. (2018): the San Rafael Palaeosol (SRP) at the base, a 70 cm-thick sedimentary interval in the middle (SI), and the Boquillas Palaeosol (BOP) on the top, with the following horizons (from top to bottom): C (pedosediment), 2Ap, 3Ap, 3C, (these horizons constitute the BOP); a sedimentary interval (lateral accretion sandbars (LAB), floodplain facies (FF), central sandbars (CSB), channel facies (ChF), and floodplain facies FF, 4AC, 4C, 5C, 6BC); and the 7AB, 7Bw horizons of the SRP (Figs. 2b and 3) (Ibarra et al., 2018). The BOP-A horizons show grayish colors associated to a higher amount of organic matter. They correspond to weak developed palaeosols that are strongly affected by human activities, as Copeland et al. (2012), Cruz y Cruz et al. (2014), and Schott (2017) documented. In contrast, the SI exhibits very light colors. The SRP is reddish brown and is constituted by a moderate developed palaeosol (7AB, 7Bw).

In the Zanja profile (30°29′57.40″ N, 111°31′55.89″ W), the SRP exhibits a better developed palaeosol. This pedostratigraphic unit is described in 1.10 m deep section exposed among various pedestals, where SRP showed several erosion degrees. In some pedestals, the Bw horizon is preserved and in others, the underlying Bck horizon is directly beneath the SI, with no Bw and A horizons. At the studied Zanja profile, we have found the most complete profile of the SRP, which included the 2A1, 2A2, 2Bw1, 2Bw2, and 2Bck horizons directly under the SI (Figs. 2c and 4).

The Cuatro Suelos profile (30°30′9.02″ N, 111°30′45.42″ W) is located at NE of the alluvial fan, near the apex, at a 2 m depth gully (Fig. 1). In this profile, the three pedostratigraphic units that characterized the La Playa alluvial fan are not well differentiated. We recognize the following horizons, C (pedosediment), 2Ah, 2C1, 2C2, 2C3, 3Ah, 3C, 4Ah, 4C1, 4C2, 5Ah, 5C, 6Ah y 6C (Figs. 2d and 5). The uppermost pedosediment is yellowish brown with a silty texture, weakly laminated (lamination is not continuous and intercalated with “massive” sediments), with a poorly developed soil structure but numerous root pores. The organic horizons (2Ah, 3Ah, 4Ah, 5Ah, and 6Ah) have a darker grayish brown color, a granular to subangular blocky structure, and high biogenic porosity. They have a silty texture. Some differences are detected among these horizons. In the 2Ah, 3Ah, and 5Ah horizons, charcoal fragments are observed. The 4Ah horizon is more compact and darker. It has small carbonate concretions. The 5Ah horizon has a high root density. Both the 5Ah and the 6Ah horizons show small reddish mottles of iron and manganese oxides in the matrix. The C horizons are silty and lighter in color, and have subangular blocky structure, with carbonates in the soil matrix.

The BOP is characterized to have abundant anthropogenic materials/features, e.g. human cremation burials, corn fields, irrigation canals, artificial reservoir, shell ornament production and ground stones (Carpenter et al., 2015; Cruz-y-Cruz et al., 2018).

The modern soil cover, in accordance to that described by Solís-Portillo and Venegas (2011) is constituted by Calcisols and Regosols. However, the strong erosion that has affected the area has destroyed most of the soils.

4.2. Analytical results

4.2.1. Color

The Maravillas profile shows three-color variations, which relate to the three different units (BOP, SI, and SRP). This differentiation is difficult to see with the naked eye, but easily quantified with the colorimeter. According to the results (L^* , a^* , and b^*), the 7AB and 7Bw horizons of SRP correspond to the darkest unit with L^* values lower than 35; these horizons show higher values in the a^* and b^* vectors (Fig. 3), which are associated to more reddish and yellowish colors. The lower facies and the lowermost part of the SI (4AC, 4C) are the lightest with L^* values higher than 40, with colors less reddish and yellowish than the previous segment. The BOP and the upper part of the SI has more homogeneous colors in all the exposed section.

In the Zanja profile, differences in color are clearer. The upper

Table 1
Radiocarbon dates (AMS) for the selected horizons of the BOP and SRP units.

Profile	Horizon	Dated material	Conventional Age BP	Calibrated age	Laboratory code	Reference
Cuatro Suelos	3Ah-BOP	Organic matter	3320 ± 40	3497–3609 cal BP	ICA – 17C/0622	This work
	4Ah-BOP	Organic matter	3870 ± 40	4240–4380 cal BP	ICA – 17C/0623	This work
	5Ah-BOP	Organic matter	4290 ± 40	4844–4917 cal BP	ICA – 17C/0624	This work
	6Ah-SRP	Organic matter	4050 ± 40	4464–4613 cal BP	ICA – 17C/0625	This work
Gran Cañón	A	Charcoal	3500 ± 60	3631–3925 cal BP	ICA – 16OS/0704	This work
Maravillas	4AC-SRP	Organic matter	4070 ± 70	4420–4729 cal BP	ICA – 16OS/0702	Ibarra et al., 2018
Zanja	2A-SRP	Organic matter	4120 ± 40	4526–4729 cal BP	ICA – 16OS/0707	Ibarra et al., 2018
	2Bck-SRP	Carbonates	5950 ± 60	6659–6936 cal BP	ICA – 16OS/0706	Ibarra et al., 2018
Hornos 2	3A-BOP	Organic matter	3660 ± 40	3880–4090 cal BP	BETA - 277563	Cruz y Cruz et al. 2014
Hornos 1	2A-SRP	Charcoal	3930 ± 40	4250–4440 cal BP	BETA - 300442	Cruz y Cruz et al. 2014
	3Bgk-SRP	Carbonates	12490 ± 60	14230–14910 cal BP	BETA - 277564	Cruz y Cruz et al. 2014
Los Montículos	Unit B ₁₋₃ ^a	Charcoal	4040 ± 110	3959–4095 cal BP	–	Schott, 2017
		Humates	3430 ± 30	3592–3730 cal BP	–	
Dos Pisos	Unit B ₁₋₃ ^b	Charcoal	4170 ± 30	4610–4768 cal BP	–	Copeland et al., 2012
		Charcoal	3910 ± 30	4280–4421 cal BP	–	Copeland et al., 2012

^a We suggest these units correspond to the BOP.

^b These units correspond to the SRP.

pedosediment (C horizon) is the lighter with low a^* b^* values. The upper horizons of the SRP unit (2A1, 2A2, 2Bw horizons) are darker becoming lighter in the lowermost 2Bck horizon. In the 2Bw the a^* and b^* vectors show more reddish and yellowish colors (Fig. 4).

The changes in color, evidenced by the a^* and b^* vectors, in the Cuatro Suelos profile, do not show big differences (Fig. 5). However, the L^* parameter clearly document the presence of diverse soil units. Again the lighter materials correspond to the sedimentary layers, while the Ah and 2Ah horizons are darker.

4.2.2. Grain size distribution

In the Maravillas profile, the 2Ap, 3Ap, and 3C horizons of the BOP unit have a similar grain size distribution. They consist mainly of silt (51–60%) and clay (20–35%). The sand content varies between 4.4 and 24.9% and reaches its maximum in the 3C horizon (Fig. 3). The

lowermost horizons of this section correspond to the SRP units. The 7AB and 7Bw horizons are more clayey, however the sand content is also high (35–38%). The SI behaves differently from BOP and SRP and shows some differences in their grain size distribution. The upper layers (LAB) consist mainly of sand (47.1–94.4%) and silt (2.3–36.7%). In contrast, the floodplain facies are silty (Fig. 3). The lower horizons (4AC, 4C, and 5C horizons) are more silty (63–37%) and the 6BC horizon has a higher amount of sand (52%).

In the Zanja profile, the grain size distribution shows some interesting differences among the horizons (Fig. 4). They consist mainly of silt (57–80%) and sand (11–31%). The clay content varies between 7 and 22% and reaches its maximum in the 2Bw and 2Bck horizons with 17 and 22%, respectively (Fig. 4). The 2A1 and 2A2 horizons are very similar in texture but the 2Bw1 and 2Bw2 horizons are quite different. The contrast is in the sand and silt contents, which are 75% and 8%,

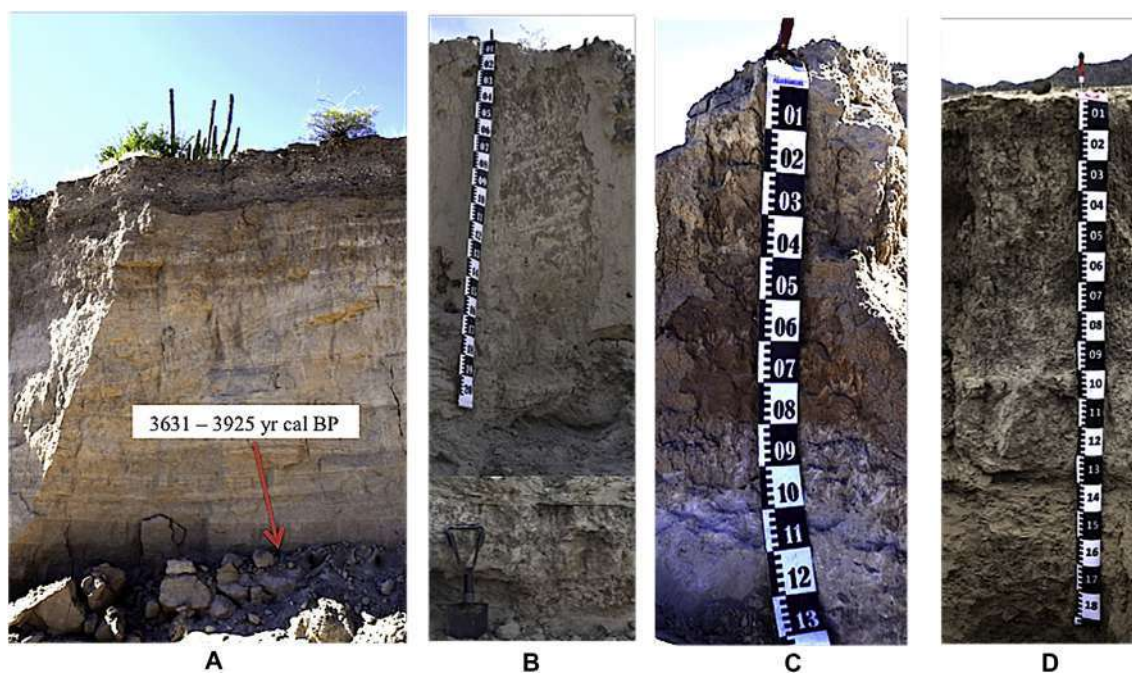


Fig. 2. Gran Cañón, Maravillas, Zanja and Cuatro Suelos profiles.

- Gran Cañón profile. Soil buried by alluvial sediments
- Maravillas profile
- Zanja profile
- Cuatro Suelos profile.

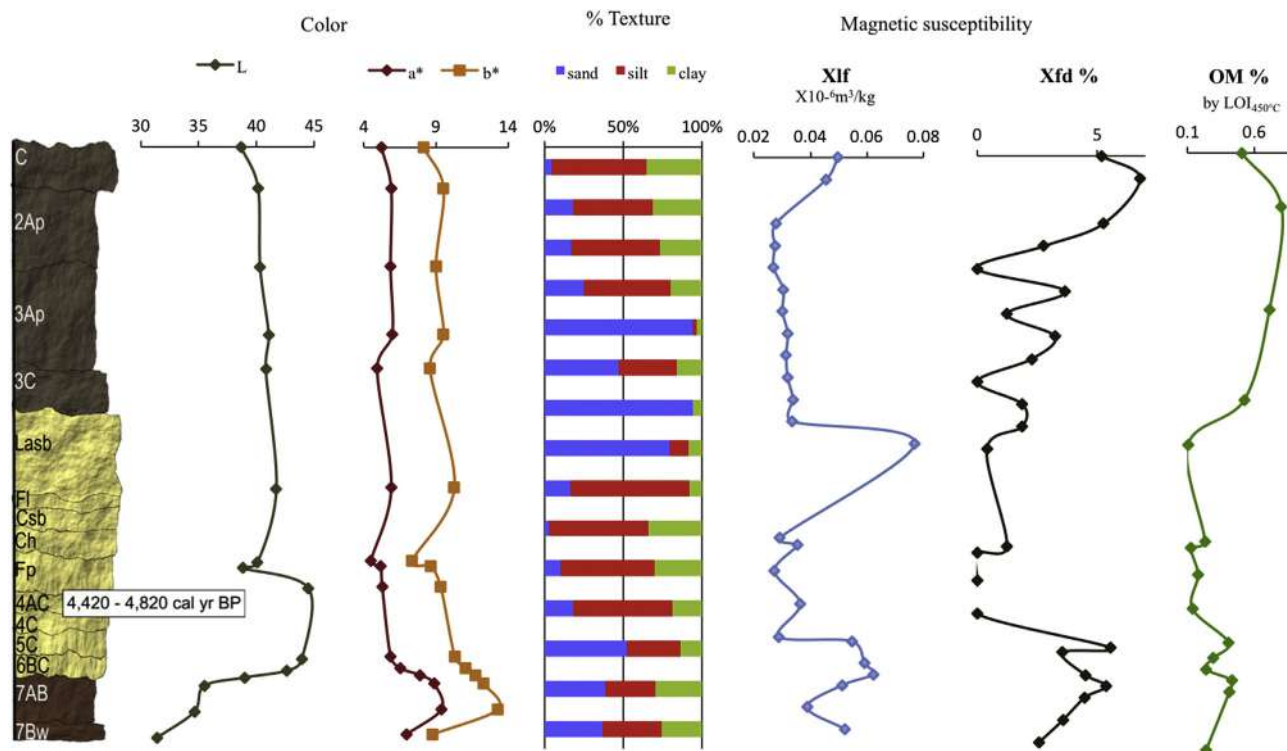


Fig. 3. Selected analytical properties of Maravillas profile. Color (L^* , a^* and b^* vectors); Grain size distribution; Magnetic Susceptibility ($\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$); Frequency dependent susceptibility ($X_{fd} \%$); and Organic matter (OM) content by $\text{LOI}_{450^\circ\text{C}}$. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

respectively in 2Bw2, and 30% and 50% in 2Bw1. These differences are interpreted as a discontinuity between these two horizons (then the horizon designation should be 2Bw for 2Bw1, and 3Bw for the 2Bw2).

The Cuatro Suelos texture is more homogeneous through the profile, where the dominance of silt fraction is clear (Fig. 5). Except for the uppermost sediment, all the horizons have clay, ranging from 37 to 16%. The sand fraction shows low percentages in all the horizons (less than 11%).

4.2.3. Magnetic susceptibility

Measurements of low frequency magnetic susceptibility (χ_{lf}) and frequency dependence of magnetic susceptibility (χ_{fd}) present low

values in the three studied profiles. Nevertheless, it is possible to observe differences among the three profiles, and among the horizons. Maravillas profile presents χ_{lf} values higher than those from the other two profiles; it also presents more variation among its horizons. In the other hand, the Cuatro Suelos profile presents the lowest χ_{lf} values and variations along the profile are smoother.

A notorious enhancement of the magnetic susceptibility (χ) is observed in the pedosediment (C horizon) of the upper part of the Maravillas profile, accompanied with the highest values of χ_{fd} , what evidence the presence of SP ultra-fine-grained components. The 2Ap, 3Ap, and 3C horizons have similar and lower values of χ , while the χ_{fd} is also lower, but its behavior is more heterogeneous (Fig. 3), which is

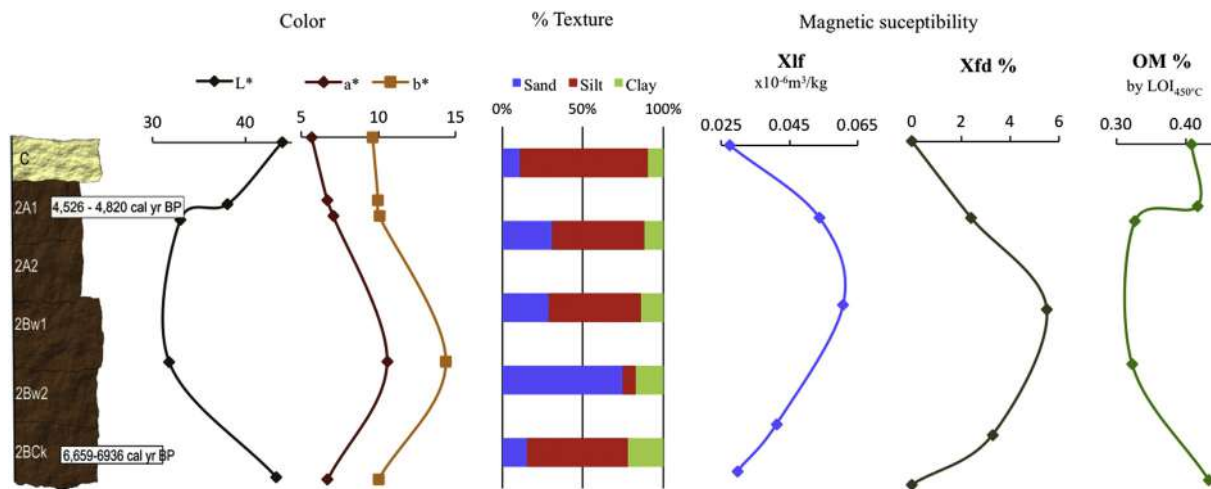


Fig. 4. Selected analytical properties of Zanja profile. Color (L^* , a^* and b^* vectors); Grain size distribution; Magnetic Susceptibility ($\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$); Frequency dependent susceptibility ($X_{fd} \%$); and Organic matter (OM) content by $\text{LOI}_{450^\circ\text{C}}$. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

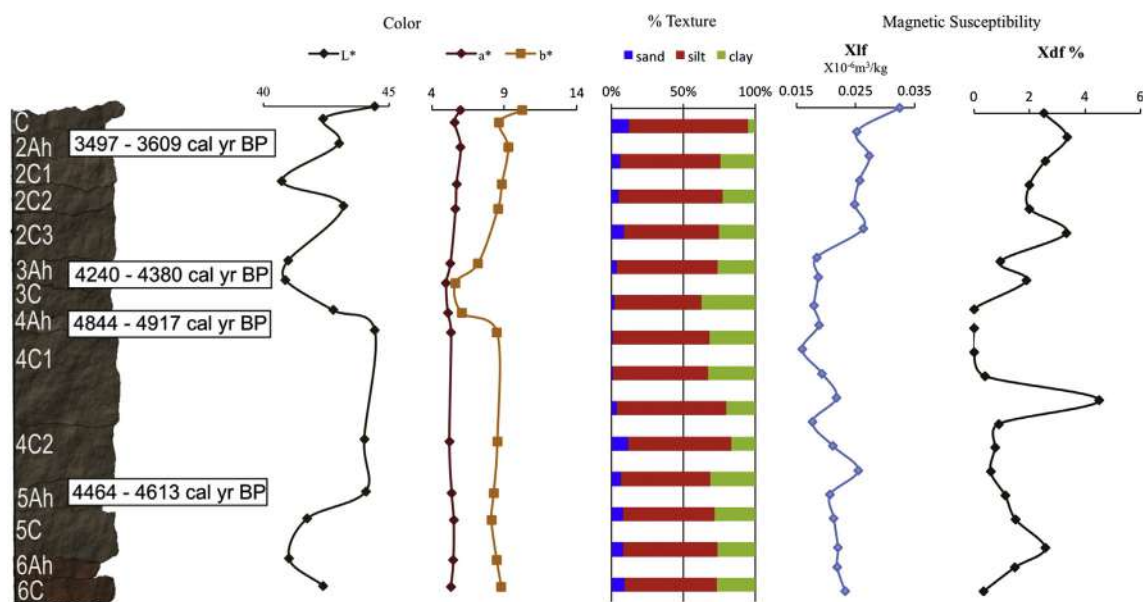


Fig. 5. Selected analytical properties of Cuatro Suelos profile. Color (L^* , a^* and b^* vectors); Grain size distribution; Magnetic Susceptibility ($\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$); Frequency dependent susceptibility ($X_{fd} \%$); and Organic matter (OM) content by $LOI_{450^\circ\text{C}}$. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

due to a slight increase in the concentration of SD fine grained magnetic particles.

On the contrary, the upper pedosediment in the Zanja profile, has the lowest χ value, with no contribution of fine magnetic particles, as it is pointed by the χ_{fd} percentages (near 0). The 2A1 and 2A2 horizons have the highest χ values accompanied by an increase of SP ultra-fine magnetic particles, with χ_{fd} closes to 5% in the 2Ap horizon (Fig. 4). These two parameters (χ and χ_{fd}) decrease in the lower horizons (2Bw and 2Bck horizons).

In the Cuatro Suelos section, once again the χ values are the highest in the uppermost sediment, although the amount of ultrafine particles is not high (Fig. 5). In the soil, buried by this sediment, values are slightly lower and homogeneous. The inferior horizons have lower values of χ , however the 5Ah horizon shows an enhancement (Fig. 5) but the amount of SP grains does not increase. It is strange that in the 4C1 horizon the presence of ultrafine particles is high (χ_{fd} is 4%), what is not common for C horizons. This behavior can be explained by the influence of reworked ultrafine magnetic particles in the sediment.

4.2.4. Soil organic matter (SOM) content by $LOI_{450^\circ\text{C}}$

The SOM contents in the Maravillas profile have values ranging from 0.1 to 0.8%; the maximum percentages correspond to the BOP unit, mainly in the 2Ap and 3Ap horizons (Fig. 3) while the minimum values are obtained in the SI (Fig. 3).

In Zanja profile the SOM content is lower and homogeneous (0.3–0.4%). LOI percentages are similar in the pedosediment, 2A1 and 2Bck horizons, with 0.4% (Fig. 4).

4.2.5. Soil organic matter characterization by ATR/FT-IR

The deconvolution method allows to visualize more clearly the differences in bands related to chemical composition of the SOM which are interpreted as modifications by fire events. In Maravillas profile, the ATR/FT-IR spectrum of all horizons has consistent bands at 1432 cm^{-1} and 1637 cm^{-1} . These bands correspond to the stretching of $\text{C}=\text{O}$ in conjugated carboxyls, quinones, amide I, and C stretching in carboxylates, respectively. Vibrations from aromatic structures might contribute to the band at around 1620 cm^{-1} with remarkable differences among horizons. The 2Ap horizon shows a tri-modal shape with an intense and prominent signal at 1352 cm^{-1} characteristic of pyrogenic-

N compounds, that can be explained by a constant accumulation of N-rich pyrogenic products. Another band-signal is found at 1568 cm^{-1} forming a discontinuous segment in the spectrum, which is associated to NH_2 in plain bend of amines and $\text{C}=\text{C}$ stretch ring of alkenes (Fig. 6a). The 3Ap horizon exhibits a depletion of organic compounds documented by weak signals in the spectrum, that has a bi-modal shape by deconvolution process, at 1588 cm^{-1} and at 1637 cm^{-1} ; the first is related to NH_2 in plain bend of amines, and the second to $\text{C}=\text{C}$ stretch ring of alkenes and/or $\text{C}-\text{C}$ stretch in aromatic compounds (Fig. 6b). The 3C horizon has a prominent peak at 1435 cm^{-1} that corresponds to stretching of $\text{C}=\text{O}$ in conjugated carboxyls, quinones, amide I. This strong signal suggests that the 3C horizon has labile organic matter, probably coming from a reworked Ah horizon that is redeposited in the alluvial sediment (Fig. 6c).

The 2A1 and 2A2 horizons of the Zanja profile have similarities in the ATR/FT-IR spectra (Fig. 6d and e). The Bi-modal shape with prominent band at 1636 cm^{-1} related to aromatic compounds is strengthened by the signal at 1491 cm^{-1} related to $\text{C}-\text{C}$ in ring of aromatic compounds. A weak signal of $\text{C}-\text{H}$ rock associated to alkanes is also observed. The spectrum of the 2A1 horizon is weaker what can be explained by organic matter depletion process probably due to erosion, which is not selective with the kind of material that is losing (Fig. 6d). It has no signal of pyrogenic organic matter as in the 3Ap horizon of the Maravillas profile.

In all horizons of the Cuatro Suelos profile, the ATR/FT-IR spectra show bi-modal shapes with broad bands centered at 1428 cm^{-1} and 1637 cm^{-1} , respectively (Fig. 6f–i). For horizons associated to Cuatro Suelos, we observe that the spectra of 3Ah and 4Ah horizons exhibit well-defined aromatic compounds and the presence of N in charcoal, that is interpreted as a signal of pyrogenic organic compounds (Mastrolonardo et al., 2014, 2017). Particularly, the 3Ah horizon shows an incipient band signal at 1367 cm^{-1} attributable to the alkanes ($\text{C}-\text{H}$ rock) and probably to N in amorphous carbon; a band that form a shoulder at 1491 cm^{-1} related to $\text{C}-\text{C}$ stretch in ring of aromatics compounds (Fig. 6f). At 4Ah horizon the signal of aromatics fire-like compounds is strong, probably by intense thermal alteration that increase the signal at 1594 cm^{-1} related to $\text{C}-\text{C}$ in ring and nitrogenated compounds in $\text{N}=\text{O}$ and NH_2 and has a shoulder at 1468 cm^{-1} associated to $\text{C}-\text{C}$ stretch in ring of aromatics compounds and CH_2 and CH_3

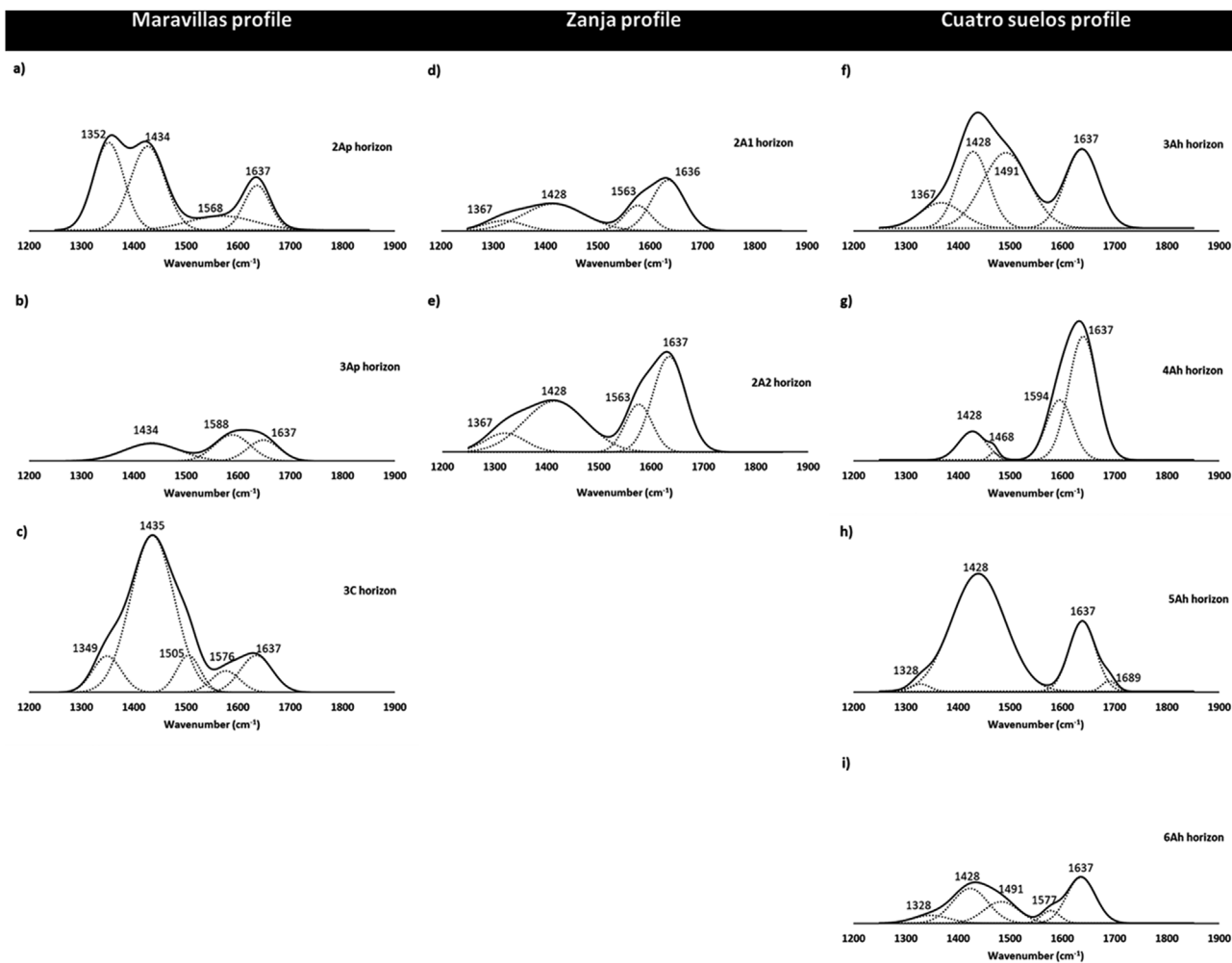


Fig. 6. ATR/FT-IR spectrum of Maravillas, Zanja and Cuatro Suelos profiles.

- a) Maravillas profile-2Ap horizon
 b) Maravillas profile-3Ap horizon
 c) Maravillas profile-3C horizon
 d) Zanja profile-2A1 horizon
 e) Zanja profile-2A2 horizon
 f) Cuatro Suelos profile-3Ah horizon
 g) Cuatro Suelos Profile-4Ah horizon
 h) Cuatro Suelos profile-5Ah horizon
 i) Cuatro Suelos profile-6Ah horizon. Dotted lines are deconvoluted peaks in Gaussian model.

alkanes and a band that increase (Fig. 6g).

For the 5Ah horizon we observed traits in spectrum with aromatic and aliphatic molecules resistant to decomposition (bands described above, Fig. 6h), with a common shape of a soil without signals of pyrogenic organic matter formation; additionally, two incipient bands at 1328 cm^{-1} and at 1689 cm^{-1} was observed, these are related to amines (Ar-N stretch), and to C=O in carboxylic acids and C=N in diverse compounds, respectively (Fig. 6h). The 6Ah horizon spectrum shows lower intensity of IR signal with bands at 1328 and 1491 cm^{-1} , and a signal at 1577 cm^{-1} that can be related to amorphous carbon band. This last horizon, has also most diverse pyrogenic aromatic compounds and depletion of IR signal intensity, these can suggest differences in fire event that modify the organic matter as natural fire-like events (Fig. 6i).

4.3. Micromorphological observations of selected horizons of Maravillas and Zanja profiles

The micromorphological analysis reveals contrasting differences

between pedogenic and sedimentary features through Maravillas profile. The BOP denotes dominance of blocky microstructure; however, some areas show granular aggregation and spongy fabric (Fig. 7a) The coarse material is poorly-sorted and consists of silt and minor proportion of sand particles (with predominance of quartz and plagioclase). Organic matter is dark-pigmented in a clayey micromass and some charcoal is observed, which retains cellular structure of plant tissues (Fig. 7b).

The SI has diverse micromorphological features through the unit; the upper layers are dominated by grain-supported microstructure. Locally, cross-bedding deposition structures (Fig. 7c) that are typical of current ripples, are observed. The opaque minerals have imbrication and normal gradation in the central sandbar facies layer (Fig. 7d). An incipient chitonic c/f relation is observed around sand particles. Quartz and feldspars are abundant, mainly from schists (with muscovite, chlorite, and epidote) and microcrystalline rocks; garnet, volcanic glass, microcline, hornblende, and goethite are also present, but they are scarce, observed only in isolated particles. The lower part of the SI show an incipient pedogenesis, with the formation of 4AC, 4C, 5C, 6BC

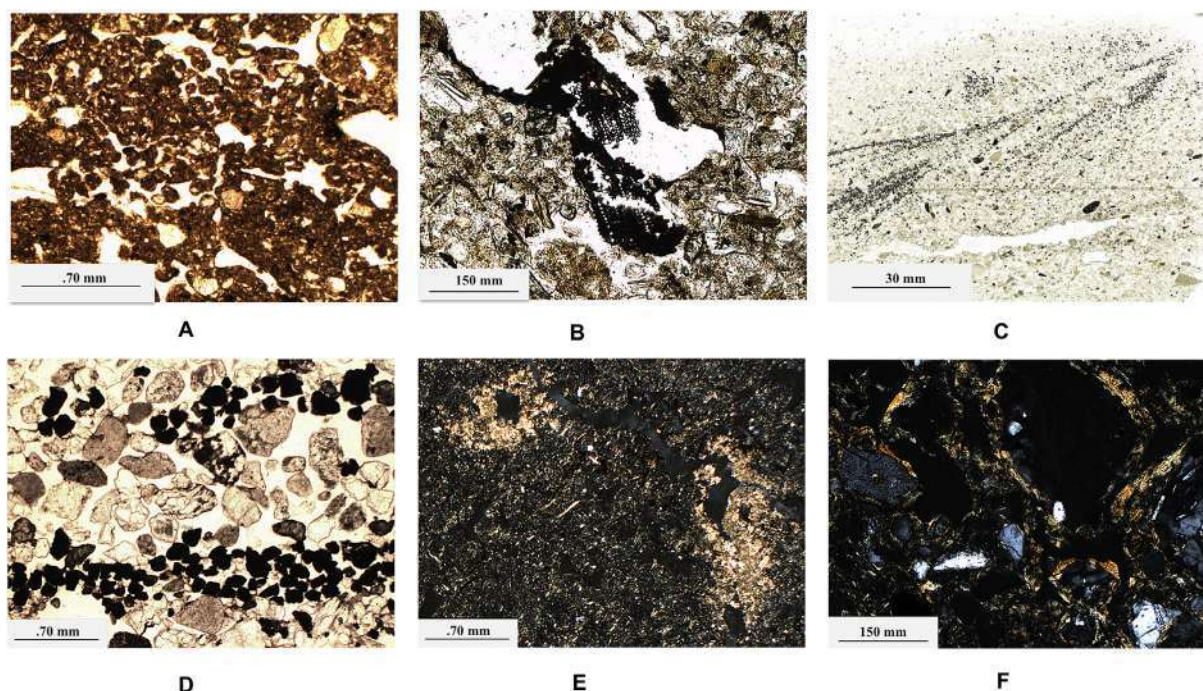


Fig. 7. Micromorphology of Maravillas profile.

- a) Granular structure, 2Ap horizon (PPL – plane polarized light)
- b) Charcoal fragments with still preserved tissue structure, 2Ap horizon (PPL).
- c) Sandbars facies - crossed lamination – horse tale type (PPL)
- d) Microlamination of opaque particles (PPL)
- e) Heterogeneous coating and secondary carbonates, 4C horizon (NX).
- f) Thin illuvial clay coating inside the pores, 7Bw horizon (NX).

horizons. The 4C and 5C horizons have a grain supported microstructure, enriched in well-sorted silty mineral particles. The rest of the horizons (4AC, 6BC horizons) is dominated by a moderately developed sub-angular blocky microstructure. Charcoal particles are very common, in the 4AC and 4C horizons, where secondary carbonates and gypsum are also accumulated (Fig. 7e).

Redoximorphic pedofeatures as Fe-Mn mottles and nodules in the groundmass are present in the lower part of the sequence (7AB, 7Bw horizons), belonging to the SRP. The 7Bw horizon also shows thin illuvial clay coatings over silt and sand grains (Fig. 7f).

The Zanja profile shows a more complete SRP unit, which includes the organic horizons, what is rare in the La Playa alluvial fan. The 2A1 horizon presents a well-defined granular microstructure with fine humic pigmentation and high porosity. Mesofauna activity is evident by crescent shape infillings (Fig. 8a), associated with pedogenic micritic carbonates (Fig. 8b). The blocky microstructure of the 2A2 horizon is differentiated by planar voids; nevertheless, the excremental infillings generate microgranular biogenic zones, highlighted by fine dark humus pigmentation. In the lowermost horizons (2Bw1, 2Bw2, 2Bck) Fe-Mn mottles (Fig. 8c) and ferruginous typical nodules occur in the groundmass. Clay illuvial coatings are more evident in the 2Bw2 horizon. Carbonates are common in the whole profile, including micrite component in the groundmass (Fig. 8d).

4.4. Radiocarbon dating

New ages from the Cuatro Suelos profile are obtained (Table 1). The ages are: 3497–3609 cal BP for the 3Ah horizon; 4240–4380 cal BP for the 4Ah horizon; 4844–4917 cal BP for the 5Ah horizon; and 4464–4613 cal BP for the 6Ah horizon. Except for the 5Ah horizon, which age is older than 6Ah horizon, the rest dates are consistent with the published dates for the BOP and the SRP (Copeland et al., 2012; Cruz-y-Cruz et al., 2014; Schott, 2017; Ibarra et al., 2018). The

radiocarbon dating of the organic matter from the 4AC horizon (the base of SI) in the Maravillas profile yielded the age 4420–4729 cal BP (Ibarra et al., 2018). The age from an incipient soil, buried by 10 m of alluvial sediments in the mouth of the alluvial fan, in the Gran Cañón, is 3631–3925 cal BP (Fig. 2a).

4.5. Pollen analysis

Although the amount of pollen found in the Cuatro Suelos profile is low, the diversity is high. We identify 44 taxa in all the studied horizons.

The fossil pollen results are presented at the pollen diagram (Fig. 9), which shows four zones different zones, separated according to the radiocarbon ages of the organic horizons (Table 1):

Zone 1, 210 to 185 cm depth 5Ah, 5C horizons (4844–4917 cal BP). In this Zone, the highest percentages of Agavaceae are found, with means values of 30%, followed by Ambrosia 25%, Pinus 10%. The Pteridophyte group, which includes *Selaginella*, *Pellaea*, *Polypodium*, presents the higher values with 40% (Fig. 9 and 10). These assemblages are similar to those found today in open pine forest or chaparral communities at higher elevation (800–1000 m.a.s.l) than the Playa site (Ortega-Rosas et al., 2016). All these assemblages can be related to the intensity in land use at the site because the onset of a humid period with the presence of cultivated plants such as Chenopodiaceae and Cereals.

Zone 2, 185 to 130 cm depth – 4Ah, 4C horizons (4240–4380 cal BP). Although cluster analysis indicates one zone for this samples, it must be subdivided into two different zones: Zone 2a (from 160 to 180 cm depth) and Zone 2b (from 130 to 155 cm depth) due to the difference in percentages of principal pollen types. In Zone 2a, higher percentages of *Ambrosia* with means of 70%, followed by *Boherhaavia*, not recorded before, and Chenopodiaceae with means

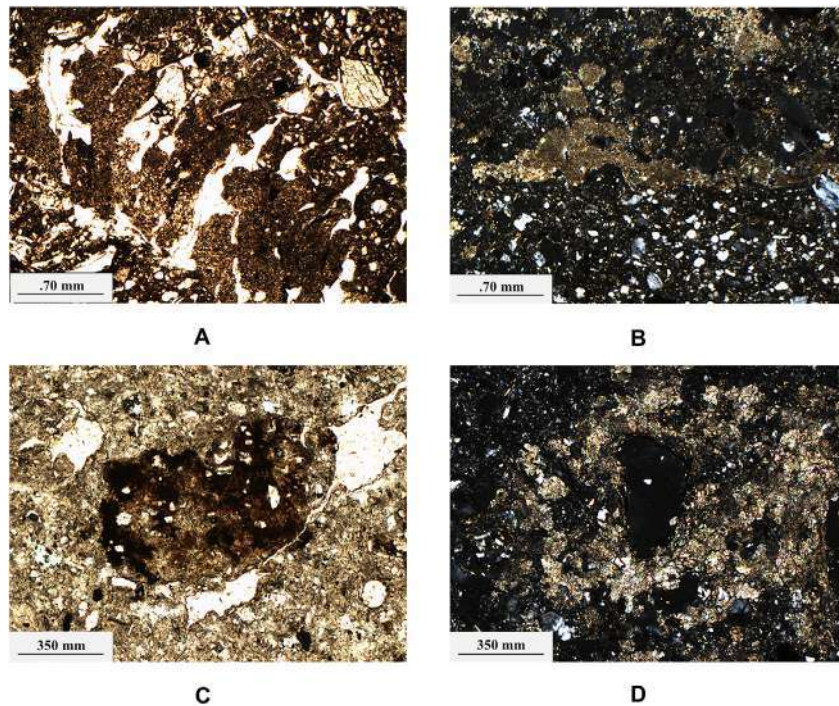


Fig. 8. Micromorphology of Zanja profile

- a) Mesofauna activity in crescent shapes infillings, 2A horizon (PPL)
 b) Carbonates in the crescent shape, 2A horizon (NX).
 c) Redoximorphic processes by occurrence of Fe-Mn impregnations in the groundmass, 2Bw horizon (PPL)
 d) Secondary carbonates, 2Bck horizon (NX).

of 10% are found; Pteridophyte group decreases considerably to means of 5%, cereal pollen is found with percentages closer to 5% at 180 cm depth (Fig. 9 and 10). In Zone 2b we found a decreasing in *Ambrosia* with means of 15%, and an important increasing of Chenopodiaceae and Poaceae is recorded with means of 30% and 35% respectively. This pollen assemblage is related to modern tropical scrub-grassland vegetation (Ortega-Rosas et al., 2008, 2016). This short period indicates that warmer and arid conditions appear at this region (Van Devender et al., 1990). Inside this zone (Zone 2b) the higher percentages of Chenopodiaceae, Poaceae, and Ulmaceae (15%) indicate a short period of intensification of the occupation and agricultural activities at this site.

Zone 3, 130 to 55 cm depth, 3Ah, 3C horizons (3497–3609 cal BP): during this period more arid species appear with high percentages of *Ambrosia* (50%), Poaceae (10%), *Pinus* (5%), *Prosopis* (5%), *Parkinsonia*, Asteraceae and Chenopodiaceae (< 5%). Spores group

has low values with means of 10% (Fig. 9 and 10). These vegetation taxa correspond to those assemblages found today in the tropical deciduous forest between 600 and 800 m.a.s.l (Ortega-Rosas et al., 2008, 2016). This zone represents less occupation or abandonment of the site revealed by the low percentages in cultivated plants such as Chenopodiaceae, Poaceae and others.

Zone 4, 55 to 0 cm depth, 2Ah and 2C horizons (3400 cal BP to present): during the most recent period most actual vegetation taxa are recorded with a dominance of Asteraceae (25%), Fabaceae and *Prosopis* (20%), Nyctaginaceae (15%), Myrthaceae. Chenopodiaceae, Poaceae and *Ambrosia* (10%), and *Pinus* (mean of 10%). Spores group has minimum values at this zone (Fig. 9 and 10). This assemblage represents more land use at the site due to increasing herbs and tropical-desert trees.

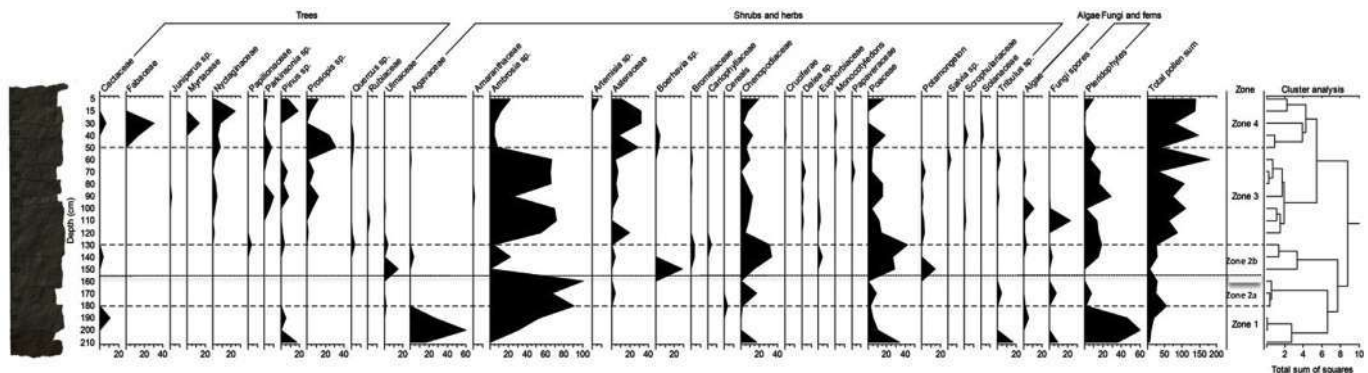


Fig. 9. Pollen diagram of La Playa, Sonora, México. The “x” axis represents the percentage of each pollen taxon related to the sum of pollen and spores, while for the spores group it represent the percentages calculated only with the sum of spores (Algae, Fern and Fungi). The “y” axis represents different samples analysed from the profile corresponding to different calibrated years.

5. Discussion

5.1. The coincidence between the onset of the agriculture and the environmental conditions (high geomorphic dynamics and climate instability)

The earliest evidences of agriculture in the studied site coincide with the end of the Altithermal period (around 4500 yr BP, Antevs, 1955). Our records show that by this time a long period of landsurface stability ended, marked by the formation of a well-developed palaeosol, the SRP or the Big Red mentioned by Sánchez (2010) and Sánchez et al. (2014). The radiocarbon dates obtained by humus and charcoal of the Ah horizon of this palaeosol (summarized in Table 1), falls within the 4800–4200 yr BP interval. These dates indicate the minimum age of the palaeosol, when the soil was buried. Active geomorphic processes mark the subsequent period: erosion and sedimentation, with no pedogenesis. Strong erosion destroyed the organic horizons of the SRP in most of the alluvial fan making difficult to find organic materials from this soil). At the Zanja locality, a set of sections shows different degrees of soil loss by erosion: minimal, with the Ah horizons preserved; medium, with the loss of the Ah and part of the Bw horizons; and strong, with the profile truncated down to the Bk horizon (Fig. 11). The ATR/FT-IR spectra of the Zanja 2A1 and 2A2 horizons also support this behavior. Although the spectra are similar (Fig. 6d and e), the uppermost 2A1 horizon reflects an organic matter depletion process probably due to erosion.

Sometimes on top of the SRP soil sequence (complete or truncated), a predominantly sandy sedimentary sequence is formed (identified as SI). In the Maravillas profile, the most complete sequence of sedimentary layers is found. Judging from the stratigraphic position and relatively coarse sandy texture of these layers we correlate them with B₀ unit of Copeland et al. (2012) and the B₀₇ unit of Schott (2017). The date obtained in the base of this unit – about 4600 cal BP supports this correlation: it fits into the interval 4690 to > 4350 established for although B₀ (Copeland et al., 2012). The B₀₇ unit has no instrumental dates however our result is consistent with the age of the overlying (and thus younger) B₁₋₃ unit which spans between 4050 and 3660 cal yr BP. Comparing QI of Maravillas section with the correlative profiles: Dos Pisos of Copeland et al. (2012) and Los Montículos of Schott (2017), we conclude that the studied sequence is most developed and diverse: it shows a remarkable variation of sedimentation processes: laminar floodplain flow (FI); high-energy flows which forms sand bars and channel deposits; and even fluvio-eolian deposition with a high amount of silt components. The variation in the type of sedimentation is recognized clearly by sedimentary structures, visible in the field and in thin sections (Fig. 7c and d) and by changes in the grain size distribution (Fig. 3). Pedogenetic features in this SI are very weak: no weathering and no humus accumulations what is evidenced by the light colors of the sequence (Fig. 3). In some layers, a weak biogenic structure is detected accompanied by Fe-Mn nodules, particularly in the floodplain deposits. These changes in the deposits reflect the dynamic of the sedimentation process, related to the environmental conditions. Closer to the Sierra de Boquillas (Fig. 1 and 2a), we detect also the strong phase of fluvial deposition coinciding with the same period. The age of an incipient soil (around 4000 yr. BP, Table 1) buried by more than 10 m of thick alluvial sediment supports this observation. At the same time in multiple profiles of Zanja site as well as in the Hornos section studied earlier by Cruz y Cruz et al (2014) where SI is absent (Fig. 12), this interval is marked by a strong erosional phase, which truncated SRP. We suggest that a period of major enhancement of geomorphic processes and landscape instability took place in the second half of 5th millennium BC. At the continental and even at global scale, a great drought was registered at 4200 yr BP (deMenocal, 2001; Staubwasser et al., 2003; Booth et al., 2005; Arz et al., 2006) that can be related to those changes. Precisely at this date, we recorded in our pollen analysis at Cuatro Suelos (Zone 2b, Fig. 9) a change to more arid conditions with the increasing of herbs such as Poaceae and Chenopodiaceae

principally, as well as a decreasing in *Ambrosia*, reflecting the arid conditions of typical desert zones at this region (Van Devender, 1990; Metcalfe, 2006). The increasing of C4 Grasses in North America during late-middle Holocene is related to increasing summer temperatures (Holmgren et al., 2007).

We suggest that this highly geomorphic dynamic phenomenon is triggered by climatic instability that is recorded in North America during the Late Holocene (Rasmussen et al., 2006; Perez-Cruz, 2006; Brunelle et al., 2010; Antinao and McDonald, 2013; Ortega-Rosas et al., 2017).

5.2. Environmental setting of La Playa agricultural societies: arid ecosystem, stimulating water resource management

Pedogenetic and sedimentary characteristics of BOP and overlying deposits, documented earlier (Cruz-y-Cruz et al., 2014) and observed in Maravillas and Cuatro Suelos sections, suggests dry climatic conditions during the whole period of their development (4000–1500 yr BP) which corresponds to the period of maximal development of the EAP occupation (Huckell, 1995; Carpenter et al., 2005, 2007; 2009; Mabry, 2008) (Fig. 12). Nevertheless short periods of wetter conditions recuperation were detected through pollen analysis: around 3500 yr BP and 2000 yr BP, Fig. 9) with the increasing of humid indicator such as Pteridophyte group, algae, and *Prosopis* a species of mesic environments. It is well known for the North American desert, the high fluctuations in climate during late Holocene (Van Devender et al., 1990; Metcalfe et al., 2015; Holmgren et al., 2006) then our record can be placed in a more regional context.

With some differences, La Playa chronology and stratigraphy (Units A to C) of Copeland et al. (2012) are in agreement to our observations: B0 (and perhaps partly the B1/B2 Units) correspond to the SI; Units B2, B3, and B4 are the BOP. Concerning the Unit A, the authors observe that it is overlain by a Red Palaeosol with abundant carbonate concretions, which separates the Unit B. However, this Red Palaeosol is not taken into account for their stratigraphy. B0 has no archaeological materials; they are scarce in B1/B2 and concentrate in B4 and B5 (Copeland et al., 2012; Schott, 2017).

Regarding the paleoenvironmental inferences, we disagree with the conditions suggested by Copeland et al. (2012). They suppose that the Units B2, B3, and B4, what we correlate to the BOP, are deposited exclusively by fluvial processes, in a permanently moist, even water saturated (wetland) environment. However, the pedological features in the BOP, which is a synsedimentary Fluvisol do not fit into this interpretation. A water saturated environment usually promote anoxic conditions which generate very specific set of features: 1) accumulation of organic materials like peat or hydromorphic black humus (“Anmoor”) horizons, due to hampering of organic material decomposition caused by oxygen deficiency; and 2) gleyic color pattern of the mineral horizons: combination of iron-depleted pale blueish or greenish areas with the concentrations of oxidized iron, due to Fe and Mn redistribution by redoximorphic processes. We do not find any considerable development of these features in the BOP. Instead, in the syn-sedimentary Fluvisol, we observe a combination of properties typical for well drained dry environment: development of coprogenic structure (Fig. 7a) as a result of mesofauna activity (which would not take place under water saturated anoxic conditions!), moderate accumulation of colloidal humus (Fig. 7a), abundant secondary pedogenic (but not hydrogenic!) carbonates and high variability in pollen content with species from dry climate such as Asteraceae, Cactaceae (30 cm depth at Cuatro Suelos profile, Fig. 9). We agree that moist conditions can be temporally developed during the accumulation of the sediments of the Unit B as it is evidenced by hydrophyllous fossil mollusks recovered by Copeland et al. (2012). However, we assume that these wet phases were rather short, caused by flooding events, which also triggered alluvium deposition, and alternated with dry periods promoting semiarid soil development. The pollen record does not show the presence of wetland



Fig. 10. Fossil pollen plates of the profile Cuatro Suelos at “La Playa” site. All photographs were taken with an optical microscope at 100 x.

vegetation but evidences these climatic fluctuations, changing from communities related to tropical grassland vegetation in 4Ah horizon (Zone 2), to tropical deciduous forest, recorded in the 3Ah horizon (Zone 3), and showing actual vegetation in the Zone 4 (Fig. 9). The presence of *Pinus* in this Zone (15 cm depth) documents short periods of wetter and cooler climate than today, which are also recorded in other profiles in North America (Asmerom et al., 2013). The pollen assemblage obtained from the 5Ah horizon indicates colder and wetter climate, which occurred between 4844 and 4917 cal BP. However, this conclusion should be taken carefully, because the age of the 5Ah horizon is older than the lowermost horizon (6Ah horizon) found in the Cuatro Suelos profile (Table 1). We interpret that the 5Ah horizon involves old organic matter, coming from lower stratigraphic levels (probably from the SRP). The ATR/FT-IR spectrum (Fig. 6h) exhibits the dominance of aliphatic molecules resistant to the decomposition, which can be the residuals of such old organic matter.

We further speculate that both semiarid climate and moisture deficiency stimulated early development of water management technologies: construction of the net of irrigation channels. Regular long-term irrigation could have major influence on the development of the upper palaeosol-sedimentary units that will be discussed below.

5.3. Origin of La Playa silt: a syn-sedimentary anthroposol in the irrigation deposits?

In the context of the paleoenvironmental interpretation of the upper soil-sedimentary unit, the BOP, the following question arises: which is the dominant sedimentation mechanism which maintains the BOP permanent aggradation providing continuously the parent material? The composition and structural characteristics of the SI, better developed in the Maravillas profile, are quite different from those observed in the BOP. The deposits of the SI are strongly laminated both at macro- and microscopic scale, very well sorted with predominance of silt fraction and showing clear orientation pattern of the elongated grains. The natural sedimentation processes (mostly fluvial) involve in the development of this unit are quite clear and have been discussed above (paragraph 5.1). On the contrary, the upper sedimentary strata belonging to the BOP, and better characterized in the Cuatro Suelos profile (Fig. 5), show strikingly different features: very weak or absent lamination; heterogeneous poorly sorted grain size composition, with major silt fraction but also with sand fraction (that is higher in Maravillas); angular coarse sand particles with no preferred orientation, and high diversity and better conservation of fossil pollen with higher total pollen sum (Fig. 9). Could deposits with such properties have a

natural fluvial origin as supposed for the correlative B2 – B4 Units by Copeland et al. (2012) and Schott (2017)? In particular Schott (2017) states that these “low energy” units are overbank alluvium deposited by floods, thus interpreting La Playa geoform as a floodplain. Although sediments from some occasional natural floods can contribute to these units (as discussed above in the paragraph 5.2) we doubt that only fluvial processes are entirely responsible for their deposition.

The very high silt content in the youngest upper stratum of La Playa sequence, at Maravillas and Cuatro Suelos locality, the high silt content could evidence involvement of aeolian processes; this supposition fits well to the reconstructed dry environmental conditions for this depositional period (see 5.2). The concept of “Desert loess” (Smith et al., 2002), which explains formation of silty sediments in an arid environment due to combined effect of physical weathering and pulsing fluvial and wind transportation, can be considered to explain the genesis of this unit. Moreover the presence of *Pinus* at 15 cm depth can also be attributed to long distant transport of this pollen into the site by winds (Yong-Shang and Chen-Sen, 2017). However, again, the presence of very poorly sorted coarse sand-casts doubts on the aeolian hypothesis (although does not deny incorporation of the windblown component).

We suppose that the human-induced deposition due to artificial irrigation is the process, which provides the best explanation for the observed properties of the upper La Playa stratum (the BOP and probably the whole set of “low energy” layers B1-B5 and partly C). Copeland et al. (2012) and Schott (2017) already mentioned this process as possible minor contributor of sediments to this sequence. We argue that this can be the principal deposition mechanism. Water management for agricultural purposes proceeds in La Playa continuously for a long-time that can supply material for persistent aggradation. The irrigation water from the canals carries heterogeneous suspensions, which gives rise to poorly sorted sediments. Land cultivation linked to the irrigation causes soil mixing and destruction of sedimentary structures. Pollen evidence of cultivation arises for the presence of Chenopodiaceae, Asteraceae, Ambrosia, and Poaceae, which appears together at upper levels of Cuatro Suelos profile (Figs. 9 and 10), this taxa is well recognized such as an indicator of plant cultivation and forest clearance by prehistoric North Americans (McLauchlan, 2003). Quite typical feature of irrigated soils of arid regions is development of surface crust (Bishay and Stoops, 1975), which is further fragmented and incorporated into the ground-mass. We observed multiple crust fragments in the thin sections from BOP of Maravillas section. Also, the incorporation of anthropic materials (like bone microfragments present in BOP) are also typical features of irrigation sediments.

In general, many aspects of the micromorphological pattern as well



Fig. 11. Zanja locality, a set of sections shows different degrees of soil loss by erosion.

as fossil pollen content, of the upper soil-sedimentary stratum of La Playa resemble the sediments of more recent (but still pre-Hispanic) irrigation channels in Arizona studied by [Purdue et al. \(2010\)](#). The ancient irrigation sediments with similar characteristics have been described in various desert regions with the long-term agricultural water management in the Old World (e.g. [Meister et al., 2017](#)).

6. Conclusions

La Playa has a complex history since the Late Pleistocene to the Late Holocene. The oldest pedostratigraphic unit of the area, the SRP is the product of a long period of landscape stability. Its pedogenesis is interrupted by a stage of strong climatic instability causing erosion of the SRP and sedimentation, which produces a sedimentary interval (SI) just at the end of the Altithermal and a vegetation composition different from the actual one. The younger palaeosol, the BOP formed in the Late Holocene, is less developed and strongly affected by the EAP occupation with many pollen types indicators of cultivation at the site.

We suggest that the environmental conditions at the end of the Altithermal were more humid (with higher precipitation) which increased the geomorphic processes. During this stage, the earliest evidences of maize cultivation has been found in La Playa (around 4200 yr BP) ([Sánchez, 2016](#)), thus this increase in precipitation could be an

attractor for the agriculture societies. This correlates well with our pollen record as we found cereal-type pollen around 4500 yr BP at Cuatro Suelos profile indicating cultivation activities at the site. However, these conditions were not permanently, and drier environments appeared during the beginning of Late Holocene with the presence of drier vegetation. Consequently, the inhabitants of La Playa had to implement strategies for sustain their activities.

The BOP can be considered as an Anthrosol, as it is strongly modified by human activities. The human effect can be detected in some traits of the pyrogenic organic matter due to the induced-fire which is different to the pyrogenic charcoal from natural fires found in the Cuatro Suelos profile, but these traits are not conclusive without pedogenic and archaeological contexts. These observations are in good agreement to the rock magnetic properties found in the studied horizons, where a dominance of superparamagnetic magnetite particles formed by fires. However, there is necessary to investigate with more detail the influence of fires in each signal.

Acknowledgments

This research was funded by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), México project 236623 (E. Solleiro). Thanks to the Archaeological Project La Playa of INAH-Sonora. We acknowledge

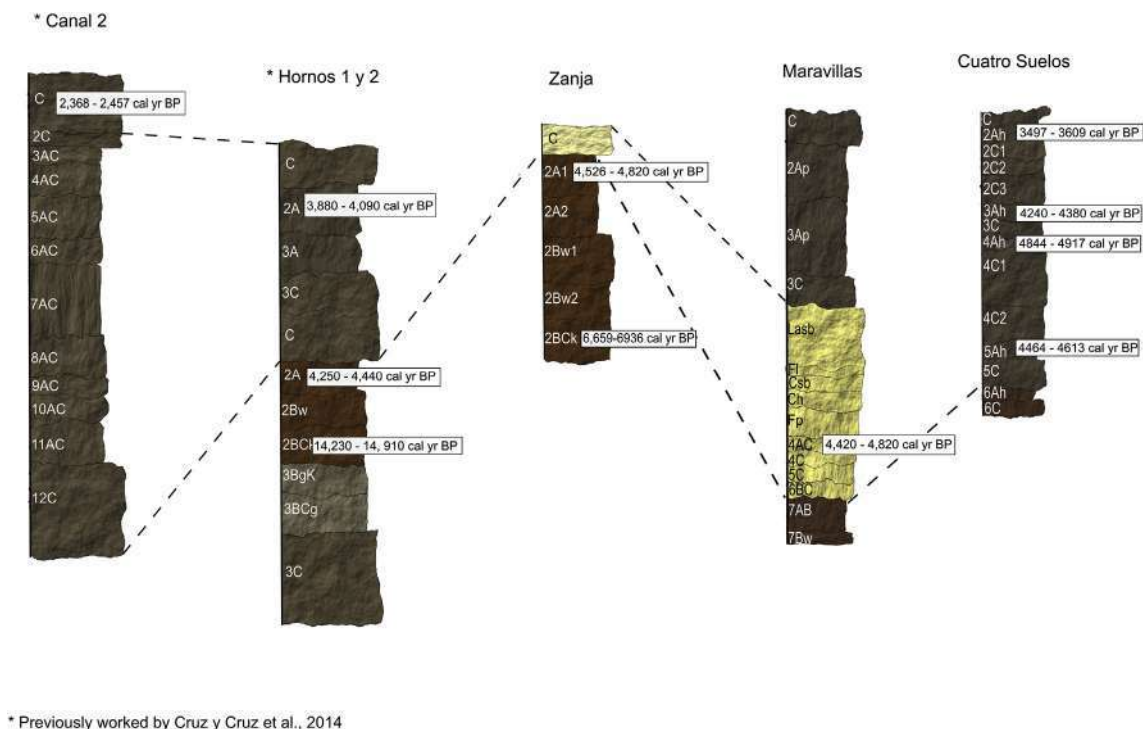


Fig. 12. Proposed stratigraphic correlation.

the technical assistance of Jaime Díaz, René Alcalá, Ofelia Beltrán Paz and Arturo Mendoza Flores and the Cuerpo Académico de Recursos de la Universidad Estatal de Sonora (UES). We are very grateful to the anonymous reviewers whose thorough and strict evaluation highlighted deficiencies and thus promoted its improvement.

References

- Antevs, E., 1948. The great basin, with emphasis on glacial and postglacial times. *University of Utah Bulletin* 38 (20), 168–191.
- Antevs, E., 1955. Geologic-climatic dating in the west. *Am. Antiq.* 20, 317–335.
- Antinao, J.L., McDonald, E., 2013. An enhanced role for the Tropical Pacific on the humid Pleistocene-Holocene transition in southwestern North America. *Quat. Sci. Rev.* 78, 319–341.
- Arz, H.W., Lamy, F., Pätzold, J., 2006. A pronounced dry event recorded around 4.2 ka in brine sediments from the northern Red Sea. *Quat. Res.* 66 (3), 432–441.
- Asmerom, Y., Polyak, V.J., Rasmussen, J., Burns, S.J., Lachniet, M., 2013. Multidecadal to multicentury scale collapses of Northern Hemisphere monsoons over the past millenium. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.* 110 (24), 1–6.
- Bengtsson, L., Enell, M., 1986. Chemical analysis. In: Berglund, B.E. (Ed.), *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp. 423–451.
- Bishay, B.G., Stoops, G., 1975. Micromorphology of irrigation crusts formed on a calcareous soil of the mechanized farm, north-west Egypt. *Pedologie* 25, 143.
- Booth, R.K., Jackson, S.T., Forman, S.L., Kutzbach, J.E., Bettis III, E.A., Kreig, J., Wright, D.K., 2005. A severe centennial-scale drought in midcontinental North America 4200 years ago and apparent global linkages. *Holocene* 15 (3), 321–328.
- Brunelle, A., Minckley, T.A., Blissett, S., Cobabe, S.K., Guzman, B.L., 2010. A ~8000 year fire history from an Arizona/Sonora borderland ciénega. *J. Arid Environ.* 74, 475–481.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., Babel, U., 1985. *Hanbook for Soil Thin Section Description*. Waine Research Publications, Wolverhampton, UK.
- Carpenter, J., 2009. La Playa, Sonora, en. *Arqueol. Mex.* XVII (97).
- Carpenter, J., Sánchez, G., 2013. Los cambios ambientales del Holoceno medio/Holoceno tardío en el Desierto de Sonora y sus implicaciones en la diversificación del yuatozacano y la difusión del maíz. *Diálogo Andino* 41, 199–210 (Chile).
- Carpenter, J., Villalpando, M.E., Sánchez, G., Martínez, N., Montero, C., Morales, J.J., Villalobos, C., 2003. Proyecto Arqueológico La Playa: Quinto Informe de la Temporada Verano 2002, Análisis de los Materiales Arqueológicos y Propuesta para la Temporada Invierno 2003. Unpublished site report submitted to INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia), Hermosillo, Sonora, México.
- Carpenter, J., Sánchez, G., Villalpando, E., 2005. The late archaic/early agricultural period in Sonora, Mexico. In: Vierra, B. (Ed.), *New Perspectives on the Late Archaic across of the Borderlands*. University of Texas Press, Austin.
- Carpenter, J., Sánchez, G., y Villalpando, E., 2007. El Período de Agricultura Temprana en Sonora. Memoria del Seminario de Arqueología del Norte de México, editado por Cristina García M. y Elisa Villalpando C. Coordinación Nacional de Arqueología/Centro INAH Sonora, Hermosillo, Sonora, pp. 59–78.
- Carpenter, J., Villalpando, E., Sánchez, G., 2009. La Playa: an early agricultural period landscape. *Archaeology Southwest* 23 (1).
- Carpenter, J., Sánchez, G., Watson, J., Villalpando, E., 2015. The La Playa Archaeological Project: Binational Interdisciplinary Research on Long-term Human Adaptation in the Sonoran Desert. pp. 213–264 *Journal of the Southwest Special Issue: Seeds in the Sand: Emerging Approach for Understanding the Sonoran Desert*, Volume 57, Numbers 2 and 3, Summer-Autum 2015.
- Copeland, A., Quade, J., Watson, J.T., Mclaurin, B.T., Villalpando, E., 2012. Stratigraphy and geochronology of La Playa archaeological site, Sonora, Mexico. *J. Archaeol. Sci.* 39, 2934–2944.
- Cruz-y-Cruz, T., Sedov, S., Sánchez, G., Pi-Puig, T., Pustovoytov, K., Barceinas-Cruz, H., Ortega-Guerrero, B., Solleiro-Rebolledo, E., 2014. Late Pleistocene-Holocene palaeosols in the north of Sonora, Mexico: chronostratigraphy, pedogenesis and implications for environmental history. *Eur. J. Soil Sci.* 65.
- Cruz-y-Cruz, T., Sánchez, G., Carpenter, J., Sedov, S., Barceinas-Cruz, H., Solleiro-Rebolledo, E., 2018. Late Holocene Human Activities and Their Impacts on the Soils and Sediments at La Playa, Sonora. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* (in press).
- deMenocal, P.B., 2001. Cultural responses to climate change during the Late Holocene. *Science* 292 (5517), 667–673.
- Diehl, M.W., 2009. Early Agricultural period food provisioning and foraging. *Archaeology Southwest* 23 (1), 12.
- Faegri, K., Iversen, J., 1989. *Textbook of Pollen Analysis*. John Wiley & Sons, Amsterdam.
- Gaines, E., 2006. *Paleoindian Geoarchaeology of the Upper San Pedro River Valley, Sonora, Mexico*. Thesis Master of Arts. University of Arizona, pp. 141.
- García, C., 2005. *Lascas, Raspadores, Choppers y Percutores con Pátina: La Industria Lítica del Componente Malpais del Sitio Arqueológico La Playa, Sonora*. Licenciatura tesis. Escuela Nacional de Antropología e Historia, México.
- Grimm, E.C., 2004. *Illinois State Museum, Research and Collections Center*. Tilia Graph, Springfield, IL.
- Hayden, J., 1967. A summary prehistory and history of the Sierra Pinacate, Sonora, México. In: *America Antiquity*, pp. 335–344 no. 32.
- Hayden, J., 1976. Pre-alithermal archaeology in the Sierra Pinacate, Sonora, México. In: *America Antiquity*, pp. 274–289 no. 41.
- Heiri, O., Lotter, A.F., Lemcke, G., 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *J. Paleolimnol.* 25, 101–110.
- Heusser, C.J., 1971. *Spore of Chile. Modern Types of the Pteridophyta, Gymnospermae and Angiospermae*. The University of Arizona Press, Tucson Arizona, pp. 167pp.
- Holmgren, C.A., Norris, J., Betancourt, J.L., 2006. Inferences about winter temperatures and summer rains from the late Quaternary record of C4 perennial grasses and C3 desert shrubs in the northern Chihuahuan Desert. *J. Quat. Sci.* 22, 141–161 ISSN 0267-8179.
- Holmgren, C.A., Norris, J., Betancourt, J.L., 2007. Inferences about winter temperatures and summer rains from the Late Quaternary record of C4 perennial grasses and C3 desert shrubs in the northern Chihuahua Desert. *J. Quat. Sci.* 22, 141–161.
- Huckell, B.B., 1995. Of marshes and maize: preceramic agricultural settlements in the Cienega Valley, southeastern Arizona. *Anthropological Papers of the University of Arizona Number 59*. The University of Arizona Press, Tucson, AZ.
- Ibarra, G., Solleiro-Rebolledo, E., Ayala, E., Cabadas, H., López-Martínez, R., 2018. Paleopedogenesis and sedimentation in La Playa archaeological site, Sonora: evidences of the paleoenvironmental conditions from landscape to micromorphology. *Spanish Journal of Soil Science* 8, 275–292.
- Mabry, J., 2008. *Las Capas: Early Irrigation and Sedentism in a Southwestern Floodplain*. Anthropological Papers 28. Center for Desert Archaeology, Tucson.
- Anthropological Papers No. 18 Mabry, Jonathan B., Deborah, L. Swartz, Helga, Wocherl, Jeffrey, J. Clark, Gavin, H. Archer, Michael, M.G. Lindeman (Eds.), 2002. *Archaeological Investigations of Early Village Sites in the Middle Santa Cruz Valley*. Center for Desert Archaeology, Tucson, Arizona.
- Maher, B.A., 1986. Characterization of soils by magnetic measurements. *Phys. Earth Planet. In.* 42.
- Mastrolonardo, G., Francioso, O., Di Foggia, M., Bonora, S., Rumpel, C., Certini, G., 2014. Application of thermal and spectroscopic techniques to assess fire-induced changes to soil organic matter in a Mediterranean forest. *J. Geochem. Explor.* 143, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.04.010>.
- Mastrolonardo, G., Hudspeth, V.A., Francioso, O., Rumpel, C., Montecchio, D., Doerr, S.H., Certini, G., 2017. Size fractionation as a tool for separating charcoal of different fuel source and recalcitrance in the wildfire ash layer. *Sci. Total Environ.* 595, 461–471.
- McLaughlan, K., 2003. Plant cultivation and forest clearance by prehistoric North Americans: pollen evidence from Fort Ancient, Ohio, USA. *Holocene* 13 (4), 557–566.
- Mead, J.I., White, R.S., Baez, A., Hollenshead, M.G., Swift, S.L., Carpenter, M.C., 2010. Late Pleistocene (Rancholabrean) *Cynomys* (Rodentia, Sciuridae: prairie dog) from northwestern Sonora, Mexico. *Quat. Int.* 217.
- Meister, J., Krause, J., Müller-Neuhof, B., Portillo, M., Reimann, T., Schütt, B., 2017. Desert agricultural systems at EBA Jawa (Jordan): integrating archaeological and paleoenvironmental records. *Quat. Int.* 434 (Part B), 33–50.
- Metcalfe, S.E., 2006. Late quaternary environments of the northern deserts and central transvolcanic belt of Mexico. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 93 (2), 258–273.
- Metcalfe, S.E., Barron, J.A., Davies, S.J., 2015. The Holocene history of the North American Monsoon: ‘known knows’ and ‘known unknowns’ in understanding its spatial and temporal complexity. *Quat. Sci. Rev.* 120, 1–27.
- Ortega-Rosas, C.I., Peñalba, M.C., Guiot, J., 2008. Holocene altitudinal shifts in vegetation belts and environmental changes in the Sierra Madre Occidental, Northwestern Mexico. *Rev. Palaeobot. Palynol.* 151, 1–20.
- Ortega-Rosas, C.I., Peñalba, M.C., Guiot, J., 2016. The Lateglacial interstadial at the southeastern limit of the Sonoran Desert, Mexico: vegetation and climate reconstruction based on pollen sequences from Ciénega san Marcial and comparison with the subrecent record. *Collegium Boreas* 45 (4), 773–789. <https://doi.org/10.1111/bor.12188>.
- Ortega-Rosas, C.I., Vidal-Solano, J.R., Williamson, D., Peñalba-Garmendia, C., Guiot, J., 2017. Geochemical and magnetic evidence of change from winter to summer rainfall regimes at 9.2 cal ka BP in northwestern Mexico. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 465, 64–78.
- Pérez, R.G., 1985. *Geografía de Sonora*. In: Hopkins, A. (Ed.), *Historia General de Sonora I. Periodo Prehistórico y Prehispánico*. Gobierno del Estado de Sonora, Hermosillo, Sonora.
- Perez-Cruz, L., 2006. Climate and ocean variability during the middle and late Holocene recorded in laminated sediments from Alfonso Basin, Gulf of California, Mexico. *Quat. Res.* 65, 401–410.
- Purdue, L., Miles, W., Woodson, K., Darling, A., Berger, J.F., 2010. Micromorphological study of irrigation canal sediments: landscape evolution and hydraulic management in the middle Gila River valley (Phoenix Basin, Arizona) during the Hohokam occupation. *Quat. Int.* 216 (1–2), 129–144.
- Rasmussen, J.B.T., Polyak, V.J., Asmerom, Y., 2006. Evidence for Pacific-modulated precipitation variability during the late Holocene from the southwestern USA. *Geophys. Res. Lett.* 33, 1–4.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, ChB., Buck, C.E., Cheng, H., Lawrence, R.E., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hafflidason, H., Hajdas, I., Hatté, Ch, Heaton, T., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, Ch, Van der Plicht, J., 2013. *IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration Curves 0–50,000 Years cal BP*. *Radiocarbon* 55 (4), 1869–1887.
- Sánchez, G., 2010. *Los Primeros Mexicanos: Late Pleistocene/Early Holocene Archaeology in Sonora* (Tesis de Doctorado no publicada del School of Anthropology de la University of Arizona).
- Sánchez, G., 2016. *Los Primeros Mexicanos: Late Pleistocene and Early Holocene People of Sonora*. The University of Arizona Press, Tucson, pp. 161.
- Sánchez, G., Carpenter, J., 2003. La ocupación del Pleistoceno Terminal/Holoceno

- Temprano en Sonora, México, en: *Noroeste de México*. CONACULTA-INAH, México, pp. 27–34.
- Sanchez, G., Carpenter, J., 2012. Paleoindian and archaic traditions in Sonora, Mexico. In: *From the Pleistocene to the Holocene: Human Organization and Cultural*. Texas A&M University Press, pp. 125–148.
- Sánchez, G., Holliday, V.T., Gaines, E.P., Arroyo-Cabrales, J., Martínez-Tagüeña, N., Kowler, A., Lange, T., Hodgins, G., Mentzer, S.M., Sánchez-Morales, I., 2014. Human (Clovis) egomphother (Cuvieronius sp.) association ~13,390 calibrated yBP in Sonora, Mexico. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.* 111 (30), 10972–10977.
- Schott, A., 2017. Site formation processes and depositional environment of a fine-grained alluvial floodplain at La Playa archaeology site, Sonora, Mexico. *Geoarchaeology* 32, 283–301.
- Siebe, C., Jahn, R., y Sthar, K., 2006. *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*, 2ª Ed. UNAM, México.
- Smith, B.J., Wright, J.S., Whalley, W.B., 2002. Sources of non-glacial, loess-size quartz silt and the origins of “desert loess”. *Earth Sci. Rev.* 59, 1–26.
- Solís-Portillo, J.M., Venegas, F.R., 2011. Geografía de los suelos regional: llanura sonorense. In: *Krasilnikov, P., Jiménez Nava, F.J., Reyna-Trujillo, T., García-Calderón, N.E. (Eds.), Geografía de los Suelos de México*. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 255–270.
- Staubwasser, M., Sirocko, F., Grootes, P.M., Segl, M., 2003. Climate change at the 4.2 ka BP termination of the Indus valley civilization and Holocene south Asian monsoon variability. *Geophys. Res. Lett.* 30 (8), 1425.
- Valencia-Moreno, M., diciembre 2007. Los batolitos de Sonora. *Investigación y Ciencia* 42–49.
- Van Devender, T.R., 1990. Late quaternary vegetation and climate of the Sonoran Desert, United States and Mexico, pp 134-165. In: Betancourt (Ed.), *Packrat Middens: the Last 40,000 Years of Biotic Change*. University of Arizona Press.
- Van Devender, T.R., Burgess, T.L., Felger, R.S., Turner, R.M., 1990. Holocene vegetation of the hornaday mountains of northwestern Sonora, México. *Proc. San Diego Soc. Nat. Hist.* 2, 1–19.
- Vidal-Zepeda, R., 2005. *Las regiones climáticas de México*. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Villalpando, E., Carpenter, J., 2004. Proyecto Arqueológico La Playa, VI Informe, Temporada 2003. Análisis de los materiales arqueológicos. Archivo Técnico del INAH.
- Willard, D., Bernhardt, C.L., Weimer, L., Cooper, S., Gamez, D., Jensen, J., 2004. Atlas of pollen and spores of the Florida everglades. *Palynology* 28, 175–227.
- World References Base for Soil Resources (WRB), 2006. *World Soil Resource Reports No. 103*. FAO, Rome 2007. IUSS Working Group WRB.
- Yong-Zhang, Cheng-Sen, L., 2017. Distributional patterns of anemophilous tree pollen indicating the pathways of Indian monsoon through Qinghai–Tibetan Plateau. *Biopalaogeography and Palaeoecology* 6 (4), 352–358.