

## CONTRIBUCION AL ESTUDIO DEL CUATERNARIO RECIENTE DE LA PLAYA SAN BARTOLO, SONORA

*Jean Lecolle,<sup>1</sup> Monique Lancin,<sup>2</sup>  
y Alberto Castro del Rio<sup>3</sup>*

### RESUMEN

La Playa San Bartolo está a 20 km al norte de Bahía Kino, Sonora y representa un buen ejemplo de playa desértica o sebkha. Contiene cordones eólicos moldeados por el viento del noroeste dominante, estando su fondo cubierto por placas de desecación limo-arcillosas y flanqueado en su lado oeste por la bajada adyacente a la Sierra Seri.

La playa San Bartolo tuvo un origen tectónico. El estudio sedimentológico y geomorfológico permite inclinarse a favor de la hipótesis de un episodio lacustre y fluvial seguido de un episodio seco, durante el Cuaternario reciente.

### ABSTRACT

The Playa San Bartolo is 20 km to the north of Bahia Kino, Sonora and represents a good example of a playa or sebkha with its dunes sculptured by the dominant northwest winds, with its flat floor covered by mudcracked surface and bordered by the Sierra Seri and its piedmont.

The Playa San Bartolo is considered to be of tectonic origin. The sedimentological and geomorphological studies allow to propose a hypothesis whereby a lacustrine and fluvial period was followed by a dry period, during the recent Quaternary.

### INTRODUCCION

El estudio de la geodinámica cuaternaria del Golfo de California hecho por un equipo multidisciplinario del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, ha abordado el tema de paleolagos y lagunas marinas fósiles en relación con las oscilaciones del nivel del mar y la neotectónica del Cuaternario (Malpica y Ortlieb 1976). El presente artículo se refiere al estudio de la geomorfología y la sedimentología de una cuenca sedimentaria típica de zonas áridas, situada en las cercanías de Bahía Kino, Sonora (Lecolle y Villaseñor, 1976; Petit-Maire y Lancin, 1976).

El término de esta clase de rasgos geomorfológicos recibe diferentes nombres particulares según algunos países (*playa, sebkha, dry lake*; Chico, 1968; Neal, 1975). Se emplean otros nombres también según las características predominantes (*mamlahah, inland sebkha* o *sabkha*) o en función de su contenido de sal (*salar, salina*; Glennie, 1970). En Norteamérica y particularmente en México, existen algunos términos (Soto-Mora, 1965) como barrial, bolsón o playa, aunque puede verse que se refieren a rasgos específicos.

En el caso de la Playa San Bartolo, se adoptó el término playa en vista de que es utilizado en la literatura sobre estos rasgos geomorfológicos en Norteamérica y a que en los mapas de la región consultados, la localidad en cuestión aparece con el nombre de Playa San Bartolo.

El área de estudio se localiza al pie oriental de la Sierra Seri (Figura 1), que sufrió deformaciones debido, en gran parte, al sistema de fallas que

afecta al Golfo de California (Gastil y Krummenacher, 1974; Bischoff y Henyey, 1974). En ambos lados de la Sierra Seri, la cual es paralela al Canal del Infiernillo, se han formado lagunas marinas fósiles (lado costero), y playas (lado continental). La Playa San Bartolo (Figura 2), es actualmente la más grande de estos rasgos paleogeomorfológicos. Presenta una forma ovalada con su eje mayor alineado de NNW-SSE, tiene 12.5 km de largo y su eje menor 3.5 km de ancho. Está a 30 km al norte de Bahía Kino, entre 28°59' y 29°06' de latitud norte y 111°55' y 111°59' de longitud oeste (Figura 1). Su fondo es plano y está constituido por sedimentos muy finos que presentan grietas de desecación; está rodeada por cordones arenosos cuya altura relativa es mayor en el oriente. Al norte de la playa desemboca el Río Bacoachi, y al oeste numerosos arroyos descienden de la Sierra Seri.

El objetivo del estudio es reconstruir la historia del Cuaternario reciente de la Playa, a partir de su geomorfología actual y de su evolución sedimentológica.

### MARCO FISIOGRAFICO REGIONAL

Al norte de Bahía Kino se extiende una región accidentada con cerros bastante labrados por la erosión linear. Estos cerros están alineados de NNW-SSE y alcanzan una altitud de unos 1,000 m.s.n.m. El conjunto más importante de éstos, es la Sierra Seri que se extiende más o menos 90 km a lo largo de la costa del Carral de Infiernillo. Entre los cerros se alargan depresiones con la misma orientación. La Playa San Bartolo se encuentra en la par-

1 — Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México 20, D. F. y ORSTOM, 24 Rue Bayard 75008, Paris.

2 — Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México y Laboratoire de Géomorphologie de l'EPHE, Paris.

3 — Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México 20, D. F.

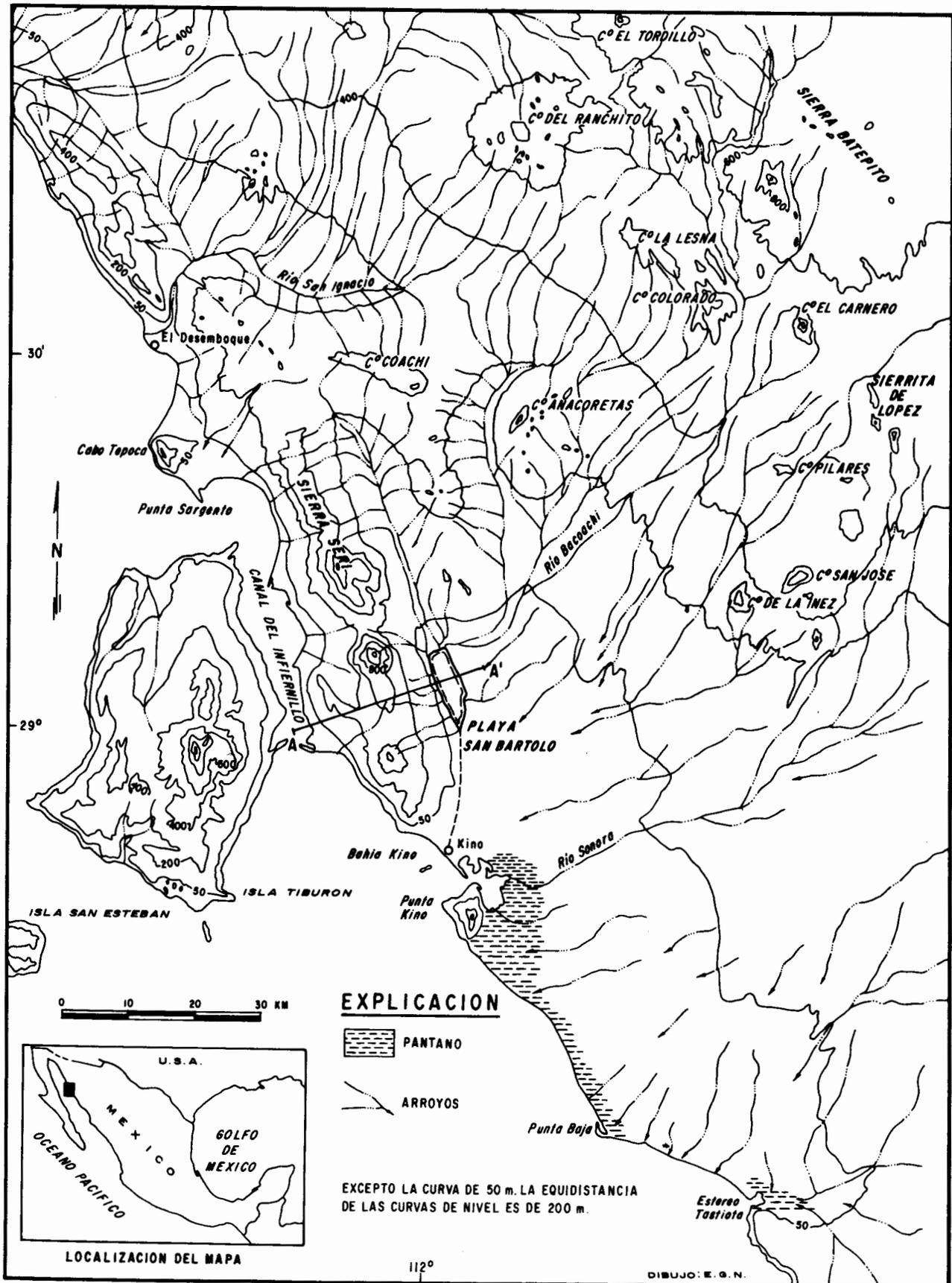


Figura 1.—Mapa topográfico regional, que muestra la localización de la Playa San Bartolo.

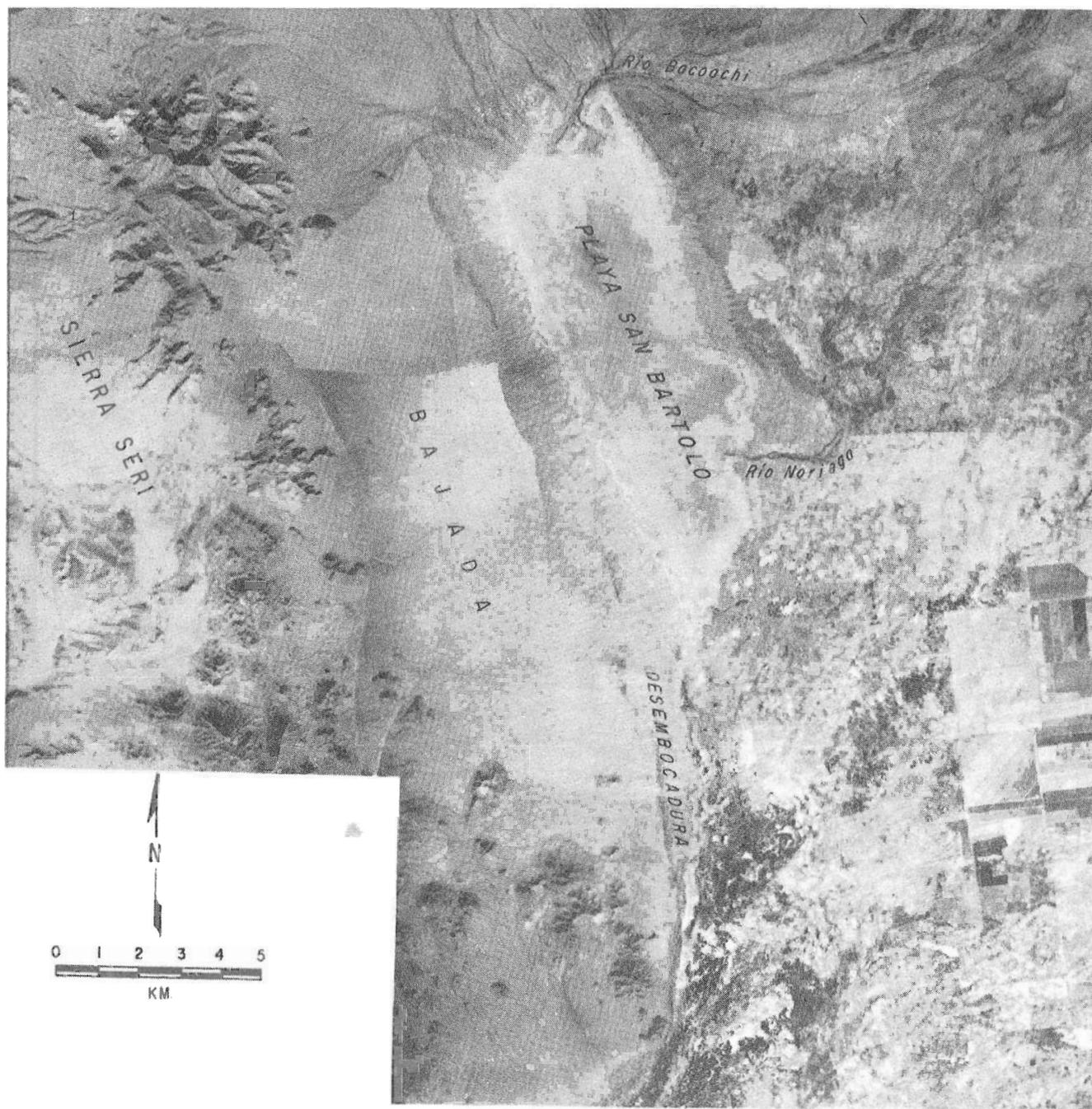


Figura 2.—Mosaico aéreo de la Playa San Bartolo. Levantamiento aéreo hecho por CETENAL en 1973. Mosaico formado por J. Lecolle.

te meridional de la depresión que se extiende al pie oriental de la Sierra Seri (Figura 1).

Al norte de Bahía Kino la alineación de cerros y depresiones se relaciona con las estructuras terciarias, que resultaron del fallamiento en bloques siguiendo un rumbo general de NNW-SSE. Esta deformación controló el desarrollo morfológico de las "cuencas y sierras" (*basin and range*) de la parte occidental de Sonora y del sur de Arizona (Dunbier, 1968).

#### MARCO GEOLOGICO

La Sierra Seri está formada principalmente por un complejo batolítico del Cretácico (Figura 3) el cual, a su vez, está cubierto por rocas volcánicas

miocénicas y pliocénicas (Gastil y Krummenacher, 1974). En algunos sitios también aflora el basamento paleozoico (?) y mesozoico, tanto sedimentario como metamórfico (López-Ramos, 1974). Sedimentos clásticos recientes recubren las superficies de abrasión desarrolladas alrededor de la Sierra (bajadas), o bien rellenan los fondos de los valles donde se alojan las playas. Las rocas que forman la Sierra están bastante intemperizadas. A menudo presentan fenómenos de disgregación granular superficial, mientras que en las rocas volcánicas ácidas se observan numerosos *taffoni*\*. El intemperismo de las ro-

\* *taffoni*: cavidades o pequeñas cuevas de techo semi-esférico, que se forman en rocas granulares o en tobas bajo climas áridos o semi-áridos (Soto-Mora, 1965; Tricart, 1969).

cas está relacionado con las condiciones climáticas áridas del desierto litoral sonorense.

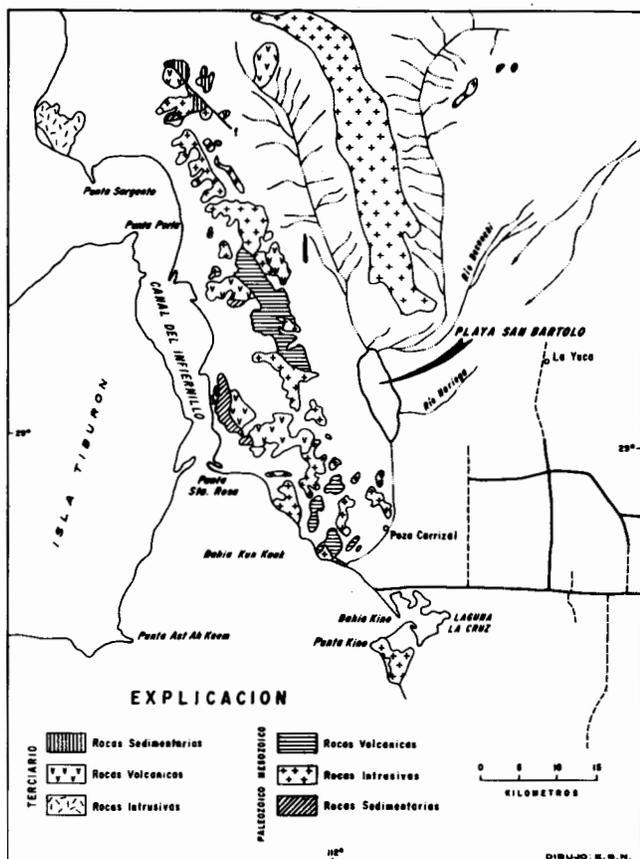


Figura 3—Mapa geológico simplificado de la región de Bahía Kino (López-Ramos, 1974).

#### CLIMA

El promedio del total anual de precipitación es de 130 mm (CETENAL, 1975); sin embargo, la cantidad de lluvia puede variar mucho de un año a otro. El régimen de las precipitaciones es de tipo mixto, con un máximo en la estación caliente (como en las regiones tropicales de la República) y un segundo período de lluvias que representa cerca del 25% del total anual durante el invierno, en relación con las lluvias de tipo mediterráneo del noroeste de Baja California (McCleary, 1968). El mes con el más alto promedio de precipitación es agosto; sin embargo, su distribución anual varía grandemente de un año a otro. El número promedio de días con lluvia apreciable oscila entre 20 y 30 al año. Julio, uno de los meses más "húmedos", tiene un promedio de 3 a 5 días con lluvias (Jáuregui-Ostos, 1970), es decir, que no hay una verdadera estación de lluvias. En el litoral de Sonora, las lluvias invernales son generalmente muy finas, mientras que las del verano son más bien del tipo chubasco y pueden proporcionar rápidamente un porcentaje notable del total anual de precipitación (Jáuregui-Ostos, 1970). Son estas lluvias violentas las que provocan la inundación de las playas.

Las temperaturas en la región de la Playa San Bartolo se caracterizan por su alto promedio (superior a 22°C) y su fuerte variación anual. La temperatura media del mes más caliente (julio) es de

31°C, mientras que la del mes más frío (enero) es de 16°C. Dada la amplitud térmica anual de 15°C, se trata entonces de un clima bastante extremo.

Los vientos dominantes en la región son del norte-noroeste (Dunbier, 1968). Sin embargo, los vientos del sur-suroeste son un rasgo importante del clima local, a pesar de su menor frecuencia ya que aportan aire húmedo del litoral. Las diferencias de temperatura entre la superficie del suelo y la atmósfera, originan corrientes de convección verticales que dan por resultado remolinos y tornados frecuentes, sobre todo en las horas más calientes del día. Estos movimientos verticales del aire provocan fenómenos de deflación en los limos y arenas muy finas, especialmente en las superficies desnudas de las playas.

La evaporación está favorecida en la región por la ausencia de nubes, ya que el número de días nublados es inferior a 40 por año (Jáuregui-Ostos, 1970). Este fenómeno es provocado por las altas temperaturas diurnas al nivel del suelo y por la turbulencia del aire, ya que casi no hay días sin viento. El fuerte potencial de evaporación, junto con el bajo total anual de precipitación, crea un déficit en el balance hídrico. Por lo tanto, es muy difícil establecer el balance hídrico real, ya que hay que tomar en cuenta, además de las lluvias, las "precipitaciones ocultas" (rocío, condensación de neblinas), que pueden proporcionar una cantidad de agua que resulta vital para la vegetación. Las variaciones diurnas de humedad, junto con las de temperatura, son responsables del intemperismo observado en las rocas cristalinas y volcánicas de la región que proporcionan un material clástico abundante y heterogéneo.

#### HIDROGRAFIA

El drenaje, con excepción del Río Sonora (actualmente represado) que baja de la Sierra Madre Occidental, nace en los cerros cercanos (Figura 1). Por consiguiente, el relleno detrítico de las depresiones tiene un origen estrechamente local. El más largo de éstos es el Río Bacoachi, que nace en la Sierra Tabaquito a unos 75 km al noroeste de la Playa San Bartolo. A pesar de la cercanía del mar, el drenaje es, casi en su totalidad, endorreico, exceptuando a los ríos San Ignacio y Sonora que desembocan, respectivamente, al norte de la Sierra Seri y en la Laguna La Cruz al sur de Bahía Kino. Este endorreísmo, pudo haber sido favorecido por la disposición de la sierra misma que forma una barrera a lo largo de la costa. Sin embargo, la causa principal está ligada al clima árido que no proporciona a los arroyos caudal suficiente para llegar al mar. Los arroyos son más bien del tipo *uadi*\* ya que tienen muy breves períodos de escurrimiento después de los escasos aguaceros. Las aguas de estos arroyos se pierden en la planicie litoral al sur del poblado de Kino o se concentran en depresiones cerradas, las playas, donde se evaporan rápidamente, dejando una superficie desnuda y llana con grietas de desecación poligonales.

Estas playas son numerosas al norte de la Laguna La Cruz, y mucho más pequeñas que la San

\* *uadi*: cauces de regiones áridas con escurrimiento efímero, sin periodicidad definida (Tricart, 1969).

Bartolo. Pueden ser identificadas en las fotografías aéreas como manchas circulares u ovaladas de color blanco, debido a la aridez y falta de vegetación, con dimensiones máximas entre 100 y 500 m. Por lo tanto, la Playa San Bartolo aparece anormalmente amplia con respecto a las demás playas de la región (Figura 2).

#### ASPECTOS GEOMORFOLOGICOS DE LA PLAYA SAN BARTOLO

La Playa San Bartolo está enmarcada en el oeste por la bajada de la Sierra Seri, en el norte y este por cordones de arena, y al sur se comunica con una planicie aluvial que se extiende hasta el mar (Bahía Kino) a unos 20 km (Figuras 2, 4, 5 y 6). El fondo es una superficie perfectamente horizontal (Figura 7) donde los levantamientos topográficos revelaron desniveles inferiores a 5 cm sobre más de 3.0 km de anchura (Figura 8, Sección A-A'). Esto indica que los sedimentos del fondo se depositaron por decantación bajo una capa de agua calmada.

El fondo de la playa, al igual que el de las más pequeñas en las cercanías, presenta grietas de

deseccación formando polígonos muy bien definidos (Figura 9). En las orillas de la playa se localizan costras de sal superficiales, que son testigos de etapas de evaporación (Figura 10).

Cerca de las orillas, se encuentran esparcidas arenas muy gruesas y gravas. En el poniente forman una franja continua de fragmentos angulosos y pobremente clasificados. En el oriente, las gravas están concentradas a lo largo de una franja, en manchones distribuidos regularmente (Figura 11). Aquí el material es más grueso que en el otro lado alcanzando tamaños correspondientes a guijarros (tamaño mediano 18.3 mm). La heterometría y la angulosidad son típicas de material resultante de esparcimiento aluvial en zonas áridas, ya que el transporte por agua es demasiado breve para poder re TRABAJAR y clasificar el material. Lo anterior sugiere que la Playa San Bartolo presenta huellas de inundaciones esporádicas, características de las regiones áridas.

La información verbal recabada de los escasos pobladores de la región indica que hubo solo dos inundaciones notables desde el principio del siglo, hace más o menos 50 años, y que el agua en la pla-



Figura 4.—Vista panorámica mostrando en el primer plano, el cordón de dunas oriental, con sus formaciones fósiles compactadas, cubiertas por médanos activos, en el segundo plano la superficie de la playa y al fondo la Sierra Seri.



Figura 5.—Vista panorámica en dos partes. Se distingue la Sierra Seri, el cordón dólico occidental y la playa. Atrás del vehículo, el cordón de médanos oriental.

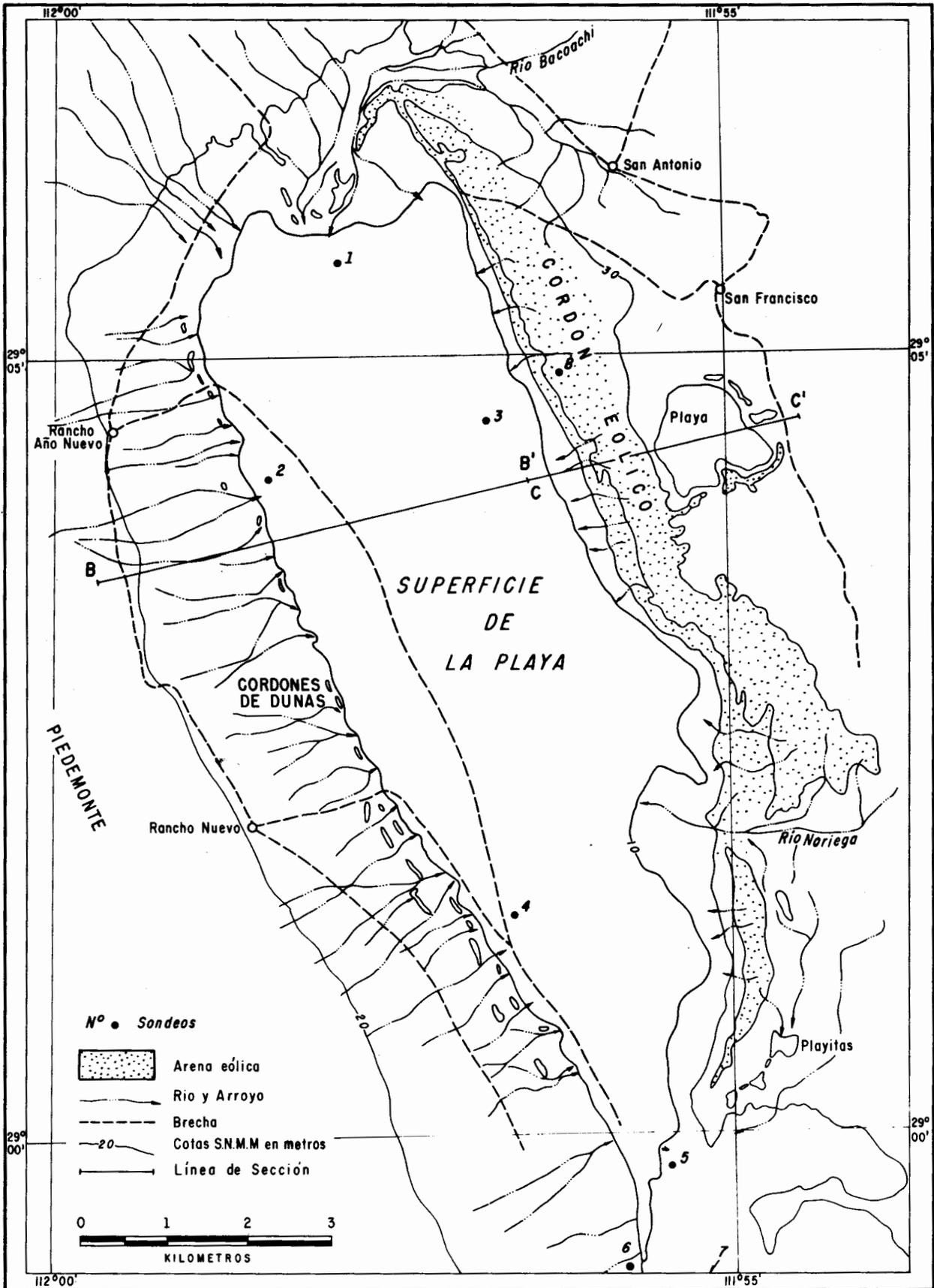


Figura 6.—Mapa geomorfológico de la Playa San Bartolo.

ya tuvo aproximadamente 1 m de profundidad. Los testimonios no permiten precisar si se trata de una inundación excepcional o un período más húmedo que el actual.



Figura 7.—Fondo de la playa con el *auger* (sonda). En el plano superior los médanos orientales.

El proceso actual más frecuente debe limitarse a un humedecimiento superficial después de cada lluvia seguido por una desecación rápida, sin que se pueda formar una capa de agua, en la totalidad de la playa.

*Margen occidental.*—El margen occidental de la playa tiene un contorno general muy rectilíneo, de orientación NNW-SSE (Figura 6). Este margen

está drenado por numerosos arroyos que bajan de la Sierra Seri y que cortan a los cordones arenosos que bordean este lado de la playa. Se pueden individualizar varios cordones (Figura 8, Sección B-B') más o menos paralelos, con una altura sobre el fondo no mayor de 4.0 m, que están separados entre sí por canales, que se humedecen ocasionalmente y producen grietas de desecación y/o costras salinas, todos sobre sedimentos finos. El cordón interior, está parcialmente endurecido en su base. El siguiente hasta la sierra, es más alto, más ancho y está más compactado, lo que hace suponer que es más antiguo que el primero. Los últimos cordones, mucho más labrados por la erosión y colonizados por vegetación, sugieren ser aún más antiguos. Estos cordones pueden interpretarse como médanos marginales de la playa.

Atrás de los cordones se desarrolló una ancha bajada, que forma la falda oriental de la Sierra Seri. Se trata de una acumulación detrítica de piedemonte en regiones áridas, caracterizada por un perfil cóncavo debido a la disminución regular de la pendiente hacia la playa (Fairbridge, 1968). A lo largo de su perfil, la pendiente es de 7° en la base de la sierra, luego 2°30' a lo largo de los 4.5 km de la parte superior de la bajada y al final, después de una leve ruptura de pendiente subrayada por una franja de mayor densidad de vegetación, se extiende una zona con pendiente de 1° (Figura 8, Secciones A-A' y B-B').

El tamaño del material, que subyace a la bajada, disminuye proporcionalmente hacia abajo. Junto al pie de los cerros en los cortes de los arroyos (hasta

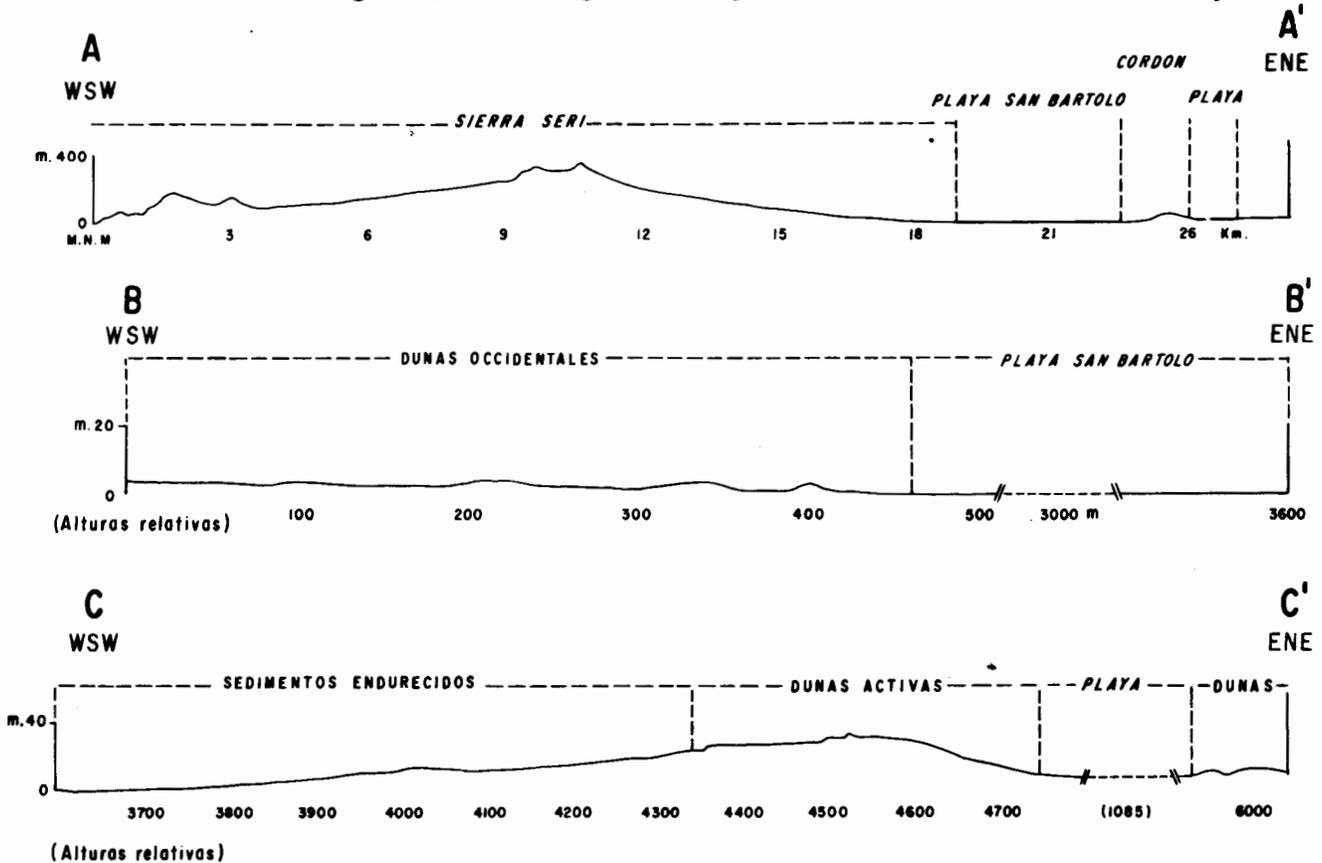


Figura 8.—Secciones estructurales (A-A', B-B', C-C') a través de la Sierra Seri y de la Playa San Bartolo. Para su localización ver Figuras 1 y 6. Escala vertical exagerada.

2 m), se observan acumulaciones de bloques angulosos con cantos y pocas gravas en superficie; pendiente abajo, los sedimentos pasan a cantos y gravas hasta llegar a arenas más y más finas al acercarse a la playa.

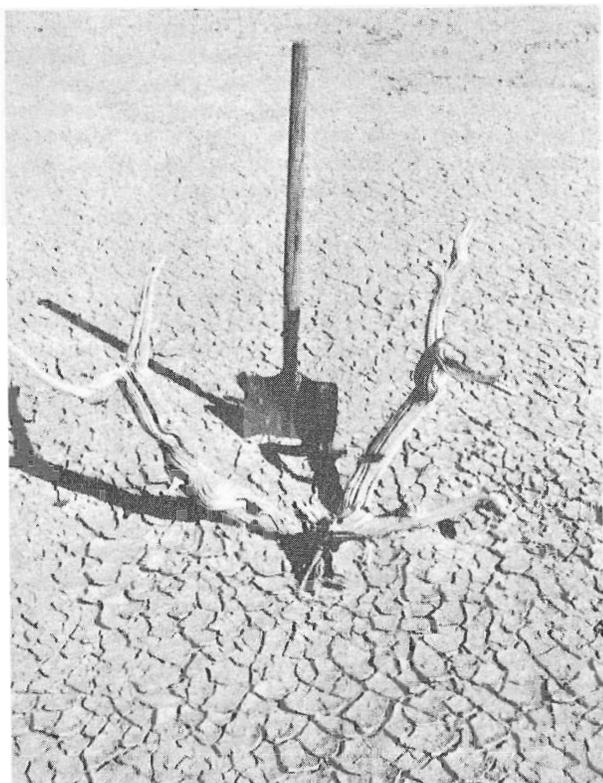


Figura 9.—Placas de desecación en la Playa San Bartolo. Arbol muerto plantado en la arcilla, transportado por el Río Bacoachi.

En la bajada, se ven numerosos canales de escurrimiento temporal que siguen las líneas de mayor pendiente, sin formar redes jerarquizadas. Unos pocos tienen cauces definidos, generalmente poco hondos (máximo 50 cm). Sin embargo, la mayoría son huellas muy superficiales, anastomosadas, cuyo trazo debe de cambiar de una lluvia a otra. Estos escurrimientos son responsables del esparcimiento del material detrítico que forma la bajada.

La bajada está cubierta por una vegetación relativamente densa de cactáceas, mezquites, ocotillos y de varias especies de xerófitas. La relativa abundancia de los mezquites, plantas freatófitas, señala la presencia de aguas dulces. Dichas aguas son utilizadas por los ranchos cercanos, encontrándose en los pozos a unos 30 m de profundidad.

**Cordón oriental.**—A lo largo del margen oriental de la playa, se extiende un potente cordón eólico consolidado, cuyo ancho varía entre 0.5 y 1.5 km y que alcanza una altura entre 20 y 40 m (Figura 6). Presenta un perfil asimétrico (Figura 8, Sección C-C'), ya que su vertiente oriental es más estrecha y su base se encuentra a 10 m arriba del nivel del fondo de la playa. Mientras que al este hay acumulaciones recientes de arena eólica, al oeste se han formado vertientes de arena compactada color ocre, y accidentadas por montículos con flancos muy abruptos, cuya altura relativa aumenta desde un

metro en la base del cordón hasta 3 o 4 m pendiente arriba (Figura 12). Encima de los sedimentos endurecidos, se depositaron arenas eólicas blancas atrapadas por la vegetación y alojadas en las zonas protegidas del viento dominante.

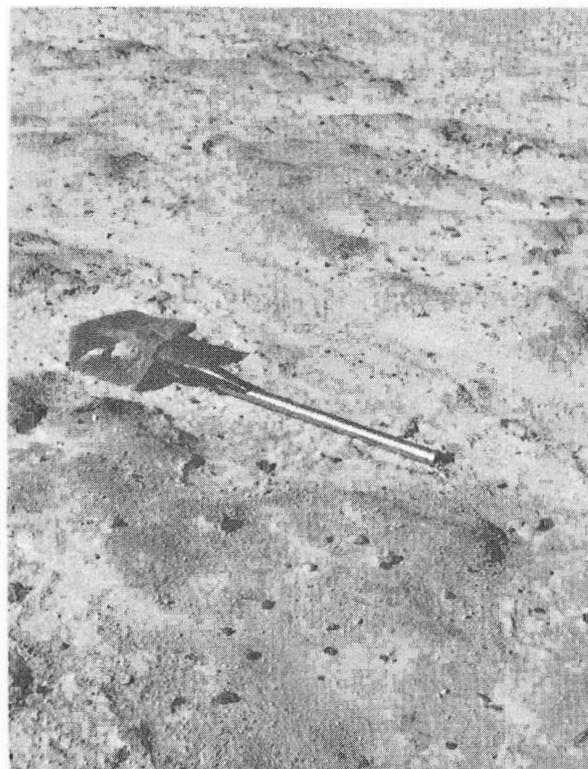


Figura 10.—Costras de sal en la base del cordón de médanos occidental, en la Playa San Bartolo.

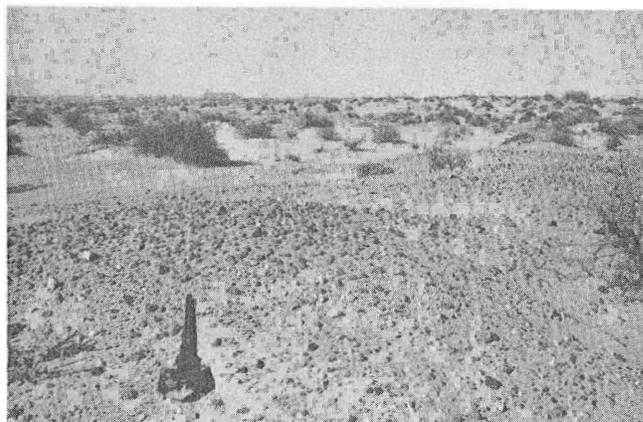


Figura 11.—Gravas formadas de rocas de las sierras circundantes en la base del cordón de médanos oriental.

La vertiente occidental del cordón presenta múltiples huellas de erosión por escurrimiento que surcaron zanjas de tipo *bad-lands*\*, particularmente acentuadas en la mitad norte del cordón (Figura 13). Estos rasgos no son actuales, ya que se encuentran invadidos por la arena eólica antes mencionada. Cabe hacer notar que los *bad-lands* no son testimonios de un período más húmedo que el actual, pues

\* *bad-lands*: barrancas ramificadas, estrechas y bastante profundas (de unos metros a algunas decenas de metros), separadas por crestas afiladas (Derruau, 1966; Soto-Mora, 1965).

to que se forman solo cuando hay una cubierta vegetal escasa, que no protege a los suelos y no obstaculiza la concentración de las aguas; es decir, bajo condiciones climáticas áridas. Los estudios norteamericanos relativos a la fase de erosión lineal acelerada de los últimos decenios del siglo pasado en Arizona y Nuevo México, mostraron que basta una leve modificación de la distribución anual de las lluvias a favor de los aguaceros de verano, sin cambio notable del total anual de las precipitaciones, para permitir el desarrollo de la erosión lineal y la formación de *bad-lands* (Leopold, 1951; Antevs, 1952; Leopold *et al.*, 1963, Martin, 1963; Cooke y Reeves, 1976). Tal vez los *bad-lands* de San Bartolo fueron generados por un fenómeno análogo.

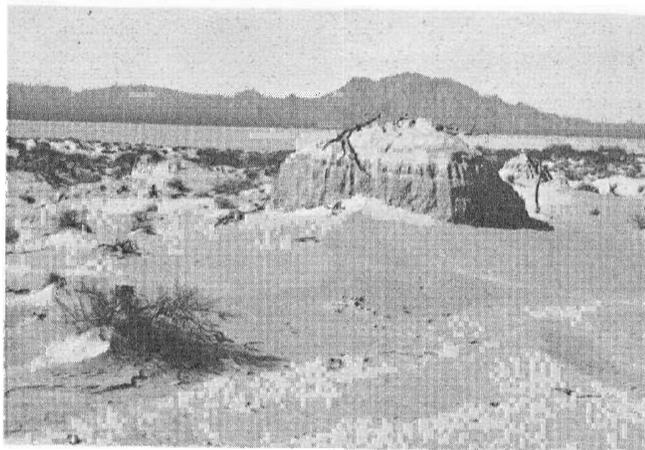


Figura 12.—Formaciones fósiles sobre el cordón oriental constituidas de arena color ocre. En el primer plano costra dura formando *glacis*; en el segundo plano un montículo; en el fondo, la playa y la Sierra Seri.

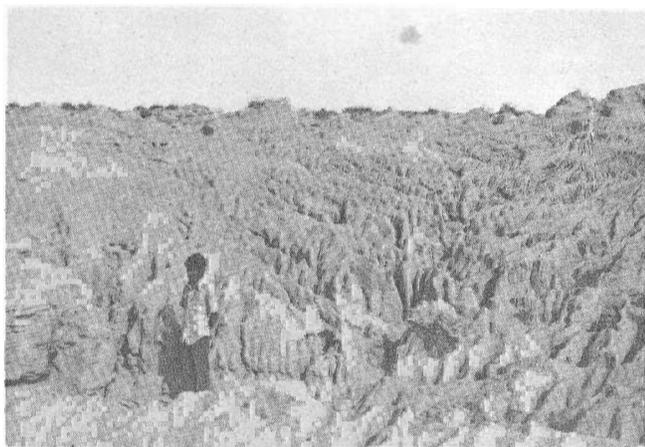


Figura 13.—Formaciones de *bad-lands* del cordón oriental en arena endurecida.

Los sedimentos endurecidos están formados exclusivamente por material fino (arenas finas). No se encontraron lentes de material más grueso, lo que permite excluir una acumulación fluvial. Posee estratificación horizontal y a veces entrecruzada con capas de unos milímetros a unos centímetros de grueso. Estratificaciones similares se notan en los médanos recientes, encima del cordón.

La asimetría entre el cordón de la orilla occidental y el cordón oriental, por un lado, y entre las vertientes occidental y oriental de este último, por el

otro, indican un régimen de vientos dominantes del oeste. Estos vientos influyeron en la acumulación de arena en el cordón oriental, a partir de los sedimentos arrastrados por la deflación en el fondo desnudo de la playa.

En cuanto a la formación del cordón puede decirse que hubo al menos tres fases. La más antigua corresponde a los sedimentos que sufrieron un endurecimiento, la segunda abarcó uno o varios (?) períodos de erosión lineal (formación de los *bad-lands*), y la tercera, que es la fase actual, se caracteriza por acumulación eólica controlada por los vientos dominantes del nornoroeste, que cubre en capas muy delgadas (5 cm) a los sedimentos compactados. Las acumulaciones actuales más gruesas se localizan hacia sotavento en la vertiente oriental del cordón, donde cubren completamente a las más antiguas. La altura relativa del cordón así como su anchura disminuyen de norte a sur, lo que permite inferir que se formó bajo un régimen de vientos similar al actual (predominancia de vientos desde el noroeste).

#### SEDIMENTOS DE LA PLAYA SAN BARTOLO

*Granulometría.*—Los sedimentos del subsuelo de la playa, del cordón oriental y de la superficie fueron colectados mediante un equipo de perforación manual (*auger*) y analizados a partir de gráficas acumulativas, que fueron el resultado del estudio de 130 muestras por los métodos de tamizado, tubo de sedimentación y pipeteo al vacío (Emery, 1938, Krumbein, 1932). Los diferentes sedimentos se agruparon según sus parámetros estadísticos  $M\phi$  (media aritmética),  $\sigma\phi$  (coeficiente de clasificación) y  $SK\phi$  (coeficiente de asimetría) en siete grupos texturales (Inman y Chamberlain 1955; Wentworth, 1922, Folk, 1966).

En cuanto al porcentaje de arena, limo y arcilla (Shepard, 1954) se reconocieron cinco familias principales: A. arena, Al. arena limosa, IA. limo arenoso, la. limo arcilloso y al. arcilla limosa. En segundo término, ya que en algunos casos se trata de una sola muestra: lAa. limo areno arcilloso, laA. limo arcillo arenoso, aAl. arcilla areno limosa, l. limo y a. arcilla.

Los parámetros estadísticos, cuya correlación está indicada en la Figura 14, señalan que los sedimentos abarcan la gama completa de arena-limo-arcilla según la media ( $M\phi$ ) y que, según su grado de clasificación ( $\sigma\phi$ ), se tiene arena moderadamente bien clasificada en el grupo II, arena moderadamente clasificada en los grupos I y Ia y arena pobremente a mal clasificada en el grupo III; los grupos IV y V correspondiente a limos y el grupo VI correspondiente a las arcillas se presentaron mal clasificados. Por último, el coeficiente de asimetría ( $SK\phi$ ) mostró que en los grupos III y IV predomina la fracción fina, mientras que en los demás se nota una tendencia a ser simétricas.

La interpretación de los grupos obtenidos es la siguiente: grupo la. arena media, I y II arena fina, moderadamente y moderadamente bien clasificada, indican un origen eólico, en vista de su buena clasificación y su tendencia a ser simétrica ( $SK\phi$  cercano a cero). Su localización fue en el cordón oriental y en la base de las dunas occidentales.

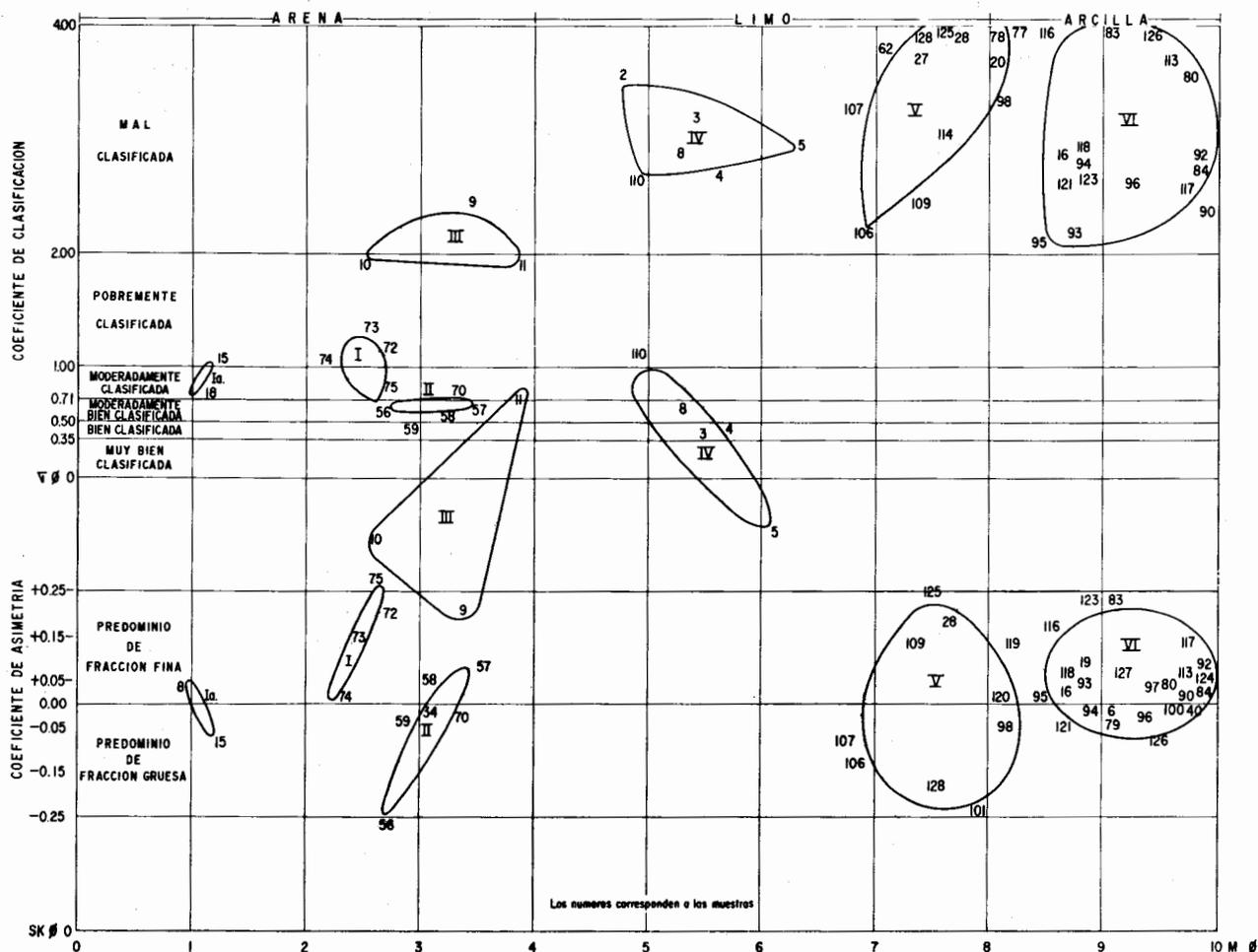


Figura 14.—Correlación de parámetros estadísticos  $M\phi$  y  $SK\phi$  (Inman y Chamberlain, 1955).

El grupo III, arena fina a muy fina, pobremente a mal clasificada, con predominio de fracción fina, se localiza tanto en la desembocadura del Río Bacoachi como en la salida sur de la playa a 3 m de profundidad. La similitud entre estas dos arenas les atribuye un origen fluvial.

El grupo IV, representado por limo medio mal clasificado y predominio de fracción fina, acusa una energía de depósito baja de tipo lacustre. Su localización es tanto en la cima de la unidad que forma el subsuelo como en una secuencia que la subyace. Los grupos III y IV son similares con la diferencia de ser más "fino" el segundo.

Los grupos V y VI son limos y arcillas con una tendencia del coeficiente de asimetría a ser simétrico; esto implica la presencia de una sedimentación "regular" correspondiente a una formación lacustre. Estos grupos constituyen la mayor parte del subsuelo de la playa. A partir de la comparación del grupo textural y del porcentaje de arena limo y arcilla (Figura 15), se determinaron 5 episodios de sedimentación.

Las secuencias sedimentarias así determinadas son correlacionables a lo largo de toda la playa (Figura 16). La parte superior de la figura representa la margen oriental, la parte inferior la margen occidental, ambas orientadas de norte a sur. Tal como se puede ver, el subsuelo varía hacia los cua-

tro puntos cardinales.

En la salida de la playa al sur hay una aparente discordancia entre un conjunto muy diverso de arena, arena limosa, etc. y el cuerpo arcilloso o arcillo limoso que ocupa la mayoría del subsuelo. La heterogeneidad de las capas de la unidad inferior, así como el tipo de estratificación hacen probable que sea un aluvión.

El cuerpo arcillo-arcillo limoso presenta 3 facies: (1) la base en la margen occidental constituida por 70% de arcilla; (2) lentes de 100% de arcilla en el centro de la playa, y de limo arenoso al norte y limo arcilloso al sur, y (3) arcilla limosa, que en la margen oriental incluye en forma de capa la facies de 70% de arcilla. Este cuerpo aparece interdigitado en el norte con las arenas que provienen del Río Bacoachi.

Las arenas del Río Bacoachi presentan en el occidente un cambio horizontal en cuanto a su coeficiente de clasificación, señalando un cambio de su corriente o una probable influencia eólica, ya que es notoria la ausencia de partículas finas (limo y arcilla).

La superficie de la playa presenta en general tres tipos de sedimentos. Al norte una cubierta de escaso medio metro, formada por limo; al centro arcilla limosa, es decir que aflora la cima del cuerpo

arcillo limoso del subsuelo; y al sur una mezcla de arena, limo y arcilla. Estos cambios locales son el resultado de los actuales procesos que actúan en la playa como son: el aporte de los arroyos, el flujo laminar, y la actividad eólica.

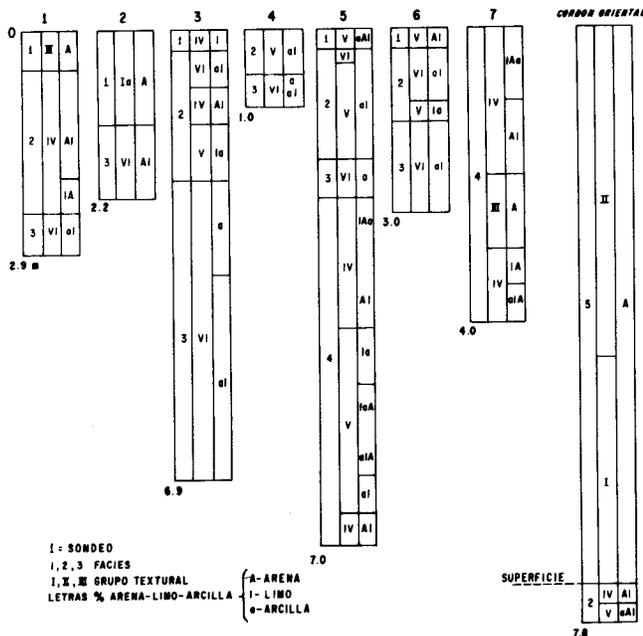


Figura 15.—Correlación del grupo textural y el porcentaje de arena — limo — arcilla, en cada perforación.

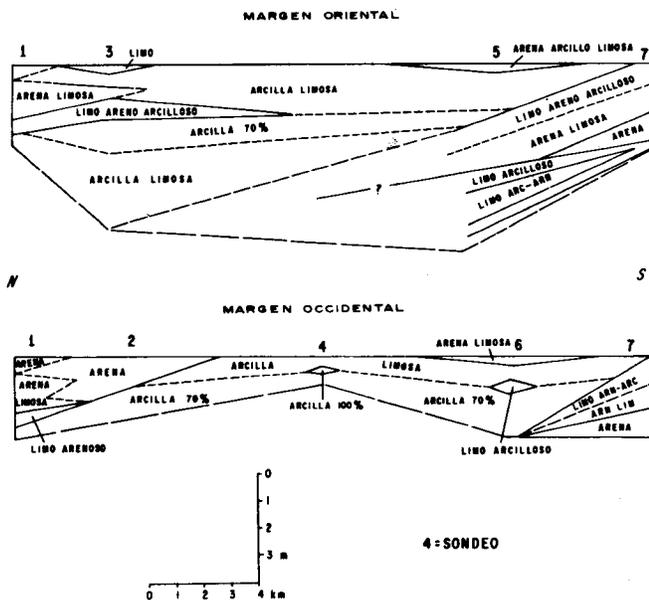


Figura 16.—Correlación de las facies sedimentarias del subsuelo en las márgenes de la Playa San Bartolo.

En cuanto a los sedimentos del cordón oriental, se vio en la perforación (Figura 15) que estos descansan sobre el cuerpo arcillo limoso y que, según el cambio en tamaño y en clasificación de las arenas, los factores que lo originaron se optimizaron con el tiempo, hasta antes de endurecerse.

En el diagrama-isométrico de la playa (Figura 17) se concluye que el principal fenómeno de

acumulación fue una depositación tranquila de sedimentos muy finos, de tipo lacustre, bajo la influencia del escurrimiento que proviene de la Sierra Seri, ya que al oeste se tienen dos capas con lentes incluidos mientras que al otro extremo se definen claramente tres capas; es decir, que fueron más desarrolladas hacia el este donde el transporte de finos alcanzó mayores distancias.

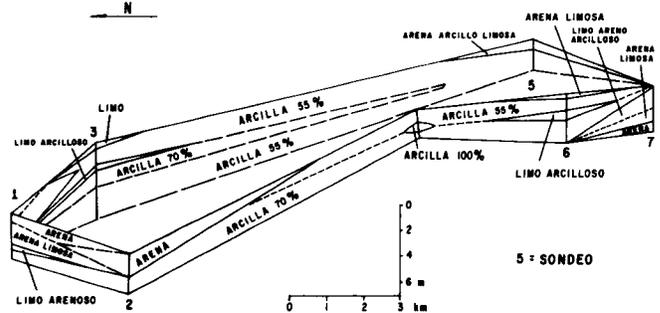


Figura 17.—Diagrama isométrico que muestra la interrelación de las facies sedimentarias del subsuelo de la Playa San Bartolo.

En cuanto al origen de la playa que sirvió de base al cuerpo arcillo limoso, pudo haberse hecho, al principio, por el hundimiento progresivo, seguido simultáneamente por una captura del agua fluvial, creando así muy rápidamente el cauce de un sistema fluvial. La gran superficie de la cuenca provocó un aflojamiento de la corriente y por consecuencia una decantación de arcilla limosa, que se engrosó a medida que ocurría el hundimiento. La corriente incrementó su fuerza en la desembocadura de la playa, en el estrecho aval hasta el mar, estando entonces el agua que salía, menos cargada de sedimentos en suspensión. Al contrario del cuerpo arcilloso que se depositó durante un periodo húmedo, el cordón eólico comenzó a instalarse durante el periodo de transición (húmedo a seco), para continuar su crecimiento hasta el periodo actual.

**Fracción fina.**—Los sedimentos finos, después de la separación de la fracción inferior a  $2\mu$ , se analizaron por difracción de rayos X. El análisis se efectuó en un difractómetro Philips, utilizando un anticátodo de cobre. Las condiciones de operación fueron de 35 Kv y 20 mA. Se tomaron cuatro registros; primero sobre la muestra en bruto (no orientada), segundo sobre muestra orientada, tercero sobre muestra orientada y calentada a  $550^{\circ}\text{C}$  y cuatro sobre muestra orientada y tratada con etilen-glicol\*.

La gama granulométrica de los sedimentos de la playa, va de limo-arcilla hasta arcilla casi pura; la parte arcillosa de este sedimento está siempre compuesta en su mayoría de montmorillonita y anacilma (Figura 18). La composición mineralógica de la arcilla es simple y no varía ni en tiempo (espesor) ni en espacio. Además, esta arcilla, de composición muy bien definida, no se encuentra afuera de la playa a excepción de su desembocadura fósil hasta el mar, actualmente cerrada por un pequeño cordón de médanos y la bajada de la Sierra Seri. Se puede decir que los componentes de estas arcillas

\* Análisis efectuados por M. G. Villaseñor, UNAM y M. Delaune-Mayerre, ORSTOM.

han llegado de la Sierra Seri en suspensión (*sheet flood*) y fueron depositados en la playa después de ser retrabajados cubriendo toda la desembocadura hasta el mar. En efecto, no se encuentran los mismos sedimentos en los sondeos, perforados posteriormente ni en el fondo del Río Bacoachi y de sus principales afluentes ni al este, detrás del cordón oriental de médanos. La montmorillonita es el mineral mejor representado por sus reflexiones basales a 12 y 14 Å; estos picos se desplazan a 16 y 18 Å bajo la acción del etilen-glicol. Los otros componentes habituales de esta arcilla son las zeolitas como la clinoptilolita y de manera más particular la analcima, relativamente abundante. Estas zeolitas admiten dos orígenes, uno por procesos sedimentarios mediante la acción de soluciones con sales sódicas en arcillas lacustres y el otro, por evolución de productos volcánicos (cenizas, tobas o vidrios volcánicos). El origen será estudiado posteriormente, pero es probable que provenga de las cenizas vol-

cánicas de las sierras cercanas que será la solución más lógica, en vista del ambiente volcánico que prevalece en la región. El vulcanismo miocénico ha originado un depósito de cenizas alrededor de la playa. La analcima, formada anteriormente a su depósito, ha sido transportada hasta la playa por las aguas continentales. Sobre los diagramas, picos muy bien desarrollados, parecen demostrar una distribución igual de esta zeolita en toda la playa. La Sierra Seri posee una bajada de donde parecen provenir las arcillas que tapizan el fondo de la playa.

Se puede señalar igualmente a la illita, que aparece en toda la playa, pero con picos en los diagramas muy poco desarrollados (Figura 18). Puede ser que exista un principio de "transformación" de la montmorillonita abundante en illita (Millot, 1964).

Estos sedimentos contienen igualmente feldespatos y cuarzo, incluyendo además calcita. Encon-

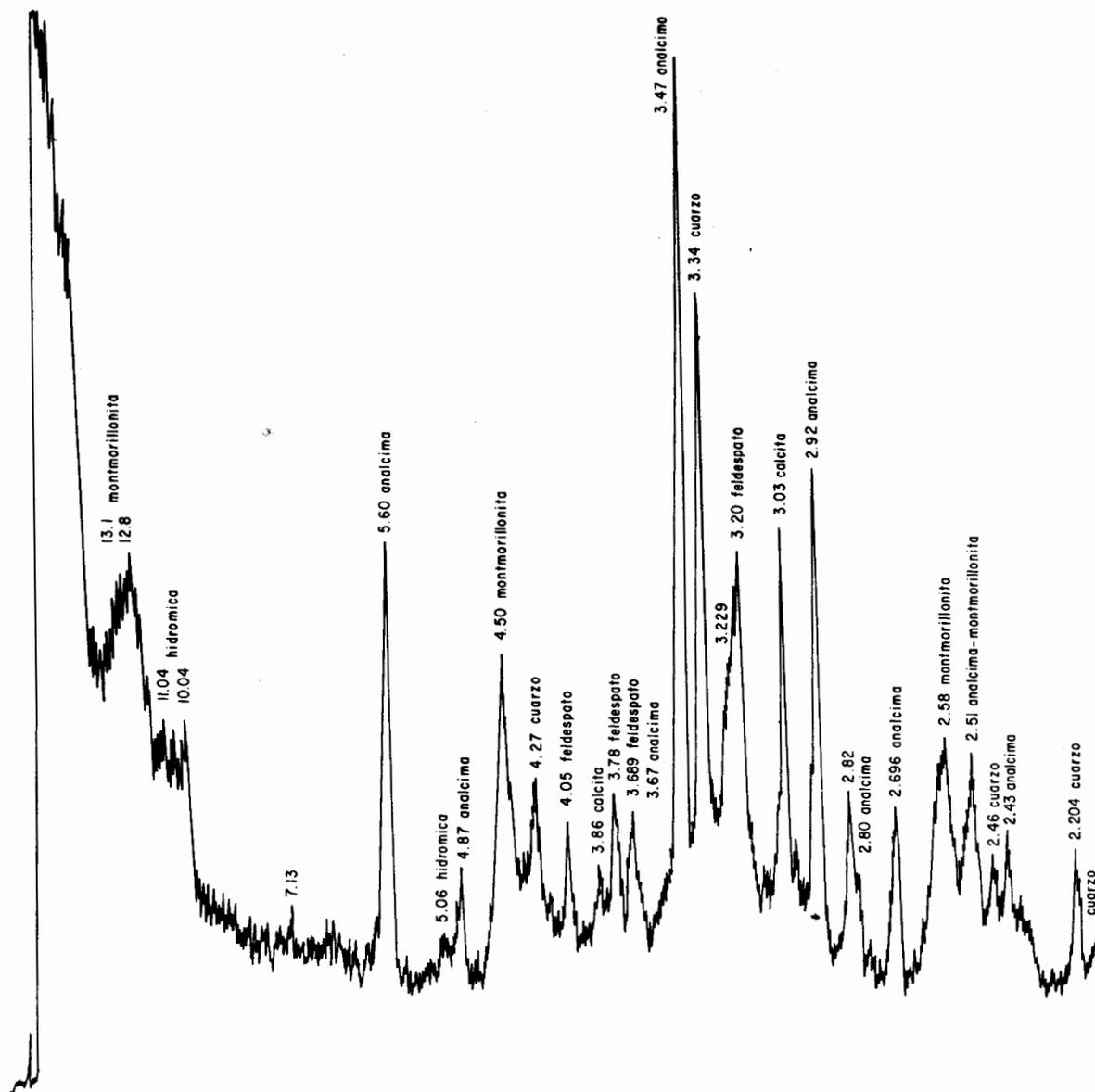


Figura 18.—Diagrama de difracción de rayos X de la arcilla de la Perforación 3, encontrada a 7 m de profundidad. Diagrama preparado por M. G. Villaseñor.

trándose en la arcilla nódulos calcáreos, provenientes de una disolución seguida por una evaporación y una concentración durante la subida capilar de la solución. Sin embargo, no se observaron formaciones de costras calcáreas.

La caolinita aparece también en algunas muestras. Mineral de alteración de las rocas, se formó probablemente en las sierras circunvecinas durante un período húmedo, anterior al actual período seco (Sieffermann, 1973). Esto tiende a indicar que la arcilla en la playa tiene un origen detrítico.

La halita se presenta en aspectos diferentes en el oeste y en el este. En el oeste aparece en forma de costras abombadas en la base del cordón eólico occidental (Figura 10). Estas costras contienen bolsas y burbujas de aire; la estructura así formada es quebradiza. En el este, se encuentran estas mismas costras pero mucho menos desarrolladas. La halita cementa los granos arenosos del cordón fósil (cordón oriental) formando de esta manera concreciones de arena (Figura 12) y algunos domos, vestigios de médano fósil, originando, después de lluvias fuertes, verdaderos cañones cavados en el cordón (Figura 13). Siendo entonces un mineral importante en las formaciones laterales a la playa.

La Playa San Bartolo se presenta en forma de cuenca confinada donde actualmente, después de una estación lluviosa, las soluciones se depositan ya que la evaporación es netamente preponderante sobre la pérdida por infiltración o por evacuación.

La arcilla, esencialmente la montmorillonita con 12 y 14 Å, con la analcima, llena el fondo de la playa, mediante el aporte del drenaje que escurre sobre la bajada de la Sierra Seri. El desalojo del agua es a través de una desembocadura que llega hasta el mar, estando cubierta ésta por las mismas arcillas. Este proceso parece ser el único como aporte de las arcillas, ya que los ríos Bacoachi y Noriega presentan en sus cauces un tipo de sedimento totalmente diferente. Es probable que estos aportes limo-arenosos provenientes de los dos ríos constituyan una parte de la fracción gruesa del sedimento total depositado en la playa.

El origen de estos minerales puede ser diverso y, por consiguiente, difícil de precisar de una manera segura. Los materiales volcánicos son abundantes alrededor de la playa, su alteración en un medio alcalino (pH elevado 8-9) produce minerales arcillosos, en particular zeolitas (analcima) y montmorillonita (Keller *in* Millot, 1964). La alteración meteórica de las rocas volcánicas puede dar origen también a la montmorillonita y llegar hasta la caolinita (la arcilla del fondo contiene caolinita). De aquí se puede suponer que hubo un clima más húmedo y caliente que el actual, cuando la alteración de las rocas originó la caolinita. Los productos obtenidos de la *degradación* son transportados por los arroyos hasta la cuenca de sedimentación. La saturación del medio en la playa origina una transformación por *agradación* que se orienta hacia la montmorillonita. Los productos amorfos por el mismo proceso inician también una *neoformación* hacia la montmorillonita. De igual forma, bajo la influencia de alteración química intensa, se desarrolla la montmorillonita.

Se puede ver como diversos factores concurren

para resultar al final con el mismo mineral en la playa que es la montmorillonita. Hay varias posibilidades y es probable que algunas de estas se hayan manifestado al mismo tiempo.

#### CONCLUSIONES

La región estuvo influenciada por los ríos Bacoachi y Sonora así como sus numerosos afluentes que depositaron sus sedimentos desde el Pleistoceno hasta el Reciente. Sobre estos depósitos, se desarrollaron varias playas, de las cuales la más importante es la de San Bartolo.

La región sufrió fallamiento durante el Terciario, proceso que todavía parece ser activo. Es probable, que la Playa San Bartolo ocupe una fosa o semi-fosa tectónica al lado oriental de la Sierra Seri (King, 1969). Mientras el Río Bacoachi cubría con sus aluviones la región, este fue capturado por la depresión que ocupa actualmente la playa. Poco a poco, el río regularizó su curso, formando un cauce sobre sus mismos aluviones, originándose un cañón de 5 a 10 m de profundidad. Los vientos dominantes, provenientes del noroeste, transportaron detritos arenosos y formaron un cordón de médanos en el extremo este de la playa. Al mismo tiempo, el clima cambió y de pluvial y húmedo se volvió caliente y seco. Paulatinamente, la alimentación fluvial se redujo y, finalmente cesó por completo. La evaporación y la precipitación de sal fijó las arenas del cordón, acumuladas por el viento. A su vez, las lluvias torrenciales esporádicas erosionaron el cordón de médanos, formando pequeños cañones o cañadas de estrecha amplitud (*bad-lands*). La salida de la playa se cerró por un cordón de médanos, ya que el gasto del agua no fue suficiente para mantener una abertura.

Los ríos Bacoachi y Noriega, así como los arroyos descendientes de la Sierra Seri, escurren intermitentemente dejando en la playa sedimentos gruesos, arenas-limosas y arcillas por la pérdida de competencia de la corriente. Se notan igualmente gravas que se encuentran exclusivamente en el borde oriental de la playa. El agua excedente desaparece por evaporación.

El fondo de la playa se presenta a 5 m sobre el nivel del mar actual. Ningún fósil ha sido encontrado en los sedimentos de la playa. En cambio, los niveles pleistocénicos, que están a la misma altitud en el otro lado de la Sierra Seri en la costa del Golfo, contienen una gran cantidad de fósiles (conchas y foraminíferos); esto significa que el mar no alcanzó a llegar y quedarse en la playa de manera permanente. Por lo tanto, un origen marino, o que haya habido agua marina en la playa están descartados. Se puede pensar que el mar se haya remontado, en forma de estuario, hasta la desembocadura de la playa solo durante la alta marea, ya que el mar está cerca y se encontraron conchas *in situ* a 10 km al sur de la playa.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Anteys, Ernest, 1952, Arroyo-cutting and filling: Jour. Geol. v. 60, p. 375-385.  
 Bischoff, J. L., y Henyey, Th. L., 1974, Tectonic elements of the central part of the Gulf of California: Southern Calif. Univ., Dept. Geol. Sci., Contr. 332.

- CETENAL, 1975, Hoja Isla Tiburón 12 R III: México, D. F., Comisión de Estudios del Territorio Nacional, carta climática, escala 1:500,000.
- Chico, R. J., 1968, Playa: *in* Fairbridge R. W. ed., The Encyclopedia of geomorphology, New York, Reinhold, p. 865-871.
- Cooke, R. U., y Reeves, R. W., 1976, Arroyos and environmental change in the American southwest: Oxford, Clarendon Press, 213 p.
- Derruau, Max, 1966, Geomorfología: Barcelona, Ariel, 442 p.
- Dunbier, Roger, 1968, The Sonoran desert, its geography, economy and people: Tucson, Univ. Arizona Press, 426 p.
- Emery, K. O., 1938, Rapid method of mechanical analysis of sand: Jour. Sedim. Petrol., v. 8, p. 105-111.
- Fairbridge, R. W., 1968, Bajada, Bahada (Proluvium): *in* Fairbridge R. W. ed., The Encyclopedia of geomorphology: New York, Reinhold, p. 49-51.
- Folk, R. L., 1966, Petrology of sedimentary rocks: Austin, Texas, Hemphill's, 154 p.
- Gastil, R. G., y Krummenacher, Daniel, 1974, Reconnaissance geologic map of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahía Kino: Geol. Soc. America, MC-16, escala 1:150,000.
- Glennie, K. W., 1970, Desert sedimentary environments: Amsterdam, Elsevier, 222 p.
- Inman, D. L., y Chamberlain, T. K., 1955, Particle size distribution in nearshore sediments: Soc. Econ. Paleont. Min., Spec. Publ. 3, p. 106-126.
- Jáuregui-Ostos, Ernesto, 1970, Distribución de la frecuencia de heladas, lluvias y tormentas eléctricas en México: Ing. Hidr. (México), v. 24, p. 320-340.
- King, P. B., 1969, Tectonic map of North America: Washington, D. C., U. S. Geol. Survey, escala 1:5,000,000.
- Krumbein, W. C., 1932, The mechanical analysis of fine-grained sediments: Jour. Sed. Petrol., v. 2, p. 89-124.
- Lecolle, J. F., y Villaseñor, M. G., 1976, Estudio sedimentológico preliminar de la laguna-playa San Bartolo, Sonora, México: Congr. Latinoamer. Geología, III, Acapulco, resúmenes, p. 71 (resumen).
- Leopold, L. B., 1951, Rainfall frequency, and aspect of climatic variations: Trans. Amer. Geophys. Union, v. 32, p. 347-357.
- Leopold, L. B., Leopold, E. B. y Wendorf, Francis, 1963, Some climatic indicators in the period A. D. 1200-1400 in New Mexico: Arid Zone Res., UNESCO., Changes of climates, Proc. Rome Sympos., p. 265-270.
- López-Ramos, Ernesto, 1974, Carta geológica del Estado de Sonora: México, D. F., Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, escala 1:500,000 (inédito).
- McCleary, J., 1968, The biology of desert plants: *in* Brown, G. W., Jr., ed., Desert Biology. New York, Academic Press, v. 1, p. 141-194.
- Malpica, V. M., y Ortlieb, Luc, 1976, Los depósitos marinos cuaternarios en el noreste del Golfo de California: Congr. Latinoamer. Geología, III, Acapulco, resúmenes, p. 83 (resumen).
- Martin, P. S., 1963, The last 10,000 years, a fossil pollen record of the American Southwest: Tucson, Univ. Arizona Press., 87 p.
- Millot, Georges, 1964, Géologie des argiles: Paris, Masson 499 p.
- Neal, J. T., 1975, Playas and dried lakes: Benchmark papers/20 in Geology. Stroudsburg, Pennsylvania, Dowden, Hutchinson and Ross, 411 p.
- Petit-Maire, Nicole y Lancin, Monique, 1976, Un paleolago del NW mexicano en su conjunto paleontológico; la Playa San Bartolo (Sonora), implicaciones paleoclimatológicas: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología. Revista, núm. 2, p. 84-85.
- Shepard, F. P., 1954, Nomenclature based on sand-silt-clay ratios: Jour. Sedim. Petrol., v. 24, p. 151-158.
- Sieffermann, Gaston, 1973, Les sols de quelques régions volcaniques du Cameroun: Paris, Mem. ORSTOM, 183 p.
- Soto-Mora, Consuelo, 1965, Vocabulario geomorfológico: México, D. F., Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geografía, 202 p.
- Tricart, Jean, 1969, Le modelé des régions sèches: Paris, SEDES, 472 p.
- Wentworth, C. K., 1922, A scale of grade and class terms for clastic sediments: Jour. Geol., v. 30, p. 377-392.