

Cuatro Ciénegas

un laboratorio natural de astrobiología

La astrobiología es una nueva disciplina que pretende estudiar la vida fuera de la Tierra. Su primera meta es entender cómo empezó y evolucionó la vida aquí, para así buscar vida o sus señales en otros planetas de manera más eficiente. En otras palabras, intenta ligar la evolución de los planetas con la evolución biológica y específicamente busca determinar si la evolución biológica se repetiría “como una película”, esto es que si bajo ciertas condiciones fisicoquímicas particulares se obtendrían los mismos tipos de organismos con adaptaciones y fisiologías similares o no. Nosotros consideramos que estudiar con cuidado la actual ecología microbiana nos ayudará a predecir dónde podemos buscar los organismos y cómo descifrar las señales de vida, ya sea analizando ambientes que emulen lo esperado en determinados planetas o condiciones que reflejen la vida antigua en la Tierra, especialmente las que llamamos extremas, como temperaturas muy altas o bajas, salinidades o pH extremos, etcétera.

Con estos objetivos nuestro grupo de trabajo interdisciplinario ha laborado durante varios años en el Valle de Cuatro Ciénegas, en Coahuila. Nuestro grupo incluye desde limnólogos y paleontólogos hasta genetistas de poblaciones que estudian peces y bacterias, pasando por biólogos moleculares y especialistas en invertebrados. Este valle funciona como un laboratorio natural para el estudio de la evolución temprana en la Tierra, por lo que es particularmente importante para la astrobiología. Además, se sospecha que el tipo de sales y la dinámica del agua podrían ser análogas a las de Marte y, por lo tanto, serviría como un modelo para buscar vida en ese planeta. Por otra parte, es uno de los pocos lugares donde actualmente coexisten los estromatolitos, característicos de la vida temprana en la Tierra, con una heterogénea comunidad de animales, y también es uno de los sistemas acuáticos continentales con mayor diversidad y endemismos de México y el mundo.

Un factor interesante es que sus aguas son muy pobres en nutrientes, particularmente en fósforo. Aun así, en ellas existe una cadena trófica análoga a la que se considera distintiva del Cámbrico temprano (hace unos 540

Antonio Cruz, Luis E. Eguiarte, Ferrán García Pichel y Jim Elser





millones de años), donde los estromatolitos y bacterias fotosintéticas (cianobacterias) y quimioautótrofas son fuente de alimento de los metazoarios, principalmente caracoles y peces herbívoros. En este ecosistema acuático las bacterias, y no las algas o plantas superiores, parecen formar la base de la pirámide alimentaria.

Cuatro Ciénegas está situado en el estado de Coahuila y presenta una extensión de aproximadamente 150 000 kilómetros cuadrados. Su altitud promedio es de 735 metros, pero está encerrado entre altas serranías formadas principalmente por rocas calizas que alcanzan hasta 3 000 metros de altura. Su clima es muy seco, semicálido, con pocas lluvias en verano y ocasionalmente algunas en invierno. Se caracteriza por su gran diversidad de ambientes acuáticos, entre los que destacan los humedales tipo pantanos. Incluye también complejos sistemas de corrientes subterráneas, manantiales, canales, ríos, lagos y estanques temporales. Algunos de los manantiales son termales (30-35 °C) y su temperatura disminuye corriente abajo, lo cual puede deberse a un enfriamiento del agua a lo largo del curso o bien a que existen diferentes fuentes

de abastecimiento de agua. Las aguas en general son duras, ya que contienen gran cantidad de sales de calcio y magnesio con sodio, potasio, sulfatos, carbonatos y cloruros. La dureza de las aguas se incrementa a partir de los manantiales hasta los ríos y las lagunas de desecación donde la salinidad es de nivel de saturación. El pH cambia de manera paralela, y varía de neutro (7.0-7.2) en los manantiales hasta bastante básico (8.0-9.7) en lagos terminales en fase de desecación.

La extraordinaria riqueza en especies de las aguas de Cuatro Ciénegas, muchas endémicas, está ampliamente descrita y fue factor esencial para que se decretara como Reserva de la Biósfera en 1994. Las causas de esa gran diversidad han sido poco exploradas, pero se sugiere que el valle sirvió como refugio para la flora acuática y terrestre durante las glaciaciones, brindando las condiciones adecuadas para que se mantuviera una inmensa diversidad de organismos y microambientes. Éstos han permanecido a lo largo del tiempo debido a una gran estabilidad ambiental y a su aislamiento geográfico. También se ha sugerido que la fauna acuática experimentó una radia-

ción adaptativa producto de altas tasas de especiación, lo que generó el elevado número de endemismos. Nosotros creemos que las comunidades acuáticas de la zona son particularmente estables, y que sus condiciones específicas, junto con la baja cantidad de fósforo, impiden que las algas dominen los cuerpos de agua. Esto permite mantener las comunidades de estromatolitos y todos sus organismos asociados casi sin cambios.

Dado el carácter extremadamente salado del camino del agua de Cuatro Ciénegas, pensamos que los microorganismos que soportan estas condiciones representan un grupo clave para el análisis junto con los estromatolitos que mantienen al menos parte de la cadena alimentaria del agua.

Bacterias y arqueas

Actualmente se sabe que los organismos que han evolucionado en nuestra Tierra pertenecen a tres grandes linajes, llamados "dominios". Dos de ellos corresponden a organismos que no tienen núcleo o procariontes, los dominios Archaea y Bacteria, mientras que el tercero está formado por los organismos que tienen núcleo en sus células, los Eukarya. Los procariontes no parecen ser muy diferentes a simple vista, de hecho por mucho tiempo se les consideró como un solo grupo. Fue a partir del surgimiento de la biología molecular y del análisis de secuencias de ADN que comenzaron a detectarse diferencias importantes entre estos dos tipos de procariontes.

En nuestro estudio nos interesa mucho la resistencia a la salinidad, ya que los ambientes hipersalinos son comunes en Cuatro Ciénegas y es el tipo de ambiente donde se considera que existió o podría existir vida en Marte. En relación con la salinidad, los organismos se clasifican en dos categorías: la primera es la de los halófilos obligados, que crecen a no menos de entre 10 y 12% de sal común en el agua y hasta en un límite de 34%, dependiendo de la temperatura y de si los iones en solución son de potasio o de cloro. Los arqueas halófilos utilizan la actividad de un pigmento llamado bacteriorrodopsina como uno de los mecanismos para sobrevivir en altas concentraciones de sal. La segunda categoría corresponde a los halotolerantes, generalmente bacterias y algas (Eukarya), que pueden vivir en un amplio rango de concentraciones de sal, desde prácticamente nada hasta 30% de sal común, y en donde el soluto compatible no es ni potasio ni cloro, sino compuestos orgánicos.

Debido a lo extremo de las condiciones de salinidad, todos estos organismos presentan una serie de adaptaciones fisiológicas y bioquímicas que les permite lidiar con la baja cantidad de agua disponible y la diferencia de presión osmótica que se genera en ambos lados de la membrana celular. Los ambientes hipersalados también tienen otras características, como alta composición iónica total, temperaturas generalmente estables, luz intensa (en el caso de salinas de desecación) y pH alcalino. Para compensar la gran presión osmótica en estos ambientes, los organismos tienen que producir u obtener del exterior solutos compatibles con el medio y lograr el balance osmótico que mantenga su integridad celular. Estos solutos pueden ser iones inorgánicos o moléculas orgánicas, y el uso de unos u otros depende del tipo de organismo.

Los arqueas se caracterizan por colonizar ambientes extremos, donde no se había sospechado que la vida fuera posible. Estos organismos pueden crecer en temperaturas altas o muy bajas, elevadas concentraciones de sal, gran acidez, alta presión, nutrimentos muy escasos, etcétera. En general son anaerobios, no toleran el oxígeno, y muchos de ellos son autótrofos, pues obtienen energía y construyen sus nutrimentos a partir de bióxido de carbono. En este dominio los organismos halófilos son una excepción, ya que son aerobios, requieren oxígeno, y presentan un metabolismo tipo quimiorganótrofo, en donde la fuente de energía son aminoácidos o ácidos orgánicos. Esto sugiere que los arqueas halófilos aparecieron después de que las cianobacterias contaminaran con oxígeno el planeta, mientras que los otros miembros del dominio parecen ser más antiguos.

Los arqueas halófilos logran mantener un equilibrio osmótico en ambos lados de la membrana con un bombeo activo (requiere energía) de iones de potasio (K^+) del exterior hacia el interior para equilibrar las concentraciones iónicas de sodio (Na^+) fuera de la membrana (resultado de la gran cantidad de sal común en los ambientes en que estos organismos se encuentran).

Algunas especies de arqueas halófilos son capaces de la síntesis del adenosín trifosfato (ATP) mediada por luz usando la bacteriorrodopsina, sin embargo, como esta vía no involucra pigmentos clorofílicos no puede considerarse fotosíntesis. Los arqueas extremo-halófilos tienen una pigmentación roja debida a la bacteriorrodopsina, estructura similar al pigmento visual llamado rodopsina, la cual se asocia a una molécula tipo carotenoide llamada retinal que puede absorber la luz y catalizar la formación de una es-

estructura con la fuerza de mover protones. En condiciones de baja aeración, las arqueas halófilas cambian de color debido a la estructura bacteriorrodopsina + retinal, pasando de un color rojo-naranja a un color morado-rojo intenso. El mecanismo de producción de ATP en estas condiciones de estrés consiste en generar un gradiente protónico similar al de la mitocondria eucarionte. Sin embargo, el crecimiento en estas condiciones es muy lento.

En contraste, las bacterias verdaderas o dominio Bacteria en general colonizan ambientes más cercanos a las condiciones fisiológicas a las que estamos acostumbrados; sin embargo, también existen bacterias que pueden vivir en condiciones extremas de temperatura, sal y anaerobiosis. Las bacterias son el dominio de la vida más abundante y diverso en el planeta. Sus formas no son muy diferentes, pero su variedad en estrategias para obtener recursos y para sobrevivir son extraordinarias.

Los organismos halotolerantes que viven en condiciones saladas han desarrollado diferentes rutas para el mantenimiento de la presión osmótica. Las bacterias halotolerantes tienen varios mecanismos para la osmorregulación, mientras que las Archaea halófilas dependen totalmente de los iones que existen en el ambiente en donde se encuentran.

Las bacterias de Cuatro Ciénegas

En Cuatro Ciénegas encontramos una diversidad impresionante de organismos de los dominios Bacteria y Archaea. Para este análisis hemos usado tanto técnicas tradicionales, que involucran el cultivo de los procariontes en medios particulares, como técnicas moleculares, que implican, en primer lugar, la extracción del ADN total de muestras ambientales y su posterior análisis con diferentes métodos que permiten clasificarlo en distintos niveles. El principal resultado de nuestros estudios es el descubrimiento de que las comunidades bacterianas en Cuatro Ciénegas son muy diferentes unas de otras: si bien hay algunas especies que se encuentran en varios ambientes, la composición de especies es contrastante en los distintos sitios.

Algunas de las bacterias que hemos encontrado son similares a organismos cosmopolitas que están en ambientes salinos del mundo, como *Bacillus*, capaces de formar esporas y volar con el polvo. También hemos detectado numerosos géneros de Bacteria y Archaea que se consideran fundamentalmente marinos. Como ejemplos de

estos microorganismos están los *Rheinheimera* que es una bacteria marina de los mares del norte de Europa, bacterias similares a simbioses de moluscos marino del género *Teredinibactertunerae*, así como otras cercanas a *Rhodobacter* marinas que forman parte del picoplancton. En las cuevas de Cuatro Ciénegas encontramos bacterias oxidantes del azufre, muy similares a algunas descritas como endosimbioses de gusanos exclusivos de las ventilas hidrotermales del Atlántico, bacterias típicas de glaciales y arqueas sólo reportadas en sedimentos marinos. También encontramos representantes de los géneros *Magnetospirillum* y *Aquaspirillum*, que son típicamente marinos.

Dada su relevancia para la astrobiología, queremos comentar con más detalle algunos de los procariontes halófilos y halotolerantes que hemos encontrado en Cuatro Ciénegas. Por ejemplo, tenemos *Halomonas*, *Vibrio*, *Oceanomonas* y la arquea *Halobacterium*, que se han reportado en salinas marinas de otras localidades del mundo, pero no son fáciles de movilizar por el aire debido a que son susceptibles, como la mayor parte de los procariontes, a la desecación y a la luz ultravioleta.

Los datos de comunidades bacterianas que tenemos hasta ahora indican que las cepas similares a organismos marinos de Cuatro Ciénegas son residentes, ya que no sólo hay gran cantidad de especies en los cuerpos de agua de Cuatro Ciénegas, sino también hay mucha diferenciación entre sitios, generando un conjunto aún más diverso a la escala de todo el valle. Si existieran especies migrantes, aunque su movimiento entre pozas sea raro, esta pequeña tasa de migración sería suficiente para homogeneizar las poblaciones y reducir la diferencia entre sitios. Este hecho no se observa en Cuatro Ciénegas, pero es muy común en las salinas artificiales de varios sitios del mundo, donde la microbiota es generalista y cosmopolita, por lo que la diversidad de especies de procariontes, tanto Bacteria como Archaea, es muy baja en todos los niveles.

Los estromatolitos

Como hemos mencionado, las estructuras microbianas conocidas como estromatolitos dominaron el registro fósil de la Tierra por miles de millones de años antes de la explosión del Cámbrico. Durante el largo periodo en que fueron abundantes, el oxígeno generado por la fotosíntesis de las cianobacterias (bacterias verdaderas que dominan en estas estructuras) se fue acumulando, hasta convertir los océanos y la atmósfera en medios oxidantes, tal y como



los conocemos hoy en día y como no existen en ningún otro planeta del sistema solar. Nuestra atmósfera con oxígeno que nos permite respirar y la capa de ozono que nos protege de la radiación solar ultravioleta son el legado de estos antiguos estromatolitos. Sin embargo, en el inicio del Cámbrico estos organismos sufrieron un declive generalizado en tamaño y abundancia.

Pero aunque raros, todavía existen varios tipos de estromatolitos vivos. Éstos son agrupaciones de microbios fotosintéticos, principalmente cianobacterias, junto con otras bacterias y concreciones minerales calcáreas. Podría-

mos decir que son rocas vivientes o bacterias petrificadas. La formación de estromatolitos es un proceso complicado en el que participan varios grupos de bacterias, principalmente cianobacterias. Debido a su elevado componente mineral resisten bien los procesos de transformación geológica, y por eso se les encuentran en el registro fósil. En la actualidad pueden crecer adosados a taludes o en el fondo de aguas someras formando arrecifes en miniatura, incluso pueden estar sueltos como pequeñas pelotas deformadas sobre los sedimentos. A estas últimas estructuras se les llama oncolitos. Los estromatolitos generalmente



sólo se forman en ambientes muy particulares, como las zonas marinas de intermarea donde la salinidad puede llegar a ser muy alta y en algunas localidades de agua dulce muy ricas en calcio. Estos ambientes generalmente son pobres en especies que no sean parte de los propios estromatolitos.

La presencia de estos organismos en un determinado lugar no es sólo una función compleja de los factores que permiten su formación, sino también de las tasas de destrucción a las que puedan estar sometidos. La desaparición casi total de los estromatolitos fósiles coincide con la aparición de los animales. La hipótesis llamada "del pastoreo", basada en esta coincidencia, nos explica su desaparición masiva en el Cámbrico como una causa directa de la acción animal. Ávidos de ingerir las nutritivas películas bacterianas, los animales recién surgidos fueron destruyendo los estromatolitos a medida que se iban formando. En particular los caracoles, que, con su potente rádula bucal son capaces de excavar las estructuras petrificadas en busca de comida.

Esta teoría es la más aceptada y se ve reforzada por el hecho de que actualmente los estromatolitos (y los tapetes microbianos, que son sus análogos sólo que sin calcifi-

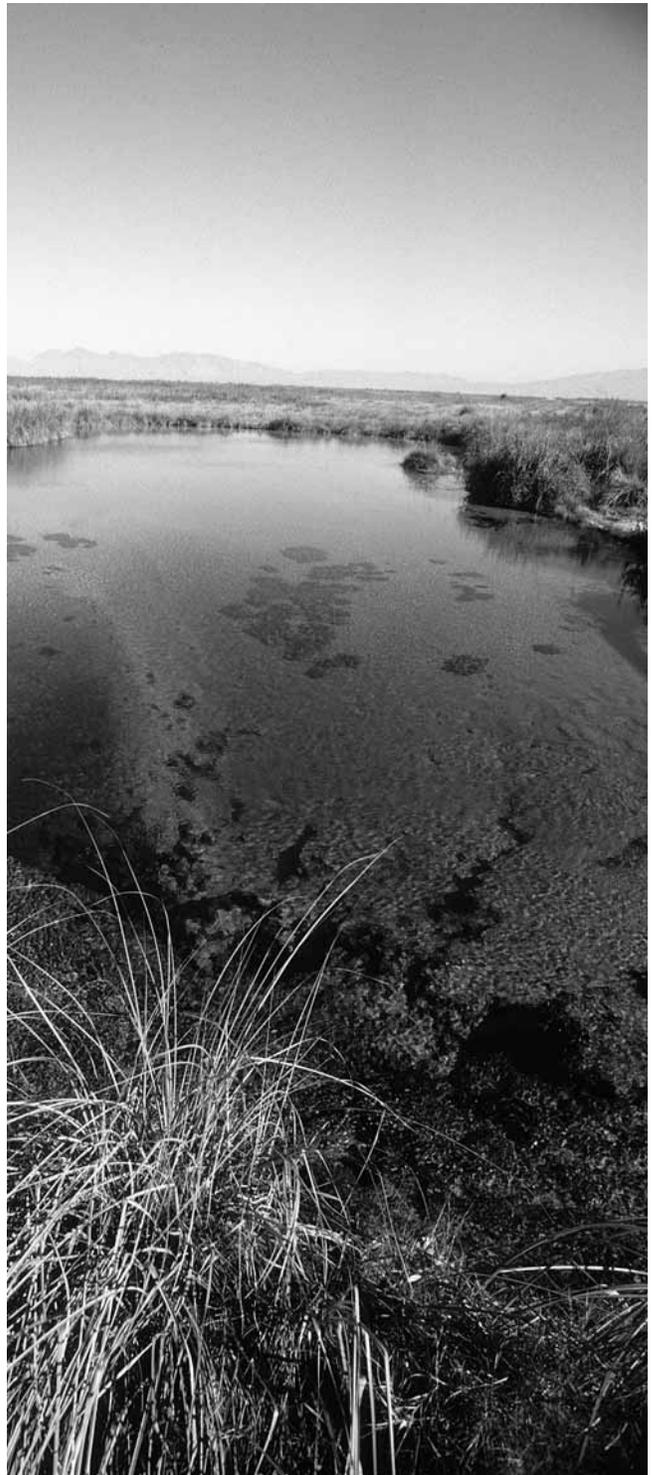
car) tienden a encontrarse únicamente en ambientes extremos, como las fuentes termales y las pozas de salmuera, donde no se desarrollan los invertebrados. Sin embargo, en los manantiales termales y las corrientes de Cuatro Ciénegas encontramos una gran diversidad de formas y tipos de estromatolitos coexistiendo con animales tanto vertebrados como invertebrados. Aparentemente esos estromatolitos son la base principal de la cadena alimentaria, lo cual significa que todo el resto del ecosistema se alimenta de ellos. Por lo tanto, Cuatro Ciénegas parece ser un lugar único en la Tierra no sólo por la coexistencia de estromatolitos y animales, sino también porque encontramos una cadena alimentaria heterogénea, con una considerable diversidad estructural y de especies. En otras palabras, en Cuatro Ciénegas coexiste una gran variedad de estromatolitos con una notable cantidad de sus depredadores.

Los microorganismos por sí solos harían de Cuatro Ciénegas un interesante laboratorio vivo, pero es la coexistencia de las comunidades estromatolíticas con animales complejos, como son peces, caracoles y crustáceos, lo que hace realmente únicos en el mundo moderno a estos manantiales y corrientes de agua.



Marte y Cuatro Ciénegas

Algunos autores han sugerido que la atmósfera marciana debió ser mucho más caliente y gruesa en el pasado de lo que es en la actualidad, y que tenía elevadas cantidades de bióxido de carbono. En algún momento debieron darse importantes transformaciones atmosférico-climáticas, que provocaron cambios hidrológicos complejos con los que pudieron presentarse reducciones en la mayoría de los cuerpos superficiales de agua formando evaporitas con sal común. Mientras que el agua se congelaba como resultado de los cambios climáticos, las sales en el agua se concentraron cada vez más. Con base en esto se ha sugerido que organismos análogos a nuestros arqueas halófilos pudieron existir en las zonas de desecación.



Esta hipótesis sobre la vida en Marte y la conocida habilidad de los arqueas halófilos para sobrevivir en un ambiente de baja actividad hídrica, basada en las especiales adaptaciones bioquímicas mencionadas, así como sus requerimientos de altas concentraciones de sal, los hacen modelos viables para explorar la posible existencia de vida en el Marte primitivo. Por ello, las características de Cuatro Ciénegas lo convierte en un modelo terrestre adecuado para lo que se podría buscar en Marte.

Por otra parte, y dejando la astrobiología a un lado, el realizar estudios cuidadosos de la microbiota de este valle nos puede decir cosas muy interesantes sobre la vida en este planeta. Actualmente estamos llevando a cabo estudios de genética de poblaciones de especies de bacterias y arqueas extremófilas, mismos que nos van a permitir comparar sus patrones con microorganismos que entendemos bien, como nuestro comensal y a veces patógeno *Escherichia coli*, las bacterias del suelo *Rhizobium* y aquellas generalistas de mares salados y suelos como *Bacillus*. Esto nos lleva a preguntarnos si existe un microbio promedio y si existen algunos patrones que se repiten en la ecología evolutiva de los organismos de Bacteria y Archaea. Con estos detallados estudios de las comunidades y poblaciones de procariontes podremos descubrir las reglas que siguen los seres vivos sin importar su ubicación, ya que las fuerzas evolutivas (selección natural, migración, deriva génica, mutación) deben ser las mismas y sólo varía en cada organismo la intensidad con la que actúan y su interac-

ción, dependiendo de la historia genética particular de cada uno de los organismos.

Un laboratorio amenazado

Es innegable que el Valle de Cuatro Ciénegas representa un laboratorio vivo único en el mundo que nos permite estudiar la evolución temprana de la vida en nuestro planeta y que, por lo tanto, es de fundamental interés para la nueva disciplina llamada astrobiología. La diversidad de ambientes particulares, la gran cantidad de especies endémicas y los altos niveles de biodiversidad representan un tesoro que debe ser conservado para las generaciones futuras. Sin embargo, esto es especialmente difícil dado que los ecosistemas como el de Cuatro Ciénegas son extraordinariamente frágiles. Este hábitat representa un oasis en medio del desierto de Coahuila. La presión de la gente por el uso del agua de la cuenca, sea con objetivos agrícolas u otros diferentes, es muy alta. El acto de desviar un curso de agua para usarla en irrigación conduce a la destrucción de los cauces y pozas naturales, con la concomitante destrucción de las poblaciones locales, lo que podría determinar la extinción total de las especies endémicas de peces, de caracoles y de las comunidades estromatolíticas que hacen de este valle un invaluable laboratorio natural para los biólogos evolutivos. Esperemos que nuestros estudios y la difusión de su importancia ayuden a conservar este tesoro evolutivo. @~



Valeria Souza, Ana Escalante, Laura Espinoza, Aldo Valera, Antonio Cruz y Luis E. Eguiarte
Instituto de Ecología,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Ferrán García Pichel
Jim Elser
Departamento de Biología y de Microbiología,
Arizona State University.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carr, M. H. 1979. "Formation of Martian flood features by release of water from confined aquifers", en *J. Geophys. Res.*, núm. 84, pp. 2995-3007.
- Carr, M. H. 1986. "Mars: A water rich planet?", en *Icarus*, núm. 68, pp. 187-216.
- Litchfield, C. D. 1998. "Survival strategies for microorganisms in hypersaline environments and their relevance to life on early Mars", en *Meteoritics & Planetary Science*, núm. 33, pp. 813-819.
- Madigan, M. T., J. M. Martinko y J. Parker. 2000. *Brock Biology of Microorganisms*. Prentice Hall, Nueva Jersey.

- Minckley, W. L. 1969. "Environments of the Bolson of Cuatrociénegas, Coahuila, Mexico, with special reference to the aquatic biota", en *Science Series*, núm. 2, pp. 1-65, University of Texas at El Paso.
- Ventosa, A., J. J. Nieto y A. Oren. 1998. "Biology of Moderately Halophilic Aerobic Bacteria", en *Microbiol and Mol Biol Reviews*, vol. 62, núm. 2, pp. 504-544.

IMÁGENES

Fulvio Eccardi, Cuatro Ciénegas, ca. 1980-2003.