

Auto-organización Espacio-Temporal y Procesos de Escalamiento en Geomorfología y sus Aplicaciones

Un Ensayo de Edafología Virtual

Aplicación Preliminar en la Pampa Arenosa de la Provincia de Buenos Aires

G. N. Moscatelli ¹ y J.J. Ibáñez ²

(1) INTA (Buenos Aires, Argentina)

(2) CCMA, CSIC (Madrid, España)

Introducción: autoorganización, escalas y fractales

Una gran diversidad de rasgos de la superficie terrestre, de diferente origen, manifiestan formas semejantes en un amplio espectro de escalas y/o órdenes de magnitud: desde 10^7 m hasta 10^{-2} m (Hallet 1990). A menudo, los agentes responsables de la génesis de geoformas similares son sustancialmente diferentes. Paradigmáticamente, no es inusual que causas estocásticas, como la turbulencia, (que se detallarán posteriormente en la región pampeana) den lugar a geometrías muy regulares y predecibles. Más aún, ciertas geoformas genéricas aparecen más allá del Planeta Tierra, en otros cuerpos del sistema solar. Este es el caso, por ejemplo, de ciertos modelados fluviales, como la estructura de las cuencas de drenaje (incluyendo barras de canal, morfologías dendríticas y anastomosadas, etc.), según las imágenes proporcionadas por las sondas espaciales enviadas a Marte, Venus, Titán y la Luna (Greeley & Iverson 1985). En algunos ejemplos de Marte, también se constata que las paleocuencas cumplen, como en la Tierra, las conocidas Leyes de Horton, mientras que en otros cuerpos todavía no ha sido posible encontrar tales relaciones debido, fundamentalmente, a la vaga información y/o escasa resolución proporcionada por las imágenes disponibles (Komatsu *et al.* 1992). Frecuentemente se desconoce si el fluido que las generó fue magma, agua líquida o de otra clase. En la mayor parte de los planetas del Sistema Solar, como resultado de su tenue atmósfera, así como de la escasa o nula actividad de los agentes erosivos, en la actualidad, el rasgo más significativo de su topografía es la gran cantidad y variedad de cráteres de impacto (cuyo análisis número-tamaño manifiesta síntomas de fractalidad, como ya analizaremos posteriormente) (p. ej. Woronow 1981; Mandelbrot 1983).

Otro ejemplo de autoorganización de las estructuras geomorfológicas que aparecen tanto en Marte (cerca de los polos) como en la Tierra, son los procesos morfogenéticos de naturaleza eólica (ya sean de erosión o deposición). En los dos planetas aparecen diversas geoformas tales como mares de dunas y depósitos estratificados asociados (Cuts 1973a, 1973b; Thomas & Weitz 1989). Asimismo, en ambos se manifiestan campos de dunas y/o barras de canal y/o megaripples longitudinales constituidos por trenes de lomas y hondonadas. Estos últimos, si bien suelen encontrarse asociados a la acción del viento, también pueden ser producidos por inundaciones catastróficas (Baker *et al.* 1993, Benito, 1997). En la Tierra, estas estructuras eólicas longitudinales (trenes de dunas y barras), independientemente de su génesis (viento o agua), se presentan desde escalas centimétricas o decimétricas (ripples) a kilométricas (Hallet, 1990; Baker *et al.* 1993; Benito *et al.* 1997). Uno de los megacampos de dunas paralelas y lineales más citado en la literatura es el de Rub'al Khaly en el sur de Arabia. Esta posee una extensión de 5×10^5 km². Sus dunas se extienden más de 600 km y las crestas longitudinales llegan a alcanzar los 100 km, espaciadas entre sí por hondonadas de 2.1 km de anchura (Breed & Grow

1979). Como describiremos, sus dimensiones no difieren en exceso de las paleoformas de la Pampa arenosa. Barras de canal de enormes dimensiones y trenes de megaripples con longitudes de onda de centenares de metros se han hallado tras la ruptura de los diques de presas de hielo en los inicios de las deglaciaciones en el Lago Missoula (USA) y en la base de las Montañas de Altay Siberia, asociados a flujos con picos de descarga de $1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Baker *et al.* 1993).

A cada tipo de morfología dunar de origen eólico se ha asociado un tipo de regímenes de viento característico derivados de forzamientos atmosféricos regionales (Fryberger 1979; Brown, 1983; Allen 1985).

Tanto los megaripples como los trenes de dunas longitudinales pueden considerarse estructuras espacialmente periódicas que se generan espontáneamente (como los de dimensiones normales) gracias a la acción de flujos turbulentos (de agua y viento respectivamente). Tanto uno como otro suelen albergar dislocaciones esporádicas que rompen la simetría periódica. No es tampoco inusual, aunque no obligado, que las mencionadas periodicidades se aniden unas en otras, a distintas escalas en un espacio concreto (periodicidades espaciales múltiples) (Hallet 1990). Como veremos este es el caso de los médanos parabólicos de la subregión pampena del "Sector Carlos Pellegrini-Bolívar". Así, por ejemplo, en Algodones Dunes, en el sur de California, Havholm y Kocureck (1988) detectan tres escalas, siendo la más conspicua visible desde fotografías aéreas. En el ejemplo mencionado, la jerarquía escalar de geoformas eólicas está constituida por estructuras de dimensiones características de 10^{-1} , 10^2 y 10^3 sin formas transicionales intermedias (Wilson 1972), y con ausencia de solapamiento cuando se tiene en cuenta la granulometría del sustrato. Este hecho podría indicar, o bien que los tres tipos han sido formados por procesos distintos, o lo que es más probable, que se generaran por un mismo mecanismo que actuara a diferentes escalas espacio temporales. Uno de los autores (J.J. Ibañez) observó en los alrededores de Toledo (España) una concatenación de tres abanicos aluviales. El mayor de ellos poseía unos 200 metros: En su parte distal sobresalían anidados, o encajados, otros varios de unos pocos metros de amplitud, y de dos de estos últimos, unos pocos de escala decamétrica. Mientras el más conspicuo era pre-Holoceno, los más diminutos no tenían más edad que uno o pocos días (estaban inequívocamente recién formados).

Esta autoorganización estructural como su presencia en escalas que varían en varios órdenes de magnitud (frecuentemente de naturaleza fractal) puede ser descrita y analizada por distintas subdisciplinas de las denominadas Ciencias del Caos o de la Complejidad (termodinámica del no-equilibrio, criticalidad autoorganizada, sinérgica, fractales, etc.) (Ibañez *et al.*, 1995). Según las CC. del Caos, estructuras similares pueden emerger a diversas escalas y como consecuencia de causaciones dispares. A pesar de todo, su dinámica puede ser analizada, mediante sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales (u otros instrumentos matemáticos) y su comportamiento descrito a través de conceptos tales como los exponentes de Lyapunov, cuencas de atracción, tipo de atractores, etc. (p. ej. Ibañez *et al.* 1995). Pero, ¿qué es la invarianza a los cambios de escala?; ¿cómo puede ser tratada?; ¿cuáles son sus posibles aplicaciones?; ¿qué son los objetos fractales?; ¿cómo pueden ser aplicadas estas herramientas matemáticas al análisis de las geoformas de la Pampa Arenosa?.

Procesos invariantes a los cambios de escala: leyes potenciales y fractales

Mandelbrot (1977; 2nd 1983) introdujo el término fractal para definir aquellos objetos o fenómenos espaciales y/o temporales que son continuos pero no diferenciables,

y que exhiben correlaciones parciales sobre muchas escalas; en otras palabras, que son invariantes a los cambios de escala. Se trata de un tipo de estructura matemática subyacente a muchos fenómenos, físicos, químicos, biológicos y sociales, en apariencia heterogénea y que no es otra cosa que la propiedad de la sibi semejanza o invariancia por reducción o dilatación de los objetos o procesos que la cumplen (Mandelbrot 1996). Por tanto, muchos fenómenos naturales, al menos en determinadas circunstancias, son fractales. Entre otros ejemplos cabe citar la distribución «abundancia-tamaño» de los fragmentos de rocas, avalanchas, fallas, terremotos, erupciones volcánicas, depósitos minerales, montañas, islas, cuencas de drenaje, campos petrolíferos, geografía insular, lagos, descargas fluviales, precipitaciones, hiatos estratigráficos, distribución cósmica de la materia, ciertas propiedades de los suelos, morfología de dunas, *ripples* en materiales arenosos, estructura de la nubosidad, comportamiento del sistema climático, etc. Revisiones bibliográficas de diversos procesos y estructuras fractales presentes en la naturaleza han sido compiladas por Turcotte (1992), Korvin (1992), Birdi (1993), Hastings & Sugihara (1993) e Ibáñez & Machado (1995).

Una distribución fractal requiere que el número de objetos se ajuste a una ley potencial dependiente del tamaño: el número de elementos disminuye potencialmente al aumentar su tamaño. La aplicación de las leyes potenciales en muchos campos precedió al desarrollo de la geometría fractal. No obstante la ignorancia de las bases físicas subyacentes se manifestó en el carácter empírico de estos algoritmos. Las distribuciones potenciales son las únicas clases de distribuciones estadísticas que no incluyen una longitud de escala característica. Por estas razones, son representativas de los fenómenos que exhiben invarianza a los cambios de escala, es decir, de los objetos y procesos «fractales».

Un elemento esencial de este tipo de geometría es lo que se denomina *dimensión fractal* «D» (Mandelbrot 1977). En un espacio euclidiano, los puntos tienen dimensión «0», las líneas dimensión «1», los planos dimensión «2» y los volúmenes dimensión «3». La dimensión fractal, por el contrario, adopta valores fraccionales. Así, una curva que se retuerce indefinidamente hasta parecer que llega a ocupar un plano de referencia, poseería una dimensión, tanto más cercana a dos cuanto más se aproximara a este objetivo. Análogas consideraciones podrían realizarse en lo que concierne a un plano respecto a un volumen de referencia. En otras palabras, la dimensión fractal ofrece una medida de la tortuosidad de líneas (o su complejidad; ambos aspectos están relacionados con la entropía), planos, etc. Para un objeto o proceso fractal, la «D» estimada no se altera al variar la escala de observación. En la naturaleza, por lo general, los fenómenos sólo son fractales entre ciertos rangos escalares u órdenes de magnitud (Burrough 1985). Asimismo, en el mundo real, la invarianza a los cambios de escala suele aparecer en las propiedades estadísticas de las series de datos, sin que ello equivalga a que su forma sea exactamente idéntica, como es el caso de ciertos constructos matemáticos (Turcotte 1992).

La dimensión fractal es útil como indicador de la rugosidad-complejidad de una curva, y así, cuanto mayor es la dimensión fractal, mayor es su longitud. Esta propiedad hace posible el uso de «D» para el estudio de objetos no fractales. Con este propósito, la dimensión fractal ha sido utilizada en ciencias de la Tierra para ciertos análisis de cartografías temáticas, tales como en los mapas de suelos (Arnold 1990), en ecología del paisaje (Milne 1988 & 1990), geomorfología (Snow & Mayer 1992; Ibáñez et al. 1994), etc.

Durante las dos últimas décadas, la geometría fractal ha progresado hasta llegar a desarrollar un aparato conceptual y metodológico robusto. De este modo hoy se habla de diversos tipos de fractales, tales como los *fractales autosimilares*, *autoafines* y los *multifractales* (Turcotte 1992; Mandelbrot 1989; Martín & Taguas 1998). Paralelamente,

se han propuesto diversos métodos de estimar las dimensiones fractales (Burrough 1985, 1989). Muchos de ellos dan valores diferentes, por lo que, a la hora de hacer comparaciones, debe tenerse muy en cuenta los métodos utilizados.

Los fractales y el problema de la medida

La geometría fractal está asociada al problema de la medida. Así, por ejemplo, al intentar medir la longitud de una línea costera, puede comprobarse cómo su estima aumenta al incrementarse la escala de resolución empleada (Mandelbrot 1975; CORINE 1998). En otras palabras, no es posible obtener un valor único natural. Como consecuencia de su reconocida invarianza de escala, la longitud de una línea costera aumenta de acuerdo con una ley potencial, al incrementar la escala de resolución empleada. La potencia obtenida sirve para determinar su dimensión fractal (Mandelbrot 1975).

De hecho, el problema de la generalización topográfica es un campo en donde han proliferado los estudios sobre geometría fractal (p. ej. Mark & Aronson 1984). Mediante técnicas espectrales, se ha encontrado que la dimensión fractal de transectos topográficos oscila alrededor de 1.5, indicando su parentesco con el ruido browniano (característico de los fractales autoafines) (Turcotte 1992). La relación de topografía y batimetría con el ruido browniano implica que ambas variables son también autosimilares (Turcotte 1992). Aunque resulta más complicado obtener las dimensiones fractales bidimensionales que las monodimensionales, en general, la relación $D_2 = D_1 + 1$, (siendo D_2 la dimensión fractal de una superficie y D_1 la de una línea) es una buena aproximación (Turcotte 1992).

La aplicabilidad de la estadística fractal a la topografía permite elaborar mapas fractales sobre imágenes satelitales y modelos digitales del terreno (De Cola 1989; Huang & Turcotte 1989). De este modo se ofrece una visión sintética de su textura y rugosidad (Turcotte 1992), respectivamente. Se ha demostrado la similitud en las estimas de la dimensión fractal en regiones distintas (Huang & Turcotte 1989; Turcotte 1992). Sin embargo, aún no se ha podido establecer categóricamente si toda la topografía terrestre es de naturaleza fractal.

Desde ciertas perspectivas, los objetos y/o procesos fractales pueden dividirse en fractales autosimilares y fractales autoafines. La topografía es un ejemplo de ambos. Al contrario que en los *fractales autosimilares*, en los *fractales autoafines*, al cambiar de nivel de resolución, el valor de D se altera de modo predecible (Turcotte 1992). Por tanto, aunque al modificar la resolución, las imágenes topográficas obtenidas no parecen autosimilares (al aumentar la escala disminuye D), las razones de altura a anchura de montañas y colinas parecen ser, más o menos, las mismas.

Erosión y geometría fractal

El modelado terrestre y su expresión topográfica son el resultado de la acción de dos procesos frecuentemente contrapuestos, tectónicos y erosivo-sedimentarios. En los últimos años han proliferado los estudios que abordan la aplicación de la geometría fractal a problemas geomorfológicos (p. ej. Andrews & Buckman 1987; Snow & Mayer 1992; Korvin 1992; Ibáñez et al. 1994) y especialmente al de las formas generadas por la erosión fluvial (Berquist & Snow 1985; Culling 1986; Tarboron *et al.* 1988; Chase 1988; Gupta & Waymire, 1989; Snow 1989; La Barbera & Rosso 1989; Newman & Turcotte 1990). También han sido estudiados, entre otros temas, la erosión de los acantilados litorales (Andrews & Bucknam 1987), los escarpes de fallas (Avilés & Scholz 1987), las repercusiones de la tectónica y el clima sobre la topografía (Chase & Woodward 1990; Lifton & Chase 1992), la geometría de rías (Nakato 1983), la geomorfología kárstica

(Reams 1992), los suelos de permafrost con estructuras poligonales (por lo que posiblemente también puedan evidenciarse manifestaciones fractales en las estructuras de agrietamiento de vertisoles y de ciertos suelos con encharcamiento superficial) (Hallet 1990), el modelado eólico (Anderson 1990; McLean, 1990), etc.

Hay considerables evidencias empíricas, si bien más o menos controvertidas, de que la morfología del paisaje y los procesos de erosión fluvial podrían ser invariantes a los cambios de escala y, por tanto, fractales (Culling 1986; Turcotte 1992). Sin embargo, su estudio se enfrenta a graves problemas metodológicos (Goodchild 1980; Goodchild & Mark 1987; Mark & Aronson 1984). Probablemente, mientras algunos procesos pueden actuar sobre un amplio rango de escalas, por ejemplo las redes de drenaje (Tarboton *et al.* 1988), otros sólo deben operar sobre intervalos muy concretos, por ejemplo el modelado glaciar (Burrough 1985).

La evolución del paisaje está conducida por la erosión. La disección del modelado generada por las redes de drenaje es un clásico ejemplo de árbol fractal (Turcotte 1992). Si se proyecta el número de ríos de determinado orden o rango frente a su longitud media, se observa que su estadística es fractal, con una $D=1.83$ Turcotte 1992. Otra correlación fractal de las redes de drenaje se obtiene al representar la longitud del río principal de una cuenca frente al área que drena. Turcotte (1992), a partir de los datos de Hack (1957), obtiene que:

$$P=C.A^{D/2} \quad (1)$$

donde P es longitud del río principal, C una constante y A el área de la cuenca, siendo $D=1.22$.

En áreas tectónicamente activas, muchos paisajes juveniles apenas han sido retocados por la erosión. Sin embargo, con el tiempo esta última va ganando importancia. En el archipiélago volcánico hawaiano, las islas jóvenes consisten en edificios cónicos no fractales. Sin embargo, en las de mayor edad, en donde la erosión han actuado durante algunos millones de años, parece desarrollarse una morfología irregular invariante a los cambios de escala (Turcotte 1992).

La proporción de trabajo geomorfológico o de modificación del modelado que realizan los eventos de elevada magnitud y baja frecuencia frente a la atribuible a eventos frecuentes de baja magnitud (evento medio anual) es muy importante en paisajes áridos y semiáridos. En los segundos, la proporción de denudación producto de eventos extremos puede superar en un centenar de veces la realizada por los de tipo medio anual, mientras que en los primeros hasta más de 1000 veces (Benito *com. pers*).. Son también ambientes en donde las precipitaciones muestran una gran variabilidad estacional e interanual, siendo generalmente escasas pero torrenciales. Bajo estas condiciones, la curva de aforos de sedimentos relaciona la concentración de sedimento en suspensión y el caudal, según una ecuación del tipo:

$$y = aQ^b \quad (2)$$

donde y es la carga de sedimentos, Q es el caudal y a, b son constantes con valores que oscilan entre 2.0 y 3.0 (Leopold *et al.* 1964). Se trata de una ecuación potencial, y por lo tanto, al representar en coordenadas logarítmicas los datos de y frente a los de Q , por ejemplo, se obtiene una recta cuya pendiente sería igual a $1 - D$, siendo esta última la dimensión fractal. Nótese que la estructura de esta ecuación es idéntica a presentada en (1). En otras palabras, estos datos inducen a pensar que nos encontramos ante un proceso de tipo fractal. También la distribución magnitud-frecuencia de tormentas en

ambientes desérticos manifiesta síntomas de fractalidad (Mayer 1992).

Dado que ninguna teoría lineal puede producir una topografía autosimilar, Turcotte (1992) propone un modelo de evolución fractal de la erosión fluvial. Este autor postula que los rasgos erosivos son generados por las tormentas de mayor magnitud, y menor frecuencia. Mandelbrot (1983 y 1989) argumenta que las grandes descargas fluviales, también parecen ser fractales, como la ya mencionada distribución magnitud-frecuencia de los eventos precipitacionales (Lovejoy 1982; Lovejoy & Schertzer 1985). Por tanto, para Turcotte, si esto es así, la razón de las inundaciones medias mayores en 1.000 años respecto a las que acaecen en 100 años sería igual a la estimada para las de 100 frente a las de 10 años, etc. Conviene recordar aquí, que la deposición de las secuencias sedimentarias suele estar condicionada por las tormentas de mayor magnitud, y de acuerdo a algunos autores sus estratigrafías poseen rasgos fractales (p. ej. Plotnick 1986).

El problema estriba en el análisis estadístico de las series temporales de los datos de frecuencia-magnitud de las inundaciones y tormentas, ya que suelen restringirse a observaciones históricas de corta duración. Cuando éstas puedan asociarse rigurosamente a los registros de paleoinundaciones, se obtendrán series temporales lo suficientemente largas como para poder responder con seguridad a las evidencias presentadas.

Sin embargo, un mismo objeto o proceso puede estudiarse desde perspectivas muy diferentes y escalas distintas. Con toda seguridad, cuando se interroga a la naturaleza sobre las características de un determinado fenómeno, diversas perspectivas y/o escalas ofrecen resultados diferentes. Probablemente, los procesos de erosión puedan ser fractales solo desde ciertas ópticas. Preguntarse si la erosión es fractal es, con toda seguridad, una pseudopregunta: todo depende del que y del como se analice. Debe tenerse en cuenta que la erosión es un proceso complejo, multiescalar y polimórfico y no un fenómeno susceptible de cuantificación por una sola medida (Ibáñez *et al.* 1995).

Fractales y geoformas eólicas

Lamentablemente, en la literatura geomorfológica, se presentan muchos más ejemplos de la aplicación de fractales al modelado fluvial que al eólico. Este hecho no significa que, existan sólidas evidencias de fractalidad en los últimos. Muchas de estas pruebas pueden encontrarse en publicaciones anteriores a la popularización del análisis fractal. Como un ejemplo representativo permítasenos incluir el siguiente texto extraído de la introducción de un artículo de I. G. Wilson (1972):

"Surfaces of wind-laid sand deposits are almost invariably formed into a regularly repeated pattern of one size or another. These patterns are obviously similar to those formed under water termed bedforms (Allen 1968). The ubiquity of subaerial bedform in sand shows that they form whenever a wind blowing over sandy surface is strong enough to move sand. They also develop on loess (Rozycky 1967), in snow (Cornish 1914) and as erosional features in compact alluvium or even solid rock (Grove 1960; Clos-Arceduc 1966; Wilson 1971). A reasonable definition would be the following: A bedform is a regularly repeated pattern which forms on a solid surface because of the shearing action of a fluid..... Aeolian bedforms occur in many forms and sizes..... Usually ridges occur on different scales simultaneously, so that on the back of a large sand-ridges say 4 km apart and 200 m high there may be ones 200 m apart and 20 m high and on these ridges 30 cm apart and 1 cm height which bear even smaller structures 2 cm apart and 0.1 cm high"

Obviamente, Wilson está describiendo un modelado invariante a los cambios de escala y, en consecuencia, fractal. Más aún este autor, a la hora de analizar tales estructuras y sus procesos generadores, ilustra la mencionada publicación con numerosos gráficos en donde los valores de las variables se presentan logarítmicamente en las coordenadas cartesianas. En todos los casos, sus datos se ajustan correctamente a mediante una

línea recta, señalando la presencia de leyes potenciales subyacentes. Como ya mentamos, estas son las principales huellas que inducen a pensar en fractalidades subyacentes.

Los fractales y el problema de la transferencia de información obtenida a diferentes escalas

Como ya hemos comentado en apartados anteriores, diversas estructuras y procesos naturales han demostrado ser invariantes a los cambios de escala, al menos entre determinados órdenes de magnitud y desde ciertos puntos de vista. De aquí se infiere que los mecanismos subyacentes estudiados podrían ser los mismos entre los rangos de resolución donde se constata la invarianza (Sugihara & May 1990). En este sentido cabe preguntarse si deberíamos ir a la búsqueda de estructuras fractales con vistas a su posible utilización como portadoras de información escalar frente a aproximaciones más convencionales que emplean unidades que no lo son. Según Ibáñez *et al.* (1995) la transferencia de información desde escalas detalladas a otras de menor resolución podría ser conseguida, con relativa facilidad, haciendo uso de unidades ambientales de naturaleza fractal, que canalicen los flujos de energía y materia (p. ej. redes de drenaje en todos aquellos ambientes en donde la geomorfología fluvial modela el paisaje). Lo mismo ocurre cuando se analizan las relaciones biodiversidad-área, ya que siguen leyes potenciales. Hastings y Sugihara (1993) analizan la posible fractalidad de este último tópico. Si se demuestra la universalidad de estas relaciones fractales, al menos entre determinados órdenes de magnitud, bastaría conocer la biodiversidad (edafodiversidad, etc.) a una escala para inferirla en las restantes del dominio de aplicabilidad (Ibáñez *et al.* 1997). La ecuación que relaciona la diversidad con el área es de naturaleza potencial, y por lo tanto su estructura es equivalente a las presentadas en (1) y (2)

$$S = CA^z \quad (3)$$

donde S es el número de taxa o unidades tipológicas (se sean biotaxa, edafotaxa, etc.), C y z constantes e A las dimensiones de del área estudiada.

Descripción de procesos geomorfológicos, hidrológicos y edáficos

El Dr. Marcelo Zárate ha proporcionado muy interesantes datos cronológicos que permiten realizar una reconstrucción de la formación de suelos vinculada a episodios climáticos en un área que podríamos calificar de “estable” dentro de la provincia de Buenos Aires.

Mi propósito es mostrar un área sensiblemente más activa, entendiendo por ello a que los procesos eólicos responsables de su paisaje, se han producido hasta épocas históricas recientes y han determinado profundas modificaciones, aun en campos ya utilizados por el hombre para la explotación agrícola. El particular paisaje de esta subregión, tiene una influencia decisiva en la distribución y circulación de las aguas superficiales, en una época que abarca los últimos veinte años, en que el aumento de la pluviosidad ha producido devastadoras inundaciones y modificaciones en las características agronómicas de los suelos. Se trata de un ejemplo que constata que, en ambientes generalmente considerados semiáridos, un cambio ambiental, caracterizado por un incremento de las precipitaciones, puede conducir a una degradación de la aptitud agropastoral de los suelos (claro contraejemplo de la desertificación). Más aún, cuando una determinada ciclicidad de los regímenes de humedad y temperatura de los suelos abarca decenas de años ¿qué sentido, genético o agronómico, tiene incluir tales criterios en una taxonomía de suelos? (p. ej. USDA Soil Taxonomy). En ambientes semiáridos (y

en otros como ciertos subtipos mediterráneos) proclives a la alternancia de periodos de sequías e inundaciones, la caracterización de tales regímenes variará, según la serie temporal de los datos de estaciones escogidas para su determinación. Como corolario, también podría modificarse la clasificación de determinados suelos, incluso a nivel de suborden. Más aún tiene relevancia incorporar este tipo de criterios a los paisajes de naturaleza policíclica, los cuales abarcan la mayor parte del globo. **(especificar infiriendo de informaciones paleoclimáticas y de los datos de las estaciones meteorológicas de los años 60 y 90 los regímenes de humedad y temperatura según épocas: ¿usticos y arídicos y ciclos).**

Las formas del relieve, de muy clara visualización en imágenes satelitales, eran imposibles de detectar en trabajos de campo y es por ello que, observaciones puntuales de perfiles que mostraban superposición de capas de granulometría diferente, podía llevar a errores respecto a la extensión lateral de las capas y la estimación de las edades de deposición.

La Pampa Arenosa muestra características muy especiales en lo que respecta a sus geoformas actuales, las cuales revelan que en el pasado fue un verdadero "mar de arenas" (Groeber, 1936), con intensa acción del viento, es decir construido mediante morfogénesis eólica. En la actualidad se halla prácticamente estabilizada en virtud de apropiadas condiciones de humedad que posibilitaron el desarrollo de abundante vegetación. Por lo tanto, actualmente, como mínimo, podría hablarse de una dinámica geomorfológica mixta "eólica-acuosa", que posiblemente emule otra de mayor magnitud entre los periodos glaciares e interglaciares. Puede decirse que esta Subregión es un desierto "maquillado" de pradera.

Como ya mentamos con anterioridad, ejemplos actuales de campos de arena de dimensiones regionales, como el de Arabia, muestran geoformas similares, pero activas, sin cobertura vegetal, dada la extrema aridez de sus climas actuales. Sin embargo, en el pasado (pleistoceno reciente e incluso durante el Holoceno), bastas regiones del Sahara disfrutaron de climas más benignos (mediterráneos hacia el norte, subtropicales hacia el sur), albergando bosques y sabanas (Tallis, 1991), en acusado contraste con lo que acaece hoy en la Pampa Arenosa, debido a forzamientos climáticos regionales diacrónicos. ¿Podría existir algún tipo de teleconexiones como las actualmente se reconocen en el fenómeno ENSO (El Niño)? En cualquier caso, una adecuada reconstrucción de los paisajes pampeanos requeriría reconocer, con la mayor exactitud posible, "sus" paleoclimas, y más exactamente, la duración aproximada de unos ciclos climáticos que varían en órdenes de magnitud, anidándose unos en otros (comenzando por los de mayor amplitud y menor frecuencia, es decir los glaciares-interglaciares).

La región se caracteriza por una pendiente regional escasísima, de 0,08 a 0,2 m/km. El suelo y subsuelo, de textura gruesa, descansan sobre un sustrato poco permeable profundo (entre 8 y 10 m) (**¿de que tipo?**) que constituye la base de la capa freática, por lo cual los anegamientos son posibles tras una sucesión de años de excedentes hídricos que agotan la capacidad de almacenamiento del suelo y subsuelo, y la capa alcanza niveles cercanos a la superficie. Localmente se verifican pendientes superiores, del orden del 1-2% que vinculan las lomas medianosas con las cubetas de deflación, siendo éste uno de los principales rasgos del drenaje regional. Este último puede condicionar la redistribución de materiales y la tipología de los suelos a nivel local.

Para realizar un seguimiento de las aguas superficiales resulta sumamente interesante la comparación entra las fotocartas a escala 1:50.000, confeccionadas con fotografías aéreas de la década del 60 y las imágenes satelitales actuales. En aquellas, que fueron obtenidas en época de sequía, no resulta posible distinguir con claridad las formas del paisaje de gran escala. Por el contrario, en las últimas, registradas en épocas

más húmedas y con distinto grado de anegamiento, si permiten reconstruir con gran precisión tanto las geoformas regionales como las de menores dimensiones. Así es que, a partir de la disponibilidad de esta tecnología, los científicos pudieron dilucidar algunos aspectos vinculados con la geomorfología, que eran poco visibles para un observador ubicado en el terreno y aún para el que dispusiera de fotografías aéreas.

En función de las geoformas predominantes resulta posible realizar subdivisiones dentro de la Pampa Arenosa. Cada una de estas delimitaciones aún conservando las características esenciales de la subregión en general, posee particularidades específicas que le otorgan un funcionamiento propio en la circulación de las aguas y en la formación de sus suelos.

1. Las planicies altas extendidas (Sector Salliqueló-Rivadavia)

Se trata del área de ingreso de los sedimentos arenosos provenientes del sudoeste a la provincia de Buenos Aires. El espesor de los sedimentos alcanza hasta más de 10 metros de profundidad y el relieve superficial consiste, esencialmente, de planos altos con algunas formaciones medanosas sin distribución geométrica regular. Constituye un sector altamente vulnerables a la remoción eólica aunque en la actualidad, debido a la influencia de un ciclo húmedo, se caracteriza por suelos (**especificar pedotaxa**) capaces de mantener una alta capacidad productiva, solamente limitados por estructura débil, escaso contenido de materia orgánica superficial y excesiva permeabilidad. Si bien las condiciones de humedad actualmente hacen que la región tenga aptitud agrícola, es suficiente un breve lapso de sequía para que el riesgo de erosión eólica vuelva a ser dominante. Bajo esta alternancia ambiental, cualquier intento de caracterizar la aptitud de los suelos (y más aun cuando se elaboran cartografías), debe incorporar, ineludiblemente, su variabilidad temporal sopena, si se desea que mantengan su aplicabilidad por un periodo de tiempo razonable.

2. Trenes de dunas longitudinales (Sector Trenque Láuquen-Pehuajó-C. Tejedor-9 de Julio)

Se trata de modelados eólicos "construccionales" que alcanzan las mayores dimensiones de la región. Constituyen un sistema de lomas estrechas y alargadas separadas entre sí por depresiones paralelas. En conjunto estas geoformas se orientan de SO a NE en la parte sur, y rotan hacia el NO en la norte, formando un gran arco de concavidad hacia el oeste (Figura 1:proporcionada por E. Malagnino). El conjunto de estas lomas y depresiones tienen, en su sector más extenso, un ancho de 200 km. Las crestas de las dunas, que alcanzan hasta 100 Km de longitud, están separadas entre sí por 2.500 m y son aplanadas en su parte superior. Los senos entre las crestas tienen longitudes equivalentes a las mismas, su ancho oscila entre 500 y 2000 m y su fondo plano es ocupado por lagunas que en épocas de inundación cubren la totalidad de la depresión.

La génesis de los trenes de dunas longitudinales tiene varias interpretaciones. Según Eriondo (1995) su edificación está vinculada a un anticiclón ubicado a varios centenares de kilómetros al oeste de las formaciones estudiadas, el cual generó vientos continuos con direcciones constantes en una época de seca, de escasa cobertura vegetal, actuando sobre sedimentos de una textura propicia. Por el contraio, Malagnino (1991) sostiene que han sido formadas forzamientos climáticos que generaron vientos bidireccionales, durante el Pleistoceno. En cualquier caso, como indicamos en un principio, es de destacar, como mínimo, la notable similitud de estas estructuras con los mentados campos de dunas de Arabia y sobretodo con los de Marte e incluso los megaripples generados por ciertas inundaciones catastróficas fini-pleistocenas.

Este sistema de geoformas impide el drenaje de las aguas en sentido O-E ya que las dunas constituyen verdaderos diques que las embalsan. Por otra parte, también existe dificultad de circulación dentro de los senos alargados hacia el NE, siguiendo la muy exigua pendiente, debido a la superposición de médanos parabólicos (Figura 2: proporcionada por E. Malagnino).

Los suelos de las partes altas de las dunas longitudinales tienen solo una ligera diferenciación de horizontes (**especificar pedotaxa; ¿escasa diferenciación por migración de materiales hacia los fondos?**). Se trata esencialmente de suelos de aptitud agrícola-ganadera. En los bajos interdunas, dada la mayor cantidad de agua, se han desarrollado suelos con horizontes subsuperficiales más arcillosos (**migración diferencial de materia coloidal, es decir arcillas?**), a veces alcalinos (**si el substrato era muy pobre en sales, podría diversarse al uso de fertilizantes y posterior migración hacia la superficie por evaporación?**), con baja permeabilidad y capacidad de uso fundamentalmente ganadero (**especificar pedotaxa**).

3. *Camos medanosos anidados de media luna (Sector Carlos Pellegrini-Bolívar -25 de Mayo)*

Se trata también de geoformas “construccionales”, originadas por la acción del viento sobre el sustrato arenoso de las dunas. La generación de movimientos eólicos de tipo remolino (**¿actuales, generados en épocas secas como las de los años 60, Pleistocenas?; ¿se habrían generado bajo condiciones climáticas distintas a las actuales y a las épocas de construcción de los trenes de dunas?**) explica el socavamiento de pequeñas cubetas en cuyo borde NE se acumula el material extraído de la misma, constituyendo un montículo irregular arenoso. Paulatinamente, y a partir del mismo, se generan dos brazos o colas con relieve más atenuado, que bordean ambos lados de la cubeta. De esta manera los médanos adquieren la forma de U o media luna, con sus dos colas apuntando a barlovento (SO) Tales estructuras son posteriores a las dunas longitudinales, superponiéndose a ellas en la parte S y complicando aún más la circulación del agua en los senos interduna. (**si he entendido bien, el que las colas apunten al SO debería indicar que los vientos que las generan o generaron van en sentido inverso al de los vientos que crearon los trenes de dunas longitudinales. ¿Es así?**), Médanos de esta naturaleza se encadenan unos con otros dando lugar a un paisaje muy particular que domina la totalidad del partido de Henderson y gran parte de Bolívar y Daireaux, siendo menos manifiesto en los partidos de Pellegrini y Sur de Trenque Lauquen (Figura 3).

Para un observador ubicado en el terreno resultaría difícil reconstruir la forma y diseño de estos médanos, puesto que a la forma general (hasta 8 Km) de medialuna o herradura se yuxtaponen, a menudo, otras secundarias de morfología similar aunque más pequeñas. En otras palabras, podría darse un arreglo fractálico, que incrementara la complejidad de la arquitectura regional. Sólo mediante fotografías aéreas o con observaciones áreas desde unos 500 m es posible distinguir con claridad estos rasgos paisajísticos.

Tales estructuras generan una singular distribución de los excedentes de las aguas pluviales (especialmente en épocas húmedas como la actual), que quedan entrampadas en las cubetas ubicadas en la parte cóncava de la medialuna, con muy pocas posibilidades de intercomunicación con cubetas aledañas y ser evacuadas por la muy escasa pendiente de la región (Figuras 4 y 5). La suma de las depresiones alberga los excedentes hídricos regionales, cuya eliminación sólo es posible por el movimiento vertical de evaporación, dado que la percolación hacia la profundidad queda severamente limitada por la presencia de la capa freática, muy cercana a la superficie (**¿existiría en**

esta fase húmeda, o en anteriores un régimen ácuico que contrastaría con otro ústico o arídico de los periodos secos recientes o los presuntamente arídicos de las fases construccionales del Pleistoceno?).

Existen variaciones en los perfiles de suelo, desde aquellos sin ningún tipo de diferenciación de horizontes, ubicados en las partes medanosas (**¿arenosoles?; explicitar pedotaxa presentes; ¿se encuencan poco diferenciados por erosión hacia las cubetas o por un más o menos constante o cíclico aporte eólico de arenas, a nivel regional, a nivel local, ¿cuáles son las causas?**), hasta los que presentan horizontes muy contrastados, en las cubetas o sus adyacencias (**explicitar pedotaxa presentes y si el contenido de arcilla es por movilización local de arcillas de las partes medanosas**). Las partes planas relativamente altas tienen perfiles en los que se insinúan horizontes B (**¿qué pedotaxa aparecen?**). Estas partes más planas, donde la densidad de formas medanosas es menor, constituyen la superficie agrícola de la región, la cual es anegable en períodos de precipitaciones excesivas como la actual.

Comparando las áreas en que dominan los médanos parabólicos con aquellas con que aparecen las dunas longitudinales cabe destacar el hecho de que en los casos de inundaciones extremas que cubren casi la totalidad del área, se ve más perjudicada la región de los médanos parabólicos, dado que los únicos suelos emergidos son precisamente los médanos, muy poco estabilizados, solo aptos para pastos naturales, en tanto en que la región de las dunas longitudinales emerge las partes altas de las mismas, que son más antiguas, más estabilizadas y de aptitud agrícola.

Metodologías aplicables para el análisis de la arquitectura del paisaje y su representación cartográfica. El papel de la geometría fractal y las CC. del Caos

Tanto desde el punto de vista científico puro, como desde el vinculado a paliar el deterioro del recurso suelo, la utilización de imágenes remotas constituye una herramienta esencial que permite reconstruir la historia geomorfológica de la comarca y diseñar estrategias de intervención ante fenómenos de excesos hídricos y/o lapsos de extrema sequía. Recientes trabajos en elaboración muestran que las imágenes de radar pueden mostrar con claridad el diseño de pequeñas firmas con patrón regular en sectores más estables, que no han sido detectadas por las imágenes Landsat. Aparentemente estas formas que tienen “parentesco” con el diseño anteriormente descrito, pueden ser seguidas en el campo y muestran sensibles diferencias en su aptitud agrícola. Seguramente este es un vasto campo de investigación que comienza a mostrarse como muy promisorio.

Sin embargo la tecnología, por si sola, nunca puede ser sustitutiva de nuevas aproximaciones conceptuales y metodológicas. Frecuente y sorprendentemente, los investigadores contemporáneos, con vistas al avance de las disciplinas que practican, depositamos más confianza en los avances tecnológicos que en la potencialidad heurística de hipótesis audaces. Esta percepción de progreso científico no es avalada por la historia de las ciencias (Ibáñez et al. 1995; Mayr 1998). En cualquier caso, ¿qué pueden aportar las matemáticas fractales y las CC. del Caos al presente caso de estudio?. Con vistas a intentar responder a esta pregunta nos centraremos en la subregión 3 de la Pampa Arenosa, es decir, en el espacio geográfico caracterizado por la reiterada, densa y frecuente superposición de médanos parabólicos sobre los campos de dunas longitudinales.

Como ya señaló, en el área seleccionada parece existir un anidamiento de médanos parabólicos de dimensiones muy contrastadas. ¿Cómo saber si se ajustan a una distribución fractal?. Con vistas a contestar a esta pregunta, y utilizando el criterio de la Navaja de Occan, atacaremos el problema por la vía más directa y sencilla (que no

siempre resulta ser la mejor, también hay que decirlo). Se trata de averiguar si existe un arreglo fractal en la distribución tamaño-frecuencia (abundancia) del número de formas medanosas. En cualquier caso, si la aproximación que seguidamente presentamos no dilucida sobre la posible fractalidad del anidamiento de médanos parabólicos, podrían aplicarse otros procedimientos más sofisticados y precisos, tales como las potentes técnicas de análisis multifractal. Estos últimos no serán detallados aquí en vista de su mayor complejidad matemática. Por otro lado, la teledetección, y más concretamente las imágenes de radar, serían de suma utilidad. Sin embargo, esta información debería ser implimentada con imágenes aéreas de mayor resolución, si se da el caso de que las estructuras medanosas de menores dimensiones no pueden ser detectadas por los mencionados sensores remotos.

En cualquier caso, una vez contabilizado el número y tamaño de dichos modelados, el paso a seguir es analizar a que modelo de distribución se ajustan. Como ya mentamos, para que estas geofomas puedan considerarse fractales deben ajustarse debidamente a una distribución potencial. Por tanto, el número de médanos debe incrementarse al disminuir su tamaño, según una determinada potencia. En términos matemáticos esto equivale a decir que:

$$Y = aX^z \quad (4)$$

O también

$$\log Y = a - z \log X \quad (5)$$

en donde Y (variable dependiente) sería el número de médanos de un determinado tamaño o rango de tamaños, X (variable independiente) el susodicho tamaño, mientras que a es una constante y z es otra constante, pero en este último caso en forma de potencia. La distribución sería fractal, si y solo si, z fuera "estadísticamente" constante, al menos a lo largo de tres órdenes de magnitud. En tal caso z sería una función de D (nomenclatura que suele asignarse para hablar de la dimensión fractal), como observaremos más adelante. Esto se traduciría en que, al dibujar los datos en papel logarítmico, en donde el número de estructuras se enfrenta al de sus áreas, los iconos resultantes se ajustarían a una línea recta. Sin embargo, esta aproximación, muy útil en el caso de que Y lo constituyan objetos manifiestamente distintos, como el número de taxa de la mencionada relación especies-área, no está exenta de ciertos problemas, a la hora de asignar cada médano a un rango o clase determinado, especialmente cuando existe un gradiente continuo de tamaños; es decir, cuando no existen discontinuidades de dimensión entre las geofomas estudiadas. Sería distinto si, como en el estudio abordado por Wilson (1972), los modelados eólicos se pudieran subdividir sin incertidumbre en clases muy contrastadas (por la presencia de discontinuidades claras y precisas) que varían en órdenes de magnitud (p ej. ± 8.000 m, ± 800 m, ± 80 m, ± 8 m, etc.). Por lo tanto, de no existir tales discontinuidades, podría ser recomendable analizar el problema mediante una función de distribución acumulativa del tipo:

$$N = C/r^D \quad (6)$$

siendo N el número de objetos (médanos) de dimensiones mayores de un determinado tamaño r , C una constante, mientras la potencia D sería la dimensión fractal. Otra formalismo equivalente sería:

$$Nr(A > a) = F' a^{-B} \quad (7)$$

siendo N_r ($A > a$) el número de geoformas mayores de tamaño mayor que a , F' y B dos constantes que según Mandelbrot (1983) pueden denominarse prefactor y exponente, respectivamente. Este autor apunta como B puede variar (al menos en el caso de las islas) de una región a otra y es siempre mayor que 0.5. También en este último caso, según Hastings y Sugihara (1993), de su análisis planimétrico (un mapa, por ejemplo) se desprende la siguiente relación entre B y la dimensión fractal D :

$$B = 0.5D \quad (0 \leq B \leq 1) \quad (8)$$

o también generalizando para cualquier espacio euclideo n -dimensional:

$$B = (1/n)D \quad ((0 \leq B \leq 1)) \quad (9)$$

Esta formulación, es conocida como Ley de Korcak, ya que este autor demostró empíricamente, ya en 1938, su validez al analizar la distribución número-tamaño, de las Islas del Egeo (si bien Mandelbrot critica algunos de las aseveraciones de Korcak, como $B = 0.5$). Sin embargo, también ha demostrado cumplirse en otros muchos casos. Uno de ellos es el de la distribución de fragmentos rocosos por sus dimensiones (p. ej. Turcotte, 1992).

De cumplirse que el tamaño-número de los médanos presente un patrón fractal, podríamos valorar la extensión ocupada por estos, así como el de otros rasgos relacionados, tales como la fragmentación potencial de los excedentes hídricos encharcados, o la extensión total y el patrón de distribución areal del tipo de suelos asociados a estas geoformas. Otra cuestión sería analizar el volumen de agua almacenada en superficie. Para ello, deberíamos saber si existe algún tipo de relación entre extensión de los médanos y sus correspondiente profundidad de socavamiento, es decir, entre el área y el volumen de la geoforma. En el caso de que esta existiera, o de que las láminas de agua fueran más o menos constantes, con independencia de la dimensiones de las estructuras que las albergan, una pregunta de estas características tendría fácil respuesta. En cualquier caso, existen otras relaciones afines que también pueden ser de interés para el caso que nos ocupa. Una de ellas, de la que existe abundante información bibliográfica, es si la relación área-perímetro de un objeto (en nuestro caso los médanos), también posee una estructura fractal. Para el susodicho caso de las islas, Hastings y Sugihara entre otros, proponen la siguiente ecuación potencial:

$$P = CA^E \quad (10)$$

en donde p es el perímetro de cada isla, C una constante, A el Area y $E = 0.5D$, siendo esta última la dimensión fractal.

No cabe la menor duda de que las matemáticas fractales nos ofrecen una idea de los patrones de distribución de los elementos del paisaje que cumplen sus leyes. Así mismo, pueden ser de gran utilidad para extraer información cuantitativa relevante de sus cartografías, maximizando la información que actualmente se obtiene de estas.

Aportaciones al análisis de la arquitectura de los paisajes geomorfoedáficos

La filosofía subyacente a los reconocimientos de suelos convencionales impide, en buena medida, un análisis riguroso de la arquitectura de los paisajes de suelos. La orientación agronómico-utilitarista de estos productos es la causa principal de este conflicto. Tal aseveración no pretende ser una crítica a los procedimientos al uso, sino

una constatación de una realidad incuestionable. La búsqueda de representaciones (unidades de mapeo) adecuadas para visualizar la vocación agrosilvopastoral del suelo, el hecho de que estas intenten ser lo más homogéneas que se pueda, de eludir en la medida de lo posible los polígonos de menor tamaño, así como la propia naturaleza de los sistemas de clasificación más reconocidos (claves de la FAO y Soil Taxonomy), que tienden a discriminar sus categorías en base a rasgos y variables de interés para el desarrollo de las plantas, son algunas de las muchas pruebas irrefutables que corroboran nuestras tesis. No es el momento ni el lugar para abordar estos temas, por cuanto escapan a los objetivos del presente ensayo. Tan solo señalar que, en los países industrializados, más interesados actualmente en la protección de su ambiente que en la maximización de sus producciones agrarias, se ha atacado con dureza la inadecuación de los productos tradicionales con vistas a resolver la demanda actual de información edafológica (p. ej. Zinck 1990; Gardner 1991 & 1993; Miller 1993; Bryant et al. 1994; Ibañez et al. 1993 y 1999; Le Bas & Jamagne 1996 y Basher 1997). No debe por tanto extrañar que el reconocimiento de suelos se considere una disciplina en recesión (p.ej. Gardner 1993; Basher, 1997 e Ibañez et al. 1994b y 1999).

Sin embargo, permítasenos especular un poco más aún e intentar reconstruir de forma "virtual" la arquitectura de los paisajes de suelos de la Pampa Arenosa a la luz de la información metodológica previamente mostrada. No trataremos de reconstruir la realidad sino más bien, partiendo de ciertas hipótesis (por supuesto muy cuestionables), elaborar un experimento mental que muestre la potencialidad heurística de aquellas. Las hipótesis a que nos referimos podrían resumirse en los siguientes puntos.

- Que la distribución fractal de los médanos en herradura es un hecho
- Que existe un determinismo fuerte entre geoformas y suelos
- Que la construcción del paisaje de trenes de dunas paralelas borró cualquier rastro superficial de geomorfos más antiguas, independientemente de su edad, origen y génesis
- Que partimos de un profundo conocimiento de la información geomorfológica, edáfica, sedimentaria, hidrológica y paleoambiental del territorio estudiado

Partiendo de la hipotética veracidad de estas premisas podemos, paso a paso, inferencia a inferencia, desarrollar el siguiente modelo deductivo.

La distribución fractal de los médanos se puede traducir en otra similar de sus cuerpos o individuos de suelo representativos, o de sus paisajes de suelos, cuando concurren varios edafotaxa simultáneamente. Ello equivale a decir que estos últimos no poseen un rango de dimensiones características, sino que por el contrario varían en órdenes de magnitud en un mismo paisaje e incluso bajo la misma intensidad de sus factores formadores. Se trataría de una afirmación muy relevante para el avance de la teoría edafológica, por cuanto es un tema muy debatido pero no resuelto (para este debate recomendamos la lectura de la recopilación de Finkl Jnr. 1982). Del mismo modo, podríamos determinar con exactitud la distribución de tamaños de los cuerpos (y/o asociaciones de suelos de un determinado espacio geográfica, su extensión media, tamaño modal, etc. En cualquier caso, aunque se tratara de un modelo de distribución no potencial, esta perspectiva también nos proporcionaría una nueva visión de los patrones edafológicos, pudiendo, adicionalmente, determinar los últimos estadísticos mencionados, así como extraer valiosas informaciones sobre la heterogeneidad espacial y dimensiones de los cuerpos de suelo. Actualmente, toda esta información no puede ser analizada, debido a los procedimientos cartográficos al uso.

Del mismo modo, si todos los paisajes y/o cuerpos de suelo de un determinado territorio fueran objetos fractales, se podrían elaborar sistemas de representación cartográfica que, ineludiblemente, darían lugar a imágenes estadísticamente semejantes

para todos aquellos mapas elaborados en el rango de escalas pertinentes (entre aquellos en los que se detectara previamente su autosemejanza), y que como mínimo deberían abarcar tres órdenes de magnitud (p. ej. 1:1.000, 1:10.000 y 1:100.000). De ser el caso, y en ausencia de información adicional (ciudades, carreteras, etc.), sería imposible distinguir que mapa corresponde inequívocamente a una escala determinada. Esta aseveración es una de las principales e inmediatas consecuencias de la fractalidad de un objeto. Se trata de un hecho difícil de imaginar, aunque no imposible teóricamente, debido a la improbabilidad de que todas las informaciones contenidas en una cartografía de geoformas (o de otro recurso natural) sean fractales, y más aún entre los mismos rangos de resolución.

De cumplirse que determinadas geomorfias, cuerpos y/o paisajes de suelo se ajustaran a distribuciones fractales, su distribución, independientemente de los tamaños, tendería a ser isotrópicas en el área estudiada. Es decir tenderían a repartirse aleatoriamente. En otras palabras, no se darían agrupaciones en direcciones preferenciales (anisotropía). Estudios realizados sobre los patrones espaciales vegetación-suelos desnudos, o en términos edafológicos islas de fertilidad-calveros son testimonio de este rasgo distintivo (p. ej. Ibáñez et al. 1997). Se trata de los conocidos paisajes de "vegetación dispersa" característicos de los ambientes áridos y semiáridos, subtropicales y mediterráneos, sobre planicies de nula o escasa pendiente. Cuando esta última sobrepasa un determinado umbral de inclinación, tal patrón cambia abruptamente dando lugar a estructuras más regulares y anisotrópicas (p. ej. Ibáñez et al. 1997). Aunque los autores no tienen noticia de la existencia de la aplicación de modelos fractales a este tipo de paisajes, es muy probable que estos constataran la presencia de cuerpos de suelo con distribución fractal, por cuanto son bien conocidas las diferencias de diversas propiedades de los suelos (y microtopografía) bajos este tipo de vegetación y sus calveros colindantes.

Si pretendemos determinar posibles ciclicidades y tendencias de las estructuras paisajísticas analizadas, es también recomendable hacer uso de los denominados análisis de autocorrelación espacial (equivalentes a los conocidos análisis de series temporales) o de herramientas geoestadísticas. Mediante ellas se pueden determinar, por ejemplo, patrones areales que manifiestan cierta reiteración (p. ej. en los trenes de dunas paralelos), incluso si esta es anidada. De este modo pueden cuantificarse sus longitudes de honda, etc. La geoestadística también permite este tipo de discriminaciones. Más aún, independientemente de sus múltiples potencialidades, es posible determinar la dimensión fractal (no la fractalidad en si) de ciertas propiedades, a partir de sus respectivos (semi)variogramas.

No cabe la menor duda que el tipo de representación cartográfica a que daría lugar una exposición visual de estas características (muy fragmentada y en la que abundarían polígonos de exiguas dimensiones), no cumpliría algunos de los requisitos deseados por diversos usuarios de información edafológica. Sin embargo, sin pretender que estos sean, *a priori*, sustitutivos de los convencionales, también hay que reconocerles ciertas ventajas. Así, por ejemplo, una cartografía de esta naturaleza permitiría conocer con mayor exactitud la distribución de los cuerpos de suelo, así como sus tamaños. Citaremos tan solo un ejemplo. Cuando una determinada gestión de los usos del suelo requiriera intervenir sobre un porcentaje concreto de la superficie de un determinado cuerpo o paisaje de suelo, y no en toda su extensión, con vistas a maximizar la inversión financiera disponible, sería mucho más valiosa una cartografía como la descrita. Con este tipo de documentos podría detectarse sin dificultad el umbral de corte requerido en la curva de distribución tamaño-frecuencia, y el número y lugar de los sitios a intervenir, comenzando siempre por los de mayor tamaño (y como corolario de viajes, dietas, etc.), para cumplir el

propósito deseado.

Lamentablemente, existen en la literatura edafológica (p. ej. Fridland 1976; Hole y Campbell 1985; Ibáñez et al. 1987; Saldaña 1997) y ecológica (p. ej. Forman 1985; Forman y Godron 1986; Krummel et al. 1987; Turner 1990; Turner y Gardner 1991) propuestas metodológicas para la descripción de la arquitectura del paisaje que han despertado muy escaso interés en la comunidad internacional de edafólogos, pero que serían muy útiles con vistas a enriquecer la perspectiva que aquí presentamos. Por motivos de extensión nos detendremos en ellas.

Aportaciones para una reconstrucción paleoambiental tras el último ciclo de sedimentación eólica

Una vez construida las geoformas de los trenes de dunas paralelos, debemos suponer que se inició un nuevo ciclo edafogenético que borro de la superficie del área estudiada las geoformas y suelos anteriores. Teniendo en cuenta la hipótesis del determinismo geomórfico de los paisajes y cuerpos de suelos, la arquitectura de su edafosfera debió asemejarse a una piel de cebra con alternancia de los edafotaxa representativos de las crestas y valladas. Debe tenerse en cuenta que, los procesos edafogenéticos deberían ser diferentes en ambas posiciones e irían paulatinamente con el tiempo haciendo divergir los rasgos de los cuerpos de suelos de ambas posiciones topográficas. Las técnicas de autocorrelación espacial previamente mencionadas permitirían extraer ciertos estadísticos que determinarían con rigor los rasgos cuantitativos del paisaje (p. ej. tamaños y geometrías de los paisajes y cuerpos de suelo, longitudes de honda características del diseño, etc.). Suponemos aquí, verosimilmente, que: (i) o que no existe un anidamiento de los megarriples, o que en caso contrario, que este no ha tenido repercusiones edafogénicas y, (ii) que de haberse producido, *a posteriori*, aportaciones de nuevos materiales eólicos por episodios paleoclimáticos cíclicos de menor magnitud y mayor frecuencia, no habrían sido lo suficientemente intensos para alterar sustancialmente la estructura del paisaje descrita, o iniciar un nuevo ciclo edafogenético por enterramiento de las paleoformas y suelos, ya que de no ser así, llegaríamos a un contrasentido lógico. Otra cuestión bien distinta es que tales inputs de materiales se hayan producido a unas tasas que han dado lugar a suelos acumulativos del tipo de los descritos por Nikiforoff (1949), o tal vez, temporalmente, a las rutas regresivas de edafogénesis propuestas por Johnson y Watson-Stegner (1987), y siempre efectuando a la totalidad del paisaje estudiado. En cualquier caso, los cambios climáticos anidados son la regla más que la excepción, y son característicos de la naturaleza caótica (con frecuentes diversos tipos de rasgos fractales) de la atmósfera terrestre (Lorenz 1995).

Ya que posteriormente volveremos sobre las repercusiones de las ciclicidades y los cambios climáticos, permítasenos plasmar unos breves comentarios sobre este tópico.

El *sistema climático* es el resultado de la interacción de sus cinco principales subsistemas: atmósfera, hidrosfera, biosfera, litosfera y criosfera. La modulación del clima se encuentra regida tanto por factores solares como geológicos. El sistema climático se encuentra en continua evolución desde el origen de la Tierra. En otras palabras, la composición química de la atmósfera y los patrones de circulación atmosférica han cambiado con el tiempo y lo seguirán haciendo en el futuro, con o sin la ayuda del Hombre. En todo caso cabe diferenciar entre tendencias unidireccionales, procesos más o menos cíclicos y eventos en apariencia aleatoria debidos a factores internos o externos al propio sistema (p. ej., influencia de la actividad solar) (p. ej. Ibáñez y Balairón, 1995).

El clima varía de manera natural sobre diferentes escalas temporales (entre 10^9 años y horas) y espaciales (desde 10^5 a menos de 1 km^2). Una buena parte de esta

variabilidad obedece a periodicidades de diferente magnitud y frecuencia. Así, a lo largo de la historia de la Tierra se han dado épocas de invernadero (sin glaciaciones) y épocas glaciares, con una posible periodicidad de 10^8 años. Esta ciclicidad parece encontrarse gobernada principalmente por la dinámica de la tectónica de placas, pudiendo influir también variaciones solares y orbitales. Las épocas glaciares (como la actual) pueden dividirse en periodos interglaciares y glaciares, con una ciclicidad media de 1×10^5 años. El tránsito entre los primeros y los últimos parece estar controlado por variaciones de algunos parámetros orbitales (*Oscilaciones de Milankovitch*). Así mismo, cada periodo glacial e interglacial se encuentra salpicado por *crisis climáticas* de distinto origen y periodicidad (entre 10^4 y unos pocos años). (p. ej. Ibañez y Balairón, 1995)

La complejidad de los posibles mecanismos que gobiernan el clima puede ilustrarse contemplando tan solo lo que se conoce o presupone sobre las repercusiones periódicas de la actividad solar, por no hablar de otros muchas. Así, por ejemplo, se ha postulado que el clima puede verse afectado por ciclos solares de 25 a 28 días, 11, 22, 80, 178, y 400 años. Según algunos autores estos ciclos pueden estar incluidos en otros de mayor duración y menor frecuencia. Como puede observarse, no parece haber límite para el número de periodos que los investigadores dicen haber descubierto. Sin embargo, actualmente nadie duda que la variabilidad meteorológica no es intrínsecamente periódica ni unidireccional. Si se toma una serie temporal larga de una determinada variable meteorológica y sustraemos todos los componentes periódicos propuestos, el residuo de variabilidad resulta ser una señal fuertemente irregular (Lorenz, 1995).

Retornemos de nuevo a la descripción de la génesis de la Pampa Arenosa durante el Holoceno. Tras la constitución de la trama principal, en base a los trenes de megarripleas paralelos, caben dos posibilidades:

- Que se iniciara una fase de estasis (estabilidad) climática, geomorfológica y edáfica que diera lugar a una paulatina superposición de los médanos parabólicos y sus suelos asociados, o bien que:
- En un momento dado se produjera un(os) nuevo(s) pulso(s) climático(s) de menor magnitud (y en el caso de fueran varios también de mayor frecuencia) que constituyeran la fuerza generatriz para la construcción de los médanos parabólicos.

Obviamente podrían adquirirse evidencias de la sincronía o asincronía en la construcción de estas geoformas menores, y/o de si son el producto de las condiciones climáticas actuales, mediante un estudio edafológico detallado de sus modelados y suelos. Para obtener una información cronológica más precisa también podría hacerse uso de ciertas técnicas de datación, absolutas o relativas (p. ej. termoluminiscencia).

En cualquier caso, dado que los médanos parabólicos (y sus suelos asociados) son posteriores a los trenes de megarripleas, no cabe la menor duda que el paisaje de suelos, desde el último máximo glacial, ha ido incrementando su complejidad con el tiempo. Ibañez et al. (1994, 1995 y 1998) Phillips (1998) y Saldaña e Ibañez (1999) han comprobado que, en contra de la opinión generalizada hasta hace poco tiempo, este rasgo, fácilmente cuantificable con el auxilio de índices de entropía (p. ej. Shannon y Weaver, 1949), es una propiedad generalizada de la edafosfera y un síntoma evidente de su comportamiento caótico.

Algunas cuestiones referentes a la evolución del paisaje Plisloceno, el caos y las ciclicidades

Desde la perspectiva de los sistemas caóticos, la evolución puede conducir a un sistema (p. ej. un paisaje determinado) hacia un determinado *estado atractor*. Si se proyecta la trayectoria que sigue el sistema durante su evolución, entre los diferentes estados posibles

que le son accesibles (espacio de fases), se denomina *cuenca de atracción* a la región en la que ejerce su influencia un determinado atractor. En la actualidad se admite la existencia de tres tipos principales de atractores (Steward, 1992):

- *Atractores puntuales o estables*. Son aquéllos en los que la estructura final del sistema queda definitivamente configurada y es predecible para unas condiciones determinadas.
- *Atractores periódicos o de ciclo límite*. En éstos el estado final se caracteriza por oscilar periódicamente entre unos pocos estados estables.
- *Atractores extraños o caóticos*. Son aquéllos en los que el estado final del sistema es estable pero impredecible, pudiendo adoptar un número fijo, aunque infinito, de configuraciones, (p. ej., los fractales). Las trayectorias del sistema, incluso partiendo de condiciones iniciales muy similares, divergen exponencialmente con el tiempo, pudiendo finalmente alcanzar configuraciones muy dispares. En todos los casos se ha constatado que este atractor manifiesta ciertas características fractales.
- Entre los atractores de ciclo límite y los extraños, existe otro tipo de características intermedias, los *atractores cuasiperiódicos*. Estos últimos se caracterizan porque el sistema tiende a dirigirse, cíclicamente, hacia unas condiciones más o menos parecidas, pero nunca exactamente iguales. Por tanto, su espacio de fases no estaría formada por un ciclo, como en los atractores periódicos, sino por una especie de anillo tridimensional (denominado toro en el lenguaje de la topología) que englobaría trayectorias tan cercanas como uno pudiera imaginarse, pero que nunca se cruzarían entre si.

Desde esta perspectiva, cabría preguntarse que tipo de atractor describiría la evolución cuaternaria de los actuales paisajes de la Pampa Arenosa. Responder a esta pregunta requeriría un conocimiento adecuado de las fluctuaciones climáticas cuaternarias, así como de sus repercusiones sobre las geoformas y los suelos, mediante detalladas reconstrucciones paleoambientales. Mediante las metodologías actualmente disponibles por la comunidad científica es factible responder a esta pregunta. En primer lugar, deben descartarse los atractores puntuales, por cuanto solo son característicos de dinámicas evolutivas muy simples, que raramente ocurren en la naturaleza (tan solo abundan en ciertos sistemas bajo condiciones experimentales controladas en laboratorio). Obviamente, la alternancia de periodos glaciares e interglaciares podría sugerir la posibilidad de la existencia de atractores de ciclo límite. Sin embargo, de ser así, equivaldría a decir que, supuesta la existencia de diversas fases de construcción de campos de megarriple durante los episodios áridos y fríos, se produjo siempre, en los más cálidos y húmedos el mismo proceso que el aquí descrito. Dada la extrema sensibilidad a las condiciones iniciales que implica un sistema climático caótico, resulta cuasi imposible aceptar tal posibilidad. En el caso, de que los episodios más violentos (de mayor magnitud y menor frecuencia) hubieran sido causantes de una cierta ciclicidad debería considerarse la posibilidad de los atractores cuasiperiódicos. Sin embargo, como ya advertimos al sintetizar las propiedades dinámicas del sistema climático, la existencia de un anidamiento de ciclicidades no tiene que dar lugar necesariamente a atractores cuasiperiódicos, sino más bien a atractores caóticos, lo cual implica carencia de reiteración, e impredecibilidad entre otras propiedades. Tan solo las investigaciones pertinentes podrían dilucidar esta cuestión.

Referencias

- ALLEN, J.R.L. 1968. The nature and origin of bedform hierarchies. *Sedimentology*, 10: 161-182.
- ALLEN; J:R:L. 1985. *Principles of Physical Sedimentology*. Allen & Unwin, London, 272 pp.
- ANDERSON, R.S. 1990. Eolian ripples as exaples of self-organization in geomorphological systems. *Earth Science Reviews*, 29: 77-96.
- ANDREWS, D.J. & BUCKMAN, R.C. (1987): Fitting degradation of shoreline scarps by a nonlinear diffusion model. *J. Geophys. Res.*, 92:

12857-12867.

- ARMSTRONG, A.C. (1986): On a fractal dimension of some transient soil properties. *J. Soil. Sci.*, 37: 641-652.
- ARNOLD, R.W. (1990): Fractal dimensions of some soil map units. *Transactions, 14th Int. Congress of Soil Sci.*, Vol. 5-Commission V: 12-18. Kyoto, Japan.
- AVILÉS, C.A. & SCHOLZ, C.H. (1987): Fractal analysis applied to characteristic segments of the San Andreas Fault. *J. Geophysical Res.*, 92 (n° B1): 331-344.
- BAKER, V.R. BENITO, G. & RUDOY, A.N. 1993. Paleohidrology of Late Pleistocene superflooding, Altay Mountains, Siberia. *Science*, 259: 348-350.
- BASHER, 1997. L.R. Is pedology dead and buried?. *Australian Jour. Soil Res.*, 35: 979-994.
- BENITO, G., MEDIAVILLA, F., FERNÁNDEZ, M., MÁRQUEZ, A., MARTÍNEZ, J. & ANGUITA, F. 1997. Chasma Boreale, Mars: A sapping and outflow channel with a tectono-thermal origin. *Icarus*, 129: 528-538.
- BERQUIST, T.S. & SNOW, R.S. 1985. Fractal analysis of the planforms of river in Indiana and Kentucky (abs.). *Geol. Soc Am. Abstracts with Programs* 17, p. 280.
- BIRDI, K.S. 1993. *Fractals in Chemistry, Geochemistry and Biophysics. An Introduction*. Plenum Press, N.Y. 263 pp.
- BREED, C.S. & GROW, T. 1979. Morphology and distribution of dunes in sand seas observed by remote sensing In: (pp. 291-310); E.D. McKee (Editor). *A Study of Global Sand Seas*. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 1052: 253-302.
- BROWN, S.R. 1983. The flow in the planetary boundary layer. In: M.E. Brookfield & T.S. Ahlbrandt (Editors). *Eolian Sediment and Processes*. Developments in Sedimentology 38, Elsevier, Amsterdam.
- BRYANT, R.B. & ARNOLD, R.W. (eds.), 1994. Quantitative Modeling of Soil Forming Processes. SSSA Special Publication n° 39, Madison, Wisconsin, 185 pp.
- BURROUGH, P.A. (1981): Fractal dimension of landscapes and other environmental data. *Nature*, 294: 240-242.
- BURROUGH, P.A. (1985): Fakes, facsimiles and facts: Fractal models of geophysical phenomena. En: S. Nash (ed.), *Science and Uncertainty*, pp. 150-169. IBM UK Ltd. UK.
- BURROUGH, P.A. (1989): Fractals and Geochemistry. En: D. Avnir (ed.), *The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry*, pp. 383-406. Wiley.
- CHASE, C.G. (1988): Fluvial landsculpting and the fractal dimension of topography. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, 69: 1207.
- CHASE, C.G. & WOODWARD, J.A. (1990): Multifractal topography and climatic history of Southern Arizona. *Geol. Soc. Am. Abstr. Prog.*, 22: A14.
- CLOS-Arceuduc, A. 1967. L'application des méthodes d'interpretation des images à des problèmes géographiques. *Acta Symp. Int. Photointerpret.*, 2e, Paris.
- CORINE-EC. 1998. *Coastal Erosion*. EC, Luxembourg, 79 pp.
- CORNISH, V. 1914. *Waves of Sand and Snow*. Fisher-Unwin, London, 383 pp.
- CULLING, W.E.H. (1986): Fractal geometry of soil-covered landscapes. *Earth Surf. Proc. Landforms*, 12: 369-385.
- CUTS; J.A. 1973a. Wind erosion in the martian polar region. *J. Geophys. Res.*, 78: 4211-4221.
- CUTS; J.A.; 1973b. Nature and origin of layered deposits of the martian pole region. *J. Geophys. Res.*, 78:4231-4249.
- DE COLA, L. (1989): Fractal analysis of classified Landsat scene. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(5): 601-610.
- FAO-UNESCO. 1989. *Mapa Mundial de Suelos. Leyenda Revisada*, 202 pp. FAO, Roma.

- FAO-UNESCO. 1991. *World Soil Resources. An Explanatory Note on the FAO World Soil Resources Map at 1:25.000.000 Scale*. FAO World Soil Resources Reports n° 66, Rome, 58 pp.
- FINKL-JNR, C. W. (Editor), 1982. *Soil Classification*, Benchmark Papers in Soil Sci. Vol. 1. Httchinson Ross, 391 pp. Pennsylvania, USA.
- FLUIGENAM, R.H. & SNOW, R.S. (1989). Fractal analysis of long-range paleoclimatic data: Oxygen isotope record of Pacific Core V28-313, *Pure Appl. Geophys.*, 131: 307-313.
- FORMAN, R.T.T., 1995. Land mosaics. The ecology of landscapes and regions. Cambridge University Press, Cambridge, 632 pp.
- FORMAN, R.T.T. and Godron, M., 1986. Landscape ecology. John Wiley and Sons, New York, 619 pp.
- FRIDLAND, V.M., 1976. Pattern of the soil cover. Moscow: Geographical Institute of the Academy of Sciences of the USSR. 1972. (Israel Program for Scientific Translation. 1976), 291 pp.
- FRYBERGER, S.G. 1979. Dune forms and wind regimes. In: (pp. 137-169). E.D. McKee (Editor). *A study of Global sand Seas*. U:S. Geol. Surv. Prof. Pap., 333.
- GARDNER, W.R. 1991. Soil science as a basic science. *Soil Sci.*, 151: 2-6.
- GARDNER, W.R. 1993. A call for action (a guest editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57: 1403-1405.
- GOODCHILD, M.F. 1980. A fractal approach to the accuracy of geographical measures. *Math. Geol.*, 12: 85-98.
- GOODCHILD, M.F. & MARK, D.M. 1987. The fractal nature of geographic phenomena. *Annals of the Association of American Geographers*, 77: 265-278.
- GREELY, R. & IVERSON, J.D. 1985. Winds as geological process on Earth, Mars, Venus and Titan. Cambridge Univ. Press. Cambridge, 333 pp.
- GROVE, A.T. 1960. Geomorphology in the Tibesti region. *Geogr. J.*, 126: 18-31.
- GROEBER, P., 1936. Oscilaciones del clima en la Argentina desde el Pleistoceno. *Rev. Cent. Est. Doc. Ciencias naturales*. 1.2.(71-84).
- GUPTA, V.K. & WAYMIRE, E. 1989. Statistical self-similarity in river networks parametrized by elevation. *Water Resources Res.*, 25(3): 463-476.
- HACK, J.T. .1957. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland, *U.S. Geol. Surv. Prof., Paper* 294B, 97 pp.
- HALLET, B. 1990. Spatial self-organization in geomorphology: from periodic bedforms and patterned ground to scale invariant topography. *Earth Sciences Reviews*, 29: 57-75.
- HASTINGS, H.M. & SUGIHARA, G. 1993. *Fractals: a User's Guide for the Natural Sciences*. Oxford Univ. Press, N.Y., 235 pp.
- HAVHOLM, G.G. & KOCURECK, G. 1988. A preliminary study of the dynamics of a modern draa. Algodones, southern California. U.S.A. *Sedimentology*, 35: 649-669.
- HEWETT, T.A. 1986. Fractal distributions of reservoir heterogeneity and their influence on fluid transport. *Soc. of Petroleum Engineers*, Paper 15.386, 15 pp.
- HOLE, F.D. & CAMPBELL, J.B. 1985. *Soil Landscape Analysis*. Routledge & Kegan Paul, London, 196 pp.
- HORTON, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.* 56, 275-370.
- HUANG, J. & TURCOTTE, D.L. 1989. Fractal mapping of digitized images: application to the topography of Arizona and comparisons with synthetic images. *J. Geophys. Res.*, 94: 7491-7495.

- IBÁÑEZ, J.J., GALLARDO, J. AND JIMÉNEZ-BALLESTA, R., 1987. Suelos con horizontes argílicos en el Macizo de Ayllón y Sierra de Alto Rey (Sistema Central): pautas de distribución en el paisaje. *An. Edafol. Agrobiol.* 46, 1103-1116.
- IBÁÑEZ, J.J., ZINCK, J.A. AND JIMÉNEZ-BALLESTA, R. 1993. Soil survey: old and new challenges. *ITC Journal*, 1993-1: 7-14. (Holland).
- IBÁÑEZ, J.J. & BALAIRÓN, L. 1995. Cambios climáticos, predicción e incertidumbres. *Fronteras de la Ciencia y la Tecnología*, 9: 36-39. CSIC.
- IBÁÑEZ, J.J. 1996c. A introduction to pedodiversity analysis. *ESSC Newsletter*, 1/1996: 11-17 (Germany)
- IBÁÑEZ, J.J., JIMÉNEZ, R. & GARCÍA-ÁLVAREZ, A. 1990. Soil landscapes and drainage basins in Mediterranean mountain areas. *Catena*, 17(6): 573-583.
- IBÁÑEZ, J.J., PÉREZ-GONZÁLEZ, A., JIMÉNEZ, R., SALDAÑA, A. & GALLARDO, J. 1994a. Evolution of Fluvial dissection landscapes in mediterranean environments. Quantitative estimates and geomorphological, pedological and phytocenotic repercussions. *Z. Geomorph. N.F.*, 38, 105-119.
- IBÁÑEZ, J.J., GARCÍA-ÁLVAREZ, A. AND BOIXADERA, J. 1994b. Current Paradoxes in Soil Survey. **1th Meeting of the Soils Information Focal Point's. EU-Working Group on Soils Information System Development**, Hannover.
- IBÁÑEZ, J.J., DE-ALBA, S., BERMÚDEZ, F.F. & GARCÍA-ÁLVAREZ, A. 1995c. Pedodiversity: concepts and measures. *Catena*, 24: 215-232.
- IBÁÑEZ, J.J., DE-ALBA, S. & GARCÍA-ÁLVAREZ, A. 1995d. Aportaciones del caos a las ciencias de la tierra (estructura, evolución y dinámica del modelado terrestre. In: (pp. 43-80), Ibáñez, J.J. & Machado, C. (Editores), *Análisis de la Variabilidad Espacio-Temporal y Procesos Caóticos en Ciencias Medioambientales*, Geoforma-CSIC, 308 p. Logroño.
- IBÁÑEZ, J.J., & DE-ALBA, S., LOBO, A. & ZUCARELLO, V. 1998. Pedodiversity and global soils patterns. at coarser scales (with Discussion). *Geoderma*, 83: 171-214.
- IBÁÑEZ, J.J., SÁNCHEZ DÍAZ, J. & DE LA ROSA, D. 1998. Soil Survey and Soil Monitoring in Spain From an International Perspective. European Soil Bureau, JRC-EU, Luxemburg, (monografía en fase de edición).
- IRIONDO, M. Y D. KRÖHLING, 1995. El sistema edáfico Pampeano. *Com. Mus. Prov. Cs. Naturales. Santa Fe*. V.S-Nº1.
- JENNY, H. 1941. *Factors of soil formation*. McGraw-Hill, N.Y., 281 p.
- JOHNSON, D. L. & WATSON-STEGNER, 1987. Evolution model of Pedogenesis. *Soil Sci.*, 143: 349-366
- KOMATSU, G., KARGEL, J.S. & BAKER, V. 1992. *Geophysical Research Letters* 19: 1415-1418.
- KORVIN, G. (1992): *Fractal models in Earth Sciences*. Elsevier, The Netherlands, 396 pp.
- KRANTZ, W. B. 1990. Self-organization as patterned ground in recurrently frozen soils. *Earth Sciences Reviews*, 29: 117-130.
- KRUMMEL, J.R., GARDNER, R.H., SUGIHARA, G., O'NEILL, R.V. AND COLEMAN, P.R., 1987. Landscape patterns in a disturbed environment. *Oikos* 48, 321-324.
- LA BARBERA, P. & ROSSO, R. (1989): On the fractal dimension of stream networks. *Water Resour. Res.*, 25: 735-741.
- LE BAS, C. & JAMAGNE, M. (eds). 1996. Soil Data Bases to Support Sustainable Development. 149 pp. EU-JRC & INRA France.
- LEOPOLD, L.B. Wolman, M.G. & Miller, J.P. 1964. *Fluvial Process in Geomorphology*, Freeman, San Francisco.
- LIFTON, N.A. & CHASE, C.G. 1992. Tectonic, climatic and lithologic influences on landscape fractal dimension and hypsometry: implications for landscape evolution in San Gabriel Mountains, California. In: Snow, R.S. & Mayer, L. (eds.) (1992): *Fractals in Geomorphology*. Volumen especial, Vol. 5-nº 1/2.
- LORENZ, E.N. 1995. *La Esencia del Caos*. Ed. Debate, Madrid, 232 pp. (traducido del original en inglés The Essence of Chaos Univ.

Washington Press, 1993)

- LOVEJOY, S. 1982. Area-perimeter relation for rain and cloud areas. *Science*, 216: 185-187.
- LOVEJOY, S. & SCHERTZER, D. (1985): Generalized scale invariance in the atmosphere and fractal model of rain. *Water Resour. Res.*, 21: 1233-1250.
- LUKE, J.C. 1974. Special solutions for nonlinear erosion problems. *J. Geophys. Res.*, 79: 4035-4040.
- MACARTHUR, R.H. AND WILSON, E.O. 1967. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton Univ. Press.
- MAGURRAN, A.E. 1988. *Ecological Diversity and Its Measurement*. Croom Helm, London, 179 pp.
- MALAGNINO, E., 1991. Late Pleistocene to late Holocene evolution of the palodesert of the Central Region of Argentina and its paleoclimatic implication. International Conference on desert Landscapes. *IGCP 252. Desert Past and Future Evolution*. Australia.
- MANDELBROT, B.B. 1975. Stochastic models of earth's relief, the shape and fractal dimension of the coastlines, and number-area rule for islands. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 72: 3825-3828.
- MANDELBROT, B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*, 468 pp. W.H. Freeman.
- MANDELBROT, B.B. 1989. Multifractal measures, especially for the geophysicist. In: C.H. Scholz & B.B. Mandelbrot (eds.), *Fractals in Geophysics*, pp. 5-42. Birkhäuser Verlag, Alemania, 313 pp.
- MANDELBROT, B.B. 1996. Del azar benigno al azar salvaje. *Investigación y Ciencia*, 243: 14-20.
- MARK, D.M. & ARONSON, P.B. (1984): Scale dependent fractal dimensions of topographic surfaces with applications to computer mapping. *Mathematical Geology*, 16/7: 671-683.
- MARTÍN, M.A. & TAGUAS, F.C. 1998. Fractal modelling, characterization and simulation of particle-size distribution in soil. *Proc. R. Soc. Lond. A*.454: 1457-1468.
- MAYER, L. 1992. Fractal characteristics of desert storms sequences and implications for geomorphic studies. In: Snow, R.S. & Mayer, L. (eds.) (1992): *Fractals in Geomorphology*. Volumen especial, Vol. 5-nº 1/2.
- MAYR, E. 1998. *Así es la Biología*. Editorial Debate Madrid, 326 pp., (traducido del original en lengua inglesa de 1995, This is Biology).
- MCLEAN, S.R. 1990. The stability of ripples and dunes. *Earth Sciences Reviews*, 29: 131-144.
- MILLER, F.P. 1993. Soil science: a scope broader than its identity (A guest editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57: 299 and 564.
- MILNE, B.T. (1988): Measuring the fractal geometry of landscapes. *Appl. Math. and Comput.*, 27: 67-79.
- MILNE, B.T. (1990): Lessons from applying fractal models to landscape patterns. En: *Quantitative Methods in Landscape Ecology*, pp. 199-235. Springer-Verlag, 536 pp., USA.
- NAKATO, T. (1983): A fractal study of some rias coastline in Japan. *Ann. Per. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba*. 9: 75-80.
- NEWMAN, W.I. & TURCOTTE, D.L. (1990): Cascade model for fluvial geomorphology. *Geophys. J. Int.*, 100: 433-439.
- NIKIFOROFF, C.C. 1949. Weathering and soil evolution. *Soil Sci.*, 67, 21 9- 230.
- ORFORD, J.D. & WHALLEY, W.B. (1983): The use of the fractal dimension to quantify the morphology of irregular-shaped particles. *Sedimentology*, 30: 655-668.
- PERFECT, E. & KAY, B.D. (1991): Fractal theory applied to soil aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 1552-1558.
- PHILLIPS, J.D., 1998. On the relation between complex systems and the factorial model of soil formation (with Discussion).

Geoderma 86, 1-42.

- PLOTNICK, R.E. 1986. A fractal model for distribution of stratigraphic hiatuses. *J. Geology*, 94: 885-890.
- REAMS, M.W. 1992. Fractal dimension of sinkholes. In: Snow, R.S. & Mayer, L. (eds.) (1992): *Fractals in Geomorphology*. Volumen especial, Vol. 5-nº 1/2.
- ROZYCKI, S.Z. 1967. Le sens de vent portant la poussière de loess, à la lumière de l'analyse des formes d'accumulation en Bulgarie et Europe Centrale. *Rev. Géomorphol. Dyn.*, 17: 7-9.
- SALDAÑA, A., IBÁÑEZ, J.J., ZINCK, A., PÉREZ-GONZÁLEZ, A. & DE ALBA, S. 1993. Repercusiones de la evolución de los sistemas de incisión fluvial sobre la complejidad de los paisajes geomorfológicos en áreas con superficies de tipo raña. In: *Symposium sobre la Raña*, (celebrado en octubre de 1992), (p. 81-93), (SECS-CSIC-CAM).
- SALDAÑA, A., 1997. Complexity of soils and soilscape patterns on the southern slopes of the Ayllón range, central Spain. A GIS-assisted modelling approach. Ph.D. Thesis, Publication Nr. 49, ITC, Enschede, 252 pp.
- SALDAÑA, A. & IBÁÑEZ, J.J. 1999. Pedodiversity analysis in a chronosequence at large scales. (remitido a *Catena*).
- SHANNON, C.E. & WEAVER, W. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*, 237 pp. Univ. Illinois Press.
- SNOW, R.S. (1989): Fractal sinuosity of stream channels. *PAGEOPH*, 131: 99-109.
- SNOW, R.S. & MAYER, L. (eds.) (1992): *Fractals in Geomorphology*. Volumen especial, Vol. 5-nº 1/2.
- SOIL SURVEY STAFF. 1975. *Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*, 754 pp. USDA-SCS Agric. Handbook nº436, U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C.
- SOIL SURVEY STAFF. 1994. *Keys to Soil Taxonomy, 6th edition*. SCS-USDA, Washington D.C.
- STEWART, I. (1991): *¿Juega Dios a los Dados?* (traducido al castellano del original inglés, 1989 por Editorial Crítica, Barcelona, 319 pp).
- SUGIHARA, G. & MAY, R.M. (1990). Applications of fractals in Ecology. *Tree*, 5(3): 79-86.
- TALLIS, J.H. 1991. *Plant Community History. Long term Change in Plant Distribution and Diversity*. Chapman & Hall, London, 398 pp.
- TARBOTON, D.G., BRAS, R.L. & RODRÍGUEZ-ITURBE, I. (1988): The fractal nature of river networks. *Water Resour. Res.*, 24: 1317-1322.
- THOMAS, P. & WEITZ, C. 1989. Sand dune materials and polar layered deposits of Mars. *Icarus*, 81: 185-215.
- TURCOTTE, D.L. (1992): *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge Univ. Press., Cambridge, 210 pp.
- TURNER, M.G., 1990. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology* 4, 21-30.
- TURNER, M.G. and GARDNER, R.H., 1991. Quantitative methods in landscape ecology: the analysis and interpretation of landscape heterogeneity. Springer-Verlag, New York, 536 pp.
- TYLER, S.W. & WHEATCRAFT, S.W. (1989): Applications of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 987-996.
- TYLER, S.W. & WHEATCRAFT, S.W. (1991): Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, (en prensa).
- WILSON, R.G. 1971. Desert sandflow basins and a model for the origin of ergs. *Geogr. J.*, 137: 180-199.
- WILSON, R.G. 1972. Aeolian bedform-their development and origins. *Sedimentology*, 19: 173-210.
- WORONOW, A. 1981. A morphometric consistency with the Hausdorff-Beiscocitch dimension. *Math. Geol.*, 13: 201-216.

ZINCK, J.A. 1990. *Epistemology of a Vital Discipline*. ITC, Enschede, The Netherlands, 40 pp.