

Simulación de la Formación de Canales de Mareas por medio de Autómatas Celulares y Fractales

D. Minkoff¹, F. Ferramola², C. Delrieux², M. Escapa^{1,3} y G. Perillo^{1,4}

¹Instituto Argentino de Oceanografía

²Departamento de Ing. Eléctrica y de Computadoras de la Universidad Nacional del Sur
Bahía Blanca — E-mail: claudio@acm.org

³Departamento de Biología, FCEyN, Universidad Nacional de Mar del Plata

⁴Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca

1 Introducción

El objetivo de este trabajo es estudiar y simular la interacción entre los agentes biológicos responsables de modificar el paisaje de las marismas e influir en la formación de canales de marea, en particular el cangrejo *Chasmagnatus granulatus* y la planta *Sarcocornia perennis*. La interacción entre la planta y el cangrejo se basa en leyes simples, pero cuyo resultado es un complejo mecanismo biológico que desemboca en un proceso erosivo sobre la marisma y favorece la formación de canales de marea (Escapa et. al. 2003). Estos tipos de problemas basados en leyes simples han sido modelados con buena precisión por modelos de Autómatas Celulares (Dunkerley 1997, Matsinos y Troumbis 2002, Aassine y El Jai 2002, Bandini y Pavesi, 2002). En particular se desea recrear las leyes observadas y medidas, para obtener una forma automática de reproducir las perturbaciones biológicas en el terreno y estudiar su efecto en la generación de canales de marea en base al estudio de un modelo digital de terreno resultante. Una simulación exitosa permitiría, entre otras cosas, predecir la formación de canales en lugares en donde sería peligroso o problemático (cercanía de rutas o poblaciones).

Para la simulación presentada en este trabajo se propone un modelo que simule el comportamiento de los mencionados agentes en base a

la aplicación de factores puramente biológicos. Para esto se ha dividido el problema en tres tópicos bien diferenciados. El primero es reproducir el paisaje que genera la dinámica de la planta en la marisma junto con el efecto bioturbador de los cangrejos. Para esto se propone un modelo de autómatas celulares. Las leyes de crecimiento aplicadas son deducidas a partir mediciones hechas en el campo. La segunda parte es la generación de un modelo digital del terreno (MDT) sin las perturbaciones características del problema atacado. Para esto se utiliza un modelo fractal basado en el algoritmo del desplazamiento del punto medio con sumas aleatorias en dos dimensiones adaptado a la topografía típica de las marismas. Luego la topografía final es una combinación lineal de los resultados de la primera y segunda parte del problema. Por último se realiza un análisis de la evolución de los canales de marea en un terreno neutral en contraste con el terreno modificado por factores biológicos. Se analiza la topografía para establecer cómo es la circulación del agua que queda atrapada luego que la marea se retira o cuando llueve.

2 Evolución de los Factores Biológicos

Los Autómatas Celulares son idealizaciones de sistemas reales, aplicados en una grilla de

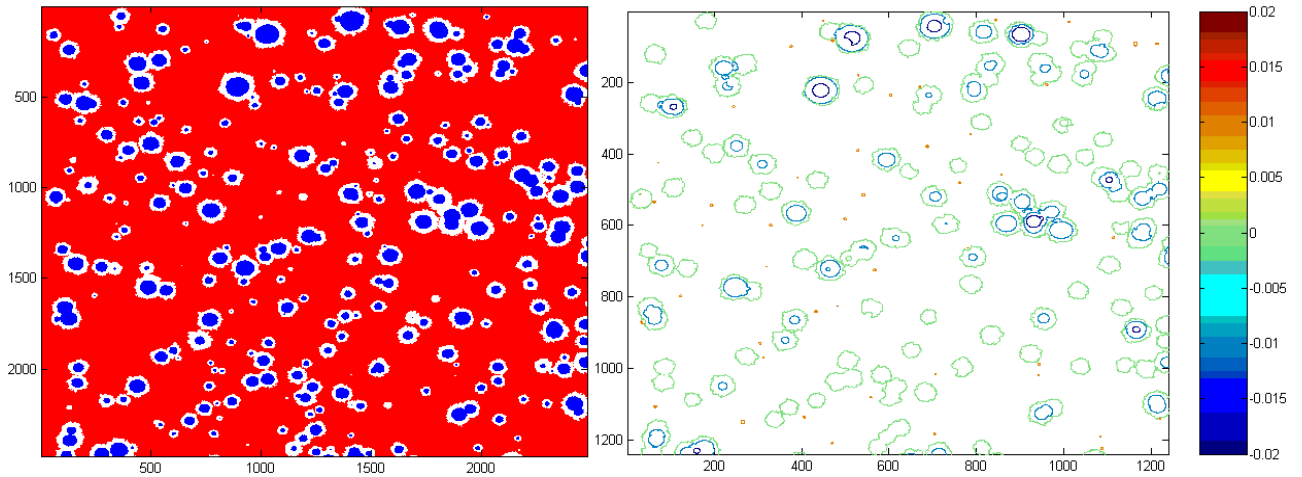


Figura 1: (a) Simulación del crecimiento de la *Sarcocornia perennis* por medio de autómatas celulares, y su población en el interior por el cangrejo *Chasmagnatus granulatus*. (b) Curvas de nivel resultantes por la erosión sobre un terreno idealmente plano.

una o más dimensiones, donde el espacio y el tiempo son variables discretas. Las leyes que los representan son simples, pueden ser determinísticas o estocásticas, y se aplican simultáneamente en todos los puntos de la grilla. Definiciones de AC se encuentran en muchas publicaciones (Wolfram, 1994; Sipper, 1997; Worsch, 1999). El modelo bidimensional de AC particularmente adaptado en este trabajo se basa en un entramado bidimensional de Moore (El Yacoubi, 2003) con una resolución de 5 cm. Las funciones de transición se deducen de la tasa de crecimiento de los anillos externos e internos de las plantas en función del diámetro, la relación diámetro interno *vs.* externo y el hundimiento del cuenco *vs.* el diámetro externo. Por simplificación se supone que los diámetros corresponden a círculos de área igual a la de los parches. La condición de inicio es una distribución aleatoria y uniforme de semillas de plantas. Como parámetros de comparación del modelo se cuenta con una distribución de diámetros externos e internos, la relación entre los diámetros internos *vs.* externos y una ley de potencia entre el área y el perímetro de los parches de plantas obtenidos a partir de una fotografía aérea.

La función de transición propuesta es tal que cada celda que represente una porción de planta pueda ser reemplazado con una arreglo de

celdas con cierta probabilidad a medida que el modelo itera. Esta operación es conocida como dilatación (González y Woods 1992, Haralick y Shapiro, 1992) pero condicional a la probabilidad. La forma de este arreglo representa un círculo formado con pequeña cantidad de celdas. Esta función de transición es deducida tanto para los diámetros internos que representan las colonias de cangrejos como para los diámetros externos de los parches de plantas. Esta probabilidad puede no ser constante y debe satisfacer la ley de crecimientos reales de las plantas en función del diámetro. La descripción precisa tanto de la función de transición como la determinación de los parámetros de crecimiento se puede consultar en Minkoff y Ferramola (2004). En la Fig. 1 es posible observar el resultado de la simulación del crecimiento de la planta y de la erosión generada por el cangrejo.

3 Evolución de los Factores Topográficos

La generación de un modelo digital de terreno (MDT) se basó en la utilización del algoritmo del desplazamiento del punto medio con sumas aleatorias, debido a su amplia aceptación y difusión (Fournier et. al. 1982, Mandelbrot

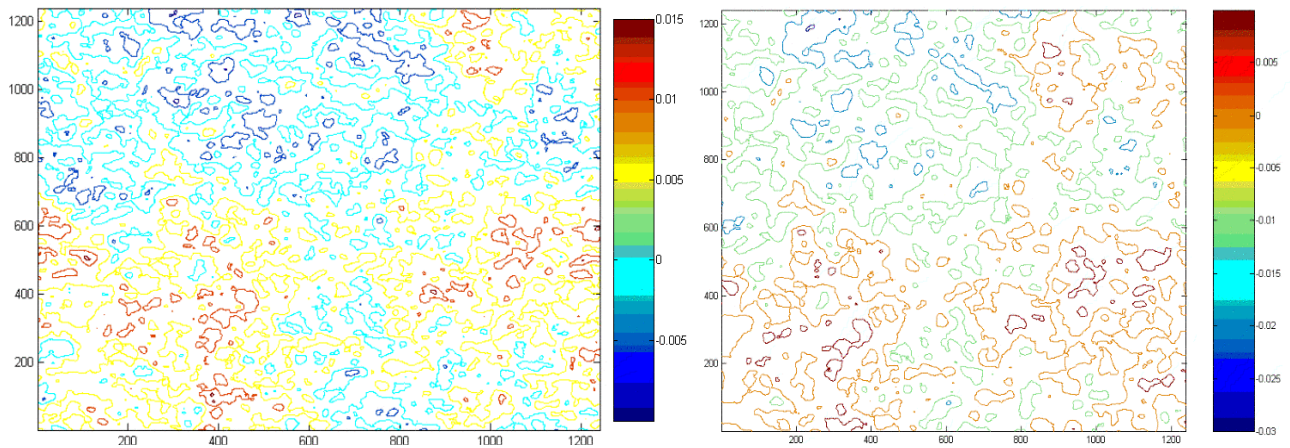


Figura 2: (a) Modelo digital de terreno, generado con dimensión fractal 2.2 y luego filtrado con un filtro pasabajos, y (b) resultado de agregarle la erosión producida por los cangrejos.

1982). Muchas modificaciones se pueden encontrar de este algoritmo (Saupe 1988). En este trabajo el coeficiente de Hurst adecuado fué de 0.8 (dimensión fractal 2.2).

Para adecuar el MDT a las características la marisma en estudio se aplicó un filtro pasabajos. Este consiste en promediar cada punto de la grilla con una subgrilla cuadrada de la matriz original, de 13 unidades a cada lado de la celda. En la Fig. 2 se pueden apreciar las curvas de nivel del terreno digital obtenido luego de este proceso, así como el resultado de agregarle la erosión modelada en el proceso de la Sección anterior.

4 Evolución de los Canales de Marea

En esta etapa la marisma queda representada con la suma de la topografía resultante de la interacción planta-cangrejo mas la topografía del MDT. Queda determinar cómo desaguan los cuencos del terreno en condiciones de marea bajante o después de lluvias. Para esto se analizan todos los cuencos desde el punto de vista de su interconexión y la salida que tienen sobre los bordes de la grilla.

El análisis de la delimitación de los cuencos se efectúa analizando el recorrido que tendrá una gota de agua colocada en cada punto de la grilla. Se supone que las gotas se moverán

desde el punto de partida siguiendo el trayecto que mayor pendiente le ofrezca. De esta forma habrá trayectos que son visitados por mayor cantidad de gotas de agua, y son los que tienen mayor probabilidad de ser erosionados. Todas las gotas agua que escurran a un punto en común compartirán el mismo cuenco. Efectuado éste análisis se obtiene un mapa de los cuencos del terreno modelado.

La interconexión de estos cuencos definirá cuencas resultantes por donde crecerán los canales de marea. Cada cuenco desaguará por el punto de su borde con menor cota hacia su cuenco adyacente y éste hacia otro vecino nuevamente por su punto del borde con menor cota. Cuando dos cuencos adyacentes tengan su punto de desborde enfrentado, se convierten en un cuenco endorreico (sin salida de agua). En este caso los dos cuencos son tomados como uno solo y se prosigue el análisis ante mencionado hasta que la cuenca conformada desagüe por el borde de la grilla del terreno. En la Fig. 3 es posible observar las cuencas resultantes al aplicar este procedimiento al terreno simulado cuyas curvas de nivel se mostraron en la Fig. 2(b).

Se supone que la cantidad de agua que dreña cada cuenco es proporcional al área que este tiene. Cada cuenco que recibe agua guarda la información de la cantidad de agua acumulada que trae el cuenco que le aporta agua. De esta forma, se conoce cuánta agua dreña por

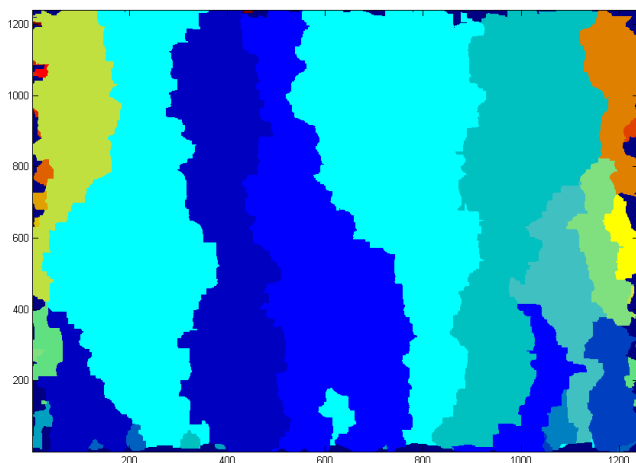


Figura 3: Cuencas de nivel del modelo digital de terreno más el hundimiento producido por la erosión.

el cuenco que desborda hacia afuera de la grilla. Finalmente la cabecera principal del canal perteneciente a cada cuenca crecerá siguiendo los cuencos que mayor caudal aporten desde el cuenco del borde de la grilla hacia el interior de ésta.

El camino que siguen los canales se logra conectando los puntos de desborde de cuencos con los de mínima cota, y luego desde estos hacia el punto de desborde del cuenco aportante, en ambos casos por el camino que recorre la gota de agua antes mencionada hacia el punto de menor cota del cuenco. No se considera en el análisis los canales secundarios de cada cuenca. En la Fig. 4 se muestran los canales formados por el escurrimiento de agua al aplicar este procedimiento al terreno de la Fig. 2(b).

5 Discusión y Conclusiones

El modelo de AC resultó adecuado para reproducir los efectos de interacción entre la planta y el cangrejo. El histograma de diámetros externos, las relaciones entre diámetros y la relación de potencias entre el área y el perímetro resultaron estadísticamente idénticos a los medidos. Sin embargo el histograma de diámetros

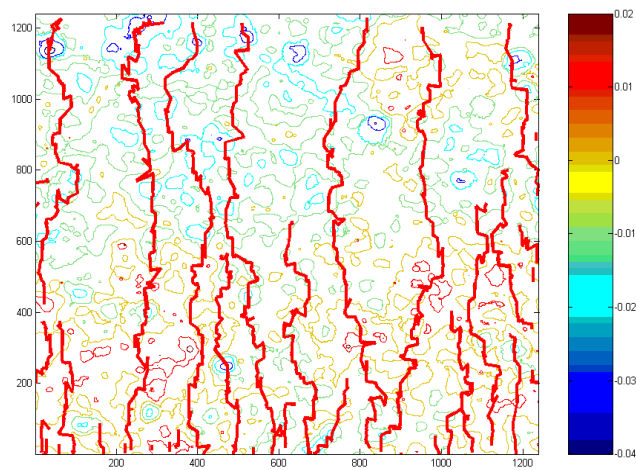


Figura 4: Canales de escurrimiento simulados en el modelo digital de terreno de la Fig. 2(b).

internos no se reprodujo satisfactoriamente, aunque si se logró reproducir la media y la varianza. Aún así esto último solo tiene una importancia paisajística, debido a que el diámetro interior no interviene en la modificación de la topografía, ya que el hundimiento y la forma de los parches es función del diámetro externo.

El modelo no fue pensado para estudiar la interacción entre la planta y el cangrejo, sino para reproducir los efectos ésta en la topografía. No se contempló la tasa de natalidad ni mortalidad de los parches de plantas, como así tampoco la variabilidad estacional de la actividad de la planta y el cangrejo. Los procesos aquí descritos transcurren en épocas cálidas, principalmente desde Noviembre a Marzo. Sin embargo para alcanzar el estado actual, el modelo realizó 322 iteraciones, lo que significa un lapso de tiempo de 64 años.

Es posible concluir que adaptar el modelo a situaciones que reflejen la dinámica poblacional de la planta y los cangrejos no se encuentra muy lejos. Se podrían agregar las leyes de natalidad y mortalidad para simular como se comporta el sistema ante distintos eventos sobre la marisma. Adicionalmente si solo se conoce la natalidad o la mortalidad de una de las especies se podría deducir la mortalidad o natalidad respectivamente para que el sistema continúe en el estado de equilibrio actual. Finalmente el estudio del escurrimiento

del agua mostró que esta interacción modifica efectivamente el desarrollo de los canales de marea. Estos canales se vieron atraídos hacia los cuencos generados por los cangrejos. Adicionalmente las cuencas resultantes modificaron su forma, y en donde había presencia de parches de plantas con cangrejos aumentaron su volumen.

Bibliografía

- Aassine, Saadia y Marie C. El Jai (2002) Vegetation dynamics modelling: a method for coupling local and space dynamics. *Ecological Modelling* 154:237-249
- Bandini, Stefania y G. Pavesi (2002) Simulation of Vegetable Populations Dynamics Based on Cellular Automata. *Proceedings of Fifth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry (ACRI 2002)*, S. Bandini, B. Chopard, and M. Tomassini, Eds., vol. 2493 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 202-209, Springer-Verlag, Berlin.
- Dunkerley D. L. (1997) Banded vegetation: survival under drought and grazing pressure based on a simple cellular automaton model. *Journal of Arid Environments* 35:419-428
- El Yacoubi S., A. El Jai, P. Jacewicz, J.G. Pausas (2003) LUCAS: an original tool for landscape modelling. *Environmental Modelling & Software* 18:429-437.
- Escapa M. (2003) Dinámica de cuevas de cangrejo en relación con canales de marea, y efectos en la erosión de marismas. Monografía curso: Geomorfología y Dinámica de Estuarios. UNS
- Fournier, D. Fussel, and L. Carpenter (1982) Computer Rendering of Stochastic Models. *Communications of the ACM*, 25:371-384.
- González, Rafael C. y R.E. Woods (1992) *Digital Image Processing*. Addison-Wesley.
- Haralick, Robert M. y L. G. Shapiro (1992) *Computer and Robot Vision, Volume I*. Addison-Wesley.
- Mandelbrot, Benôit (1982) *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman, San Francisco.
- Matsinos Yiannis G. y Andreas Y. Troumbis (2002) Modeling Competition, Dispersal and Effects of Disturbance in the Dynamics of a Grassland Community Using a Cellular Automaton Model. *Ecological Modelling* 149:71-83.
- Minkoff, Darío y Félix Ferramola (2004) Estudio de la Interacción entre el Cangrejo *Chasmagnathus Granulatus* y la Planta *Sarcocornia perennis* en la Evolución de Canales de Marea en Marismas. Monografía, Imágenes Fractales y Aplicaciones, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computadoras, UNS.
- Saupe, Dietmar (1988) Algorithms for Random Fractals, Cap 2, 71-136 en: Peitgen H. O. Y D. Saupe. *The Science of Fractal Images*. Springer-Verlag, New York.
- Sipper, M. (1997) Evolution of Parallel Cellular Machines. *The Cellular Programming Approach*. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.1194. Springer, Berlin.
- Wolfram, S. (1994) *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley Publishing Company, Science Mathematics Computing.
- Worsch, Thomas (1999) Simulation of cellular automata. *Future Generation Computer Systems* 16:157-170