

## Regulación de calidad de agua desde la perspectiva de la Ingeniería y la Economía Ambiental

### Water quality regulation from the perspective of Engineering and Environmental Economics

L. Herrera<sup>1</sup>, E. Luccini<sup>1,2</sup>, M. Parodi<sup>1,3</sup>, M. Matar<sup>1,3</sup>, J. Gomez Insausti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina. Santa Fe, Argentina.

<sup>2</sup> CONICET - Centro de Excelencia en Procesos y Productos de Córdoba (CEPROCOR). Córdoba, Argentina.

<sup>3</sup> Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. Santa Fe, Argentina.

#### Resumen

Debido a su importancia para la vida humana y a la magnitud del despliegue necesario tanto para su disposición como para su cuidado, el control de la calidad del agua se ha transformado en las últimas décadas en una de las áreas más prominentes de la ingeniería ambiental y de la economía ambiental. Una estrategia implementada por países que cuentan con una importante experiencia en este tipo de políticas ambientales consiste en recurrir a incentivos económicos, con el fin de sumar a los distintos agentes contaminadores al proceso mismo de reducción de la contaminación. En este trabajo analizamos los posibles resultados de este tipo de regulación, aplicada a calidad del agua en el curso de un río sobre el cual se producen vertidos de diversas fuentes, mediante la implementación de un modelo de control de la contaminación y a su correspondiente simulación computacional. Se plantea un problema de optimización sobre un modelo de simulación de mercado basado en agentes de descargas de efluentes (puntuales y no puntuales), desarrollado en Estados Unidos de América (USA) y que puede ser aplicable en muchos aspectos, con su correspondiente adaptación, a nuestro país.

**Palabras clave:** control de contaminación en agua; incentivos económicos; ingeniería ambiental; economía ambiental; modelo y simulación numérica.

#### Abstract

Due to its importance for human life and the magnitude of the deployment necessary both for its disposal and for its care, the control of water quality has in recent decades become one of the most prominent areas of environmental engineering and environmental economics. A strategy implemented by countries that have significant experience in this type of environmental policies is to resort to economic incentives, in order to include the different pollutants to the process of pollution reduction. In this work we analyze the possible results of this type of regulation, applied to water quality in the course of a river on which spills from various sources occur, through the implementation of a pollution control model and its corresponding computational simulation. An optimization problem arises on a market simulation model based on effluent discharge agents (punctual and non-punctual), developed in the United States of America (USA) and which can be applicable in many aspects, with their corresponding adaptation, to our country.

**Keywords:** water pollution control; economic incentives; environmental engineering; environmental economics; model and numerical simulation.

### 1. Introducción

Los mercados de cuotas de contaminación (mercados de calidad de agua) relacionados con el vertido de efluentes directos (fuentes puntuales) o difusos (fuentes no puntuales) constituyen una fórmula de reasignación de derechos y obligaciones de vertido que persigue una distribución más eficiente de las cargas ambientales. Quienes pueden mejorar la calidad del efluente con menor coste, superando sus obligaciones legales, generan créditos transmisibles a quienes están en situación inversa. Este tipo de mercado ha alcanzado un cierto desarrollo en USA y su implantación es creciente en diversos países.

En este trabajo implementamos un modelo, y la correspondiente simulación del comercio de permisos de descargas de contaminantes. Si bien, tanto el modelo como la simulación desarrollada remiten al caso de USA, se pueden generalizar sus más importantes conclusiones y extenderlas a otros casos de estudio. Las simulaciones están diseñadas como un marco de referencia para explorar los resultados emergentes de esta comercialización bajo una especificación particular de parámetros de diseño de mercado y en presencia de información asimétrica, agentes heterogéneos y costos de transacción. Estas simulaciones permitieron obtener un mapeo del diseño de los mecanismos (estructuras y normas existentes en el mercado) que fundamentan el comportamiento de los actores económicos (el rendimiento del mercado).

## 2. Modelo de control de contaminación de una cuenca hídrica

El modelo de control de la contaminación aquí presentado se basa en los trabajos pioneros de Kendrick, Rao and Wells (1971) y de Foley y Haines (1972). Para una discusión más detallada sobre la determinación óptima de las tasas de efluentes contaminantes se puede consultar a Haines, Foley and Yu (1973) y a Haines (1971) y sobre los sistemas de control de contaminación que derivan su eficacia de la teoría de la dualidad se puede consultar a Solow (1971), también a Dofman and Jacoby (1970).

La figura (1) es un diagrama esquemático de una parte de un río en la que (n) fuentes (industrias y municipios) descargan efluentes contaminantes. Los contaminantes consisten en diversos materiales pero, para simplificar el modelo de contaminación, supondremos que su impacto sobre la calidad de la corriente de agua se mide en términos de una sola variable: la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la cual se encuentra en el oxígeno disuelto (DO) del río. Dado que el DO en la corriente de agua se utiliza para descomponer químicamente los contaminantes en substancias inofensivas, la calidad de la corriente de agua mejora con la cantidad de DO y disminuye con el aumento de la DBO. Se sabe que, si el DO decae por debajo de una cierta concentración, la vida en el río en cuestión está seriamente amenazada. Por lo tanto, es importante tratar los efluentes antes de que entren en la corriente de agua para reducir el DBO a niveles de concentración que pueden ser absorbidos con seguridad por el DO de la corriente de agua. Estamos buscando hallar el equilibrio óptimo entre los costes del tratamiento de los residuos y los costos del alto DBO en la corriente.

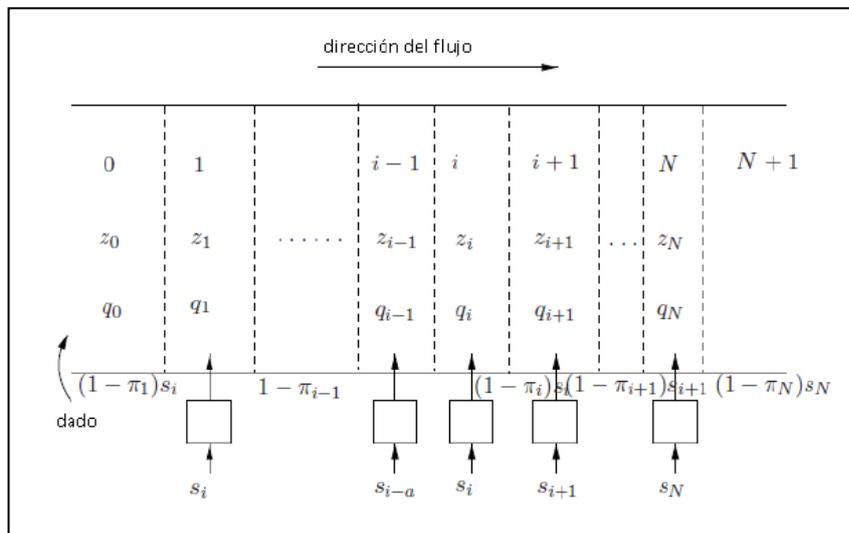


Figura 1: Esquema de una corriente de agua con descarga de efluentes.

Como caso de estudio y simulación del funcionamiento de estos mecanismos de negociación, Nga Phuong Nguyen (2009) define una cuenca hipotética que contiene 20 pequeños vendedores (fuentes de contaminación no puntual) y 4 grandes compradores (fuentes puntuales de descarga de contaminantes), reflejando el hecho de que los compradores de créditos en los mercados de nutrientes son normalmente las plantas de tratamiento de efluentes de propiedad pública (un pequeño número de plantas, grandes en tamaño) en comparación con los agricultores que normalmente serán los vendedores de los créditos. La figura (2) muestra una representación esquemática de una cuenca que contiene estos agentes de descarga, puntuales y no puntuales. Aunque estos datos espaciales son hipotéticos, el caso estudia los resultados de las características físicas principales de una típica cuenca basada en los mercados de calidad de agua de USA.

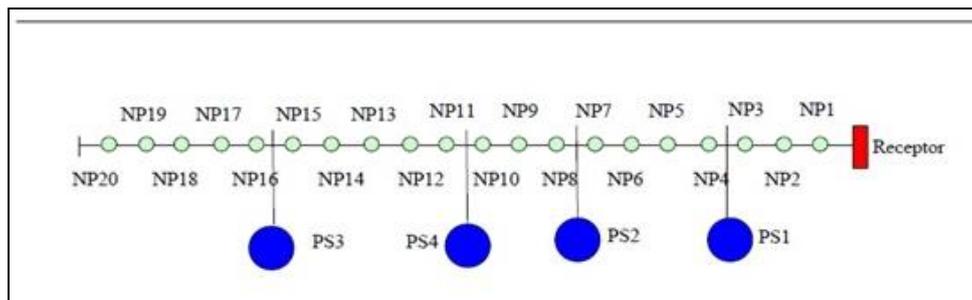


Figura 2: Cuenca hipotética con fuentes de descargas de efluentes

Los objetivos de los compradores para minimizar el costo total del control de contaminación se designan ( $BTCC_i$ ). Los compradores se van a beneficiar comprando créditos si los costos de los créditos son más bajos que sus propios costos de reducción. Pero en el entorno de la comercialización, los compradores tienen incertidumbre sobre ambos, sus propios costos y los costos de los créditos. Los vendedores buscan maximizar los beneficios de las ventas de sus créditos, que se designan ( $SP_j$ ). El beneficio es dado por la diferencia entre ingresos de la venta de créditos y los costos de generaciones de créditos. Tanto los vendedores como los compradores tienen incertidumbre sobre sus costos de control. Las interacciones de los agentes en el mercado dadas por el rendimiento de un costo ( $E[BTCC_i]$ ) o beneficio ( $E[SP_j]$ ), como medidas de rendimiento para cada comprador de esas decisiones y cada vendedor respectivamente, guían las decisiones individuales. Como resultado, el costo total del control de contaminación para la cuenca general,  $E[TCC_k]$  es la suma de los costos asociados de todos los agentes con intercambio y reducción. Así, el problema de optimización puede ser representado por la siguiente expresión:

$$\min_x E[TCC_k] = f(E[BTCC_i], E[SP_j]) \quad (1)$$

$$St \begin{cases} t = \text{tasas comerciales inciertas} \\ T = \text{objetivo ambiental total} \end{cases}$$

El modelo estocástico de compradores y vendedores, en el proceso de toma de decisión, introduce un alto grado de complejidad matemática tanto en las funciones objetivo individual de cada agente y en la función objetivo del mercado general. Desde una perspectiva matemática, las funciones objetivo bajo restricciones son altamente estocásticas, no lineales y discontinuas, debido a la presencia de una alta gama de incertidumbres implícitas para las decisiones de comercialización de los agentes, y de sus consecuencias. Con múltiples agentes en el mercado, la escala del problema es grande aun cuando cada agente en el mercado tiene que tomar sólo un número pequeño de decisiones. Optimizar el costo total previsto del control de la contaminación para la cuenca en general es buscar estrategias de comercialización para agentes individuales, o un conjunto de estrategias de comercialización para el mercado en su totalidad, que están buscando “optimización” en cada realización de los parámetros inciertos mientras intentan alcanzar una disminución en las expectativas de las funciones de costo. Es importante destacar a aquellos agentes que no conocen las verdaderas mejores decisiones y que están intentando evitar decisiones que prometen mayores beneficios del comercio, pero que en definitiva demuestran ser perjudiciales.

### 3. Simulación computacional

#### 3.1 Estructura, muestreo y lazos

Con el objetivo de encontrar estrategias “sólidas” de comercio comentadas anteriormente, se diseña un marco computacional para buscar sistemáticamente la “mejor solución conocida” a la formulación del problema de optimización (1). En este sentido, el modelo de simulación de mercado, basado en agentes de descargas de efluentes (puntuales y no puntuales), consta de:

- (1) Una muestra de población inicial (mercado en estado de equilibrio),
- (2) Bucle generacional
- (3) Bucle de negociación bilateral Monte Carlo y
- (4) Una fase de evolución.

Para cada población inicial de soluciones generadas aleatoriamente a la formulación del problema expuesto (1), son aplicados algoritmos genéticos (dos versiones del Algoritmo de Evolución Diferencial), para que evolucionen a un mercado equilibrado, con la meta de identificar sólidas instancias de bajo costo de los mercados simulados. A continuación, se brindan algunos detalles de los programas de simulación.

Un resultado del mercado como una solución al problema formulado en ecuación (1) es un patrón de las opciones de agentes. En otras palabras, cada miembro, en la combinación, contiene un conjunto de estrategias de comercio generadas aleatoriamente tomadas por todos los agentes. Incluso con un pequeño número de agentes, y opciones bastante sencilla de agentes (Sí participa en el mercado, con quien negocia, la opción de oferta y demanda, y sí acepta o rechaza ofertas) reporta un gran y potencialmente complejo conjunto de variables de decisión. Esto es porque las variables de decisión de los agentes son de diferentes tipos. (Continuas, dicotómicas y números enteros discretos). Para agregarle más complejidad a la simulación de comercialización de descargas puntuales y no puntuales, los agentes deben actuar en un alto entorno de decisiones inciertas. Entonces, evaluaciones determinísticas de las decisiones de un agente no son apropiadas y puede producir potencialmente mediciones engañosas y erróneas de la tendencia del mercado. La pregunta para hacer aquí es “¿Que tan grande debería ser el tamaño de la muestra del conjunto de población inicial?” En el contexto de mercados de calidad de agua, esta pregunta está asociada al problema de cómo representar todos los estados posibles de un mercado. En la práctica, es imposible representar todos los resultados

posibles de mercado, por lo tanto, la elección de (M) es elegido experimentalmente por un método propuesto por (PRICE and STORN, 2005). Inicialmente, un tamaño de muestra simple recomendado por (PRICE and STORN, 2005) es testeado. Después, el tamaño de la muestra es duplicado para detectar los cambios en el rendimiento del mercado. Si la ganancia marginal en rendimiento es limitada en relación al costo computacional, deberá ser elegido el más pequeño tamaño de muestra.

Esta muestra inicial de posibles estrategias de comercio de agentes constituye la primera generación del bucle evolutivo, sobre los algoritmos genéticos aplicados. Cada miembro de la primera generación es evaluado usando la simulación de negociación bilateral Monte Carlo que explica las incertidumbres de los agentes. Tomando todos los valores de parámetros inciertos asociados con la incertidumbre de los agentes como aleatorios y distribuidos independientemente, cada resultado posible de mercado en el conjunto anterior fluye a través del bucle de negociación bilateral Monte Carlo, (K) veces. Cada iteración representa una extracción simple (o realización) de todos los parámetros inciertos asociados con las estructuras de costos de los agentes y un patrón único de comercio correspondiente entre agentes. Para cada muestra, es posible observar la estructura de transacciones, o sea ver quien comercia con quien, qué precios son ofrecidos y aceptados, cuantos créditos son intercambiados. El costo total del control de la contaminación para cada comprador, los beneficios para cada vendedor, el costo de mercado total y otros parámetros económicos de interés son calculados por cada realización de la simulación de Monte Carlo. Los resultados del bucle de Monte Carlo son, por lo tanto, presentados en forma distribucional.

### 3.2 Algoritmos

Después del bucle de negociación bilateral Monte Carlo, el conjunto de resultados de mercado es pasado por iteraciones de búsqueda diferencial evolutiva (DE) mediante algoritmos denominados Evolución Diferencial Standard (SDE) y Evolución Diferencial Modificada (MDE). Usando ya sea el algoritmo SDE o bien el algoritmo MDE, las estrategias individuales de comercio de agentes son “evolucionadas”. Estos algoritmos serán analizados con más detalle a continuación. Por ahora nos interesa saber que cada generación nueva contiene el mismo número de posibles resultados de mercado, donde cada una de las cuales contiene sólo aquellas estrategias de comercio que han sobrevivido después de la selección. Cada nueva generación ingresa al bucle de negociación bilateral Monte Carlo en el bucle generacional, el algoritmo evolutivo busca la mejor solución en cada generación hasta que la máxima especificación del usuario es alcanzada.

#### 3.2.1 Algoritmo diferencial evolutivo (DE)

El algoritmo DE que proponen (PRICE and STORN, 2005) pertenece a la clase de herramientas de optimización heurística llamados algoritmos evolutivos. DE ha demostrado ser capaz de búsquedas no diferenciables, no lineales y funciones objetivos multimodales con niveles superiores competitivos de éxito relativo a otros algoritmos genéricos y evolutivos. Este es un método de búsqueda directo estocástico, el cual usa un vector población donde la alteración estocástica de los vectores población se puede hacer independientemente, por lo tanto, los resultados pueden ser obtenidos en un tiempo razonable. La característica más importante de DE, es que toma el vector diferente de dos vectores de poblaciones elegidas aleatoriamente para alterar un vector existente (la alteración es hecha para cada vector población). Tiene buenos resultados en términos de propiedades de convergencia para un método global de minimización (PRICE and STORN, 2005). Similar a otros algoritmos de búsqueda evolutivos, DE es inspirado por la similitud a la evolución biológica. En particular, la estrategia básica de DE consiste en tres operadores: mutación, cruce, y selección. Brindaremos a continuación un detalle del mecanismo por el cual el algoritmo de evolución diferencial genera de nuevos individuos:

Mediante la mutación diferencial se añade la diferencia proporcional de dos individuos ( $v_2, v_3$ ) elegidos aleatoriamente de la población a un tercer individuo ( $v_1$ , individuo objetivo, *target*) también elegido aleatoriamente. El nuevo individuo  $w_i$  se denomina individuo mutado o vector mutado. Los vectores  $v_1, v_2, v_3$  son mutuamente exclusivos y a su vez diferentes de  $w_i$ , donde  $w_1 = v_1 + \mu(v_2 - v_3)$ . La constante de mutación  $\mu > 0$  establece el rango de diferenciación entre los individuos  $v_2$  y  $v_3$ . Tras la mutación se realiza una operación de recombinación sobre cada individuo  $v_i$  (target) para generar un individuo intermedio  $\mu_i$  (trial).

El individuo intermedio  $\mu_i$  es construido mezclando los componentes de  $w_i$  y  $v_i$  bajo una probabilidad predefinida  $Cr \in [0,1]$ .

$$u_i(j) = \begin{cases} w_i(j) & \text{si } rand \leq Cr, \\ v_i(j) & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Finalmente el operador selección decide en base a la mejora del fitness, si el individuo intermedio  $\mu_i$  es aceptado y reemplaza al individuo objetivo  $v_i$  o si por el contrario el individuo intermedio  $\mu_i$  es rechazado y se conserva el individuo objetivo  $v_i$  en la siguiente generación. El operador de selección descripto asegura que el mejor fitness en la

población siempre es incorporado en la generación siguiente. DE es una aproximación de búsqueda poblacional la cual comienza con una población inicial de posibles vectores/soluciones. Esta población inicial es elegida aleatoriamente y debe abarcar el espacio de parámetro entero. DE crea nuevas soluciones posibles agregando la diferencia media entre dos soluciones aleatorias a una tercera solución. Esta operación es llamada mutación.

Para cada solución posible en cada generación, una solución mutante (o un competidor) es creada para competir en contra de la solución existente. El operador de cruce combina los parámetros en la solución mutada con los parámetros de otra solución predeterminada, el objetivo solución, para producir la denominada solución de prueba. Si la solución de prueba tiene un valor de función de costo más bajo que el del objetivo solución, la solución de prueba reemplaza el objetivo solución en la generación siguiente. Este proceso es realizado por el operador de selección.

### 3.2.2 Algoritmo standard diferencial evolutivo (SDE)

La estrategia básica de SDE es detallada a continuación, por la mutación y cruce sobre los operadores de SDE, nuevos patrones de elección son reproducidos, como se muestra en la figura (5). Para cada resultado de mercado objetivo ( $M_i$ ), un resultado de mercado prueba ( $M_t$ ) es creado, combinando los parámetros entre el resultado del mercado mutado y el objetivo de mercado.

Un resultado de mercado mutado es creado tomando la diferencia entre dos vectores parámetro de resultado de mercado aleatorio ( $M_a, M_b$ ) antes de añadir un tercer vector aleatorio de resultado de mercado ( $M_c$ ) en el conjunto de mercados. La presión selectiva es aplicada en el nivel de mercado. La referencia para comparaciones de mercados es el costo total de control de contaminadores esperado de mercado ( $E[TCCK]$ ). Cada recién creado patrón de elecciones  $M_t$  tiene que competir y superar al otro en la generación existente para asegurar un lugar en la próxima generación. En otras palabras, cada conjunto de estrategias de los agentes en un mercado en cada generación tiene un competidor para competir. El criterio usado en el algoritmo SDE, para determinar si un resultado de mercado es “bueno” o “malo” es el costo total de control de contaminadores de mercado. En cada generación, la población total de resultados de mercado cambia debido a esta presión selectiva. El hecho que un mercado rinde mejor que otro en términos de costo total de control de contaminadores de mercado es porque la combinación de comportamientos estratégicos entre agentes en ese mercado implica más costo efectivo de decisiones de comercio que aquellos que compiten en el otro mercado. Las poblaciones sucesivas de resultado de mercado representan más comportamientos cooperativos en las interacciones entre agentes los cuales conducen a mejores respuestas de mercado (i.e. costo total de control de contaminadores de mercado esperado en general). Es de destacar, sin embargo, que la cooperación no está modelada explícitamente en este trabajo. Usando SDE para evolucionar un mercado a su equilibrio, es compatible con la descripción de Tesfatsion (TESFATSION and JUDD, 2006) referida a la búsqueda de un entendimiento normativo. La formulación de nivel-mercado requiere la solución de la optimización completa del problema dentro de un panorama multimodal y estocástico.

### 3.2.3 Algoritmo modificado diferencial evolutivo (MDE)

Para comprender las dinámicas de las interacciones en presencia de comportamientos menos cooperativos, el algoritmo MDE es desarrollado en base al fundamento económico de los intereses propios de los agentes y por tanto tienden a actuar estratégicamente de tal forma que ellos pueden extraer los mayores beneficios para ellos mismos ignorando si será socialmente óptimo. La figura (6) brinda una ilustración de cómo MDE trabaja para retratar el caso de cooperaciones menores entre intereses propios de agentes individuales. El proceso de reproducción artificial de nuevos mercados competidores es el mismo que en el algoritmo SDE. Nuevos agentes constituyen nuevos mercados y son creados por los operadores de cruce y mutación. El operador de selección, sin embargo, es aplicado al nivel del agente. La referencia de comparación entre un comprador en mercado  $M_i$  el mismo comprador en el mercado competidor  $M_t$  es el costo total de control de contaminadores esperado del comprador ( $E[BTCi]$ ). Para vendedores, el beneficio esperado ( $E[SPj]$ ) es usado como criterio de selección.

Si un comprador en el mercado de prueba incurre un menor control de costo esperado que el mismo comprador en el mercado objetivo, entonces el comprador en el mercado de prueba es elegido para estar en la próxima generación. De manera similar, si un vendedor en el resultado de mercado de prueba hace un beneficio mayor esperado que el mismo vendedor en el mercado objetivo, el vendedor en el mercado de prueba es colocado en la próxima generación. Los agentes sobrevivientes del resultado de mercado objetivo  $M_i$  y/o el resultado de mercado de prueba  $M_t$  son reorganizados en un nuevo resultado de mercado ( $M_{new}$ ) para la próxima generación. El nuevo resultado de mercado  $M_{new}$  incluye los agentes que adoptaron estrategias de comercio que provocan los más bajos costos individuales de control de contaminadores en el caso de compradores o el mayor beneficio individual en el caso de los vendedores. Los agentes en cada nuevo mercado están autorizados a interactuar de acuerdo al protocolo bilateral detallado anteriormente. La evolución del mercado es impulsada por la reorganización de los individuos más aptos dentro de las próximas generaciones aunque los agentes más aptos juntos no podrían constituir un mercado que es el más rentable. La evolución del mercado modelado en este sentido destaca la naturaleza individualista de los participantes del mercado y su actitud cooperativa, minimizando costos individuales y maximizando los beneficios individuales, estos son los motores para compradores y vendedores y no la meta de minimizar el costo total general de control de contaminadores del mercado.

### 3.3 Test de simulación

Una especificación de un objetivo ambiental es equivalente a una especificación de los requisitos de reducción por fuentes puntuales individuales. La distribución de obligaciones de reducción individual no es elegida de manera óptima sino experimentalmente.

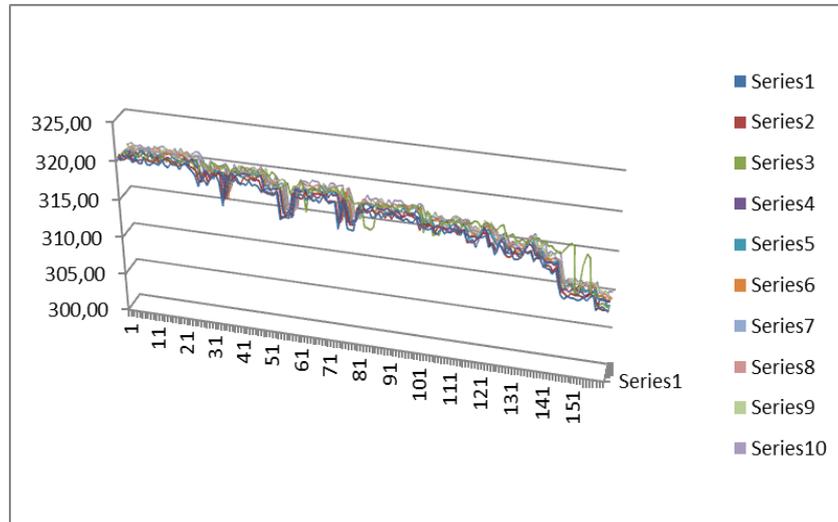


Figura 3: Simulaciones generadas mediante el algoritmo SDE

Se supone que los grandes contaminadores son sujetos a mayores regulaciones, por lo tanto, el mayor requerimiento de reducción, Asimismo, los contaminadores más pequeños están obligados a reducir un nivel más bajo de emisiones.

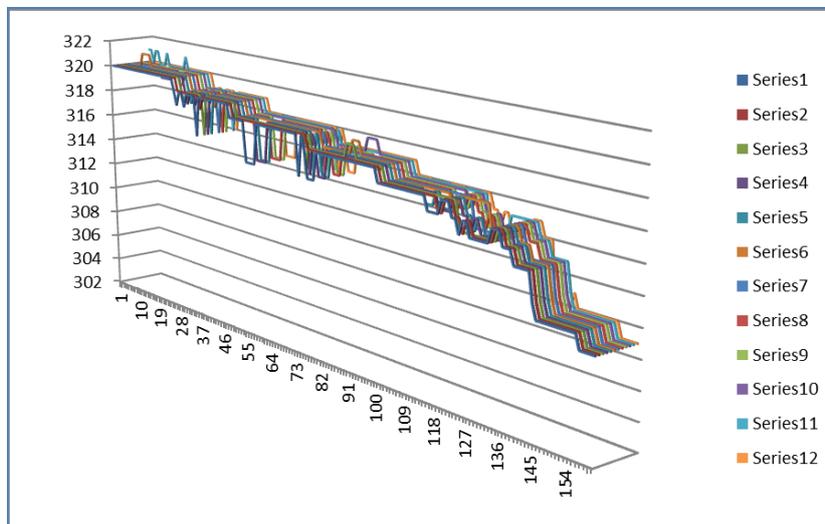
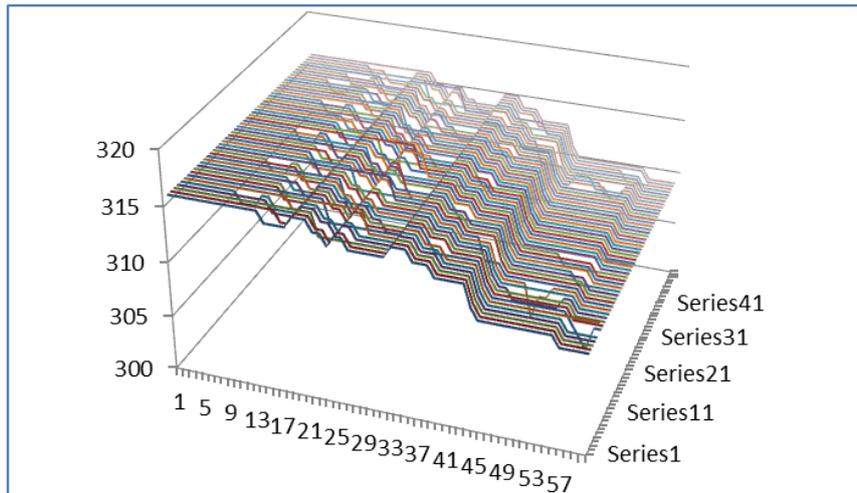


Figura 4: Simulaciones generadas mediante el algoritmo MDE

La evolución del mercado a su “mejor conocido” equilibrio es simulada en este trabajo por el uso del algoritmo diferencial simple y su versión modificada (SDE y MDE). La evolución del mercado a su “mejor conocido” equilibrio es simulada en este trabajo por el uso del algoritmo diferencial simple y su versión modificada (SDE y MDE). Los algoritmos genéticos son aplicados a la población de soluciones iniciales para cada conjunto de parámetros de mercado, implican algún patrón cooperativo en las interacciones entre agentes.



**Figura 5:** Distintos puntos de equilibrios obtenidos mediante el algoritmo MDE

Cada algoritmo, por lo tanto, provee un mapa separado de evolución de equilibrio de mercado y constituye un tratamiento experimental. Los dos tratamientos para los algoritmos evolutivos usados son Evolución Diferencial Standard (SDE) y Evolución Diferencial Modificada (MDE). Para facilitar la comprensión de esta dinámica, las salidas de los experimentos computacionales son, mostrados en las Figuras (3), (4) y (5). Los dos procesos evolutivos del mercado a su equilibrio son considerados para 10 series de datos (SDE) y luego para 12 series y finalmente para 50 series (MDE).

#### 4. Conclusiones y perspectivas

La evolución del mercado en equilibrio de calidad de agua es un gran desafío dada las significantes incertidumbres y relaciones no lineales entre resultados de mercado y las interacciones de los agentes en el mercado. La identificación del equilibrio robusto requiere de la solución de problemas de optimización de alta-dimensión, dentro de un problema no lineal y un escenario de costo estocástico. El comportamiento de los agentes es no trivial y en consecuencia es de esperar que muchas configuraciones iniciales de mercados fallen al intentar alcanzar un equilibrio robusto. Las simulaciones desarrolladas con los algoritmos SDE y MDE presentan una disminución del costo total en el control de la contaminación a partir de un número de interacciones y parecen converger a un promedio estadístico, luego de generar un número elevado de series de datos (50 series de datos), también se puede apreciar que el algoritmo MDE resulta de mejor desempeño que el SDE. Por ello se utiliza este para generar un mayor número de series.

Tengamos en cuenta que los individuos, además de maximizar su utilidad conforme a su interés particular, pueden mostrar distintas motivaciones sociales como la cooperación, la competición, la aversión a la inequidad y altruismo. Así, en determinadas circunstancias, como en este caso de estudio, puede ser relevante la aparición de una masa crítica de individuos que presenten una actitud cooperativa, a partir de la cual cada individuo que se decida a adoptar una actitud cooperativa haga que el bienestar general aumente. En estos tipos de modelos evolutivos, la racionalidad de los agentes económicos se manifiesta en la adopción de estrategias en la base de prueba y error (no repetir comportamientos con malos resultados) e imitación (copiar las estrategias exitosas de los demás agentes), si bien los agentes económicos artificiales diseñados, no tienen un comportamiento estrictamente racional, la población aprende cual es el equilibrio racional en la medida que desarrolla un proceso evolutivo, en este sentido el proceso evolutivamente estable es un equilibrio de Nash.

El concepto de estrategia evolutivamente estable establece una relación directa entre el payoff de una estrategia y la manera en que ésta se propaga en la población, es decir, el resultado del juego representa una ganancia (o pérdida) en términos de fitness para el jugador y la estrategia se transmite por herencia a su progenie. Sin embargo, la definición de estrategia evolutivamente estable no nos dice nada acerca de cómo se llega a tal situación de equilibrio. El concepto de mercado en equilibrio en este trabajo no debe ser interpretado en el sentido tradicional como un óptimo general. En lugar de eso, el mercado en equilibrio es el resultado “mejor conocido” que resulta “robusto” a las interacciones de los agentes bajo la presencia de incertidumbres de información, racionalidad limitada, decisiones complejas y reglas de comercialización implícitas en la estructura bilateral del mercado analizado. En futuros trabajos se incorporarán a estos modelos desarrollados, parámetros y variables medioambientales de nuestra zona, a fin de poder validar las simulaciones con datos de la realidad local y estudiar la problemática de un modo acorde a nuestra región.

## Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Pontificia Universidad Católica Argentina y a la Facultad de Química e Ingeniería del Rosario por financiar este proyecto de investigación y además al Profesor PhD Guillermo Marshall, Director del Laboratorio de Sistemas Complejos, dependiente del Departamento de Computación de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, por facilitarnos el acceso al mencionado laboratorio, con el fin de correr algunas de las simulaciones generadas.

## Referencias

- 1) BINMORE, Ken, **Games Theory. A very short introduction**, Ed. OXFORD University Press, New York, USA, 2007.
- 2) COLLENTINE, D., **Including Non-point Sources in a Water Quality Trading Permit Program**, Water Science & Technology, Vol. 51, No. 3-4, 2005, pp. 47-53, IWA Publishing.
- 3) DIXIT, Ken, **Optimization in Economic Theory**, Ed. OXFORD University Press, New York, USA, 1990.
- 4) DORFMAN, R., and JACOBY, H.D., **A Model of Public Decisions Illustrated by a Water Pollution Policy Problem**, Public Expenditures and Policy Analysis. Markham Publishing Co, 1970. in Haveman, R.H. and Margolis, J. (eds.)
- 5) FOLEY, J. and HAIMES, Y.Y., **Multilevel Control of Multi-pollutant Systems**, J. ASCE, Environmental Engineering Division, Vol. 99, No. EE3, June 1973, pp. 253-268.
- 6) HAIMES Y.Y., **Decomposition and Multilevel Techniques for Water Quality Control**, Water Resources Research, Vol. 8, No. 3, June, 1972, pp. 779-784.
- 7) HAIMES, Y.Y., FOLEY, J., and YU, W., **Computational Results for Water Pollution Taxation Using Multilevel Approach**, Water Resources Bulletin, Vol. 8, No. 4, 1972, pp. 761-772.
- 8) HAIMES, Y.Y., KAPLAN M.A., and HUSAR, M.A. Jr., **A Multilevel Approach to Determining Optimal Taxation for the Abatement of Water Pollution**, Water Resources Research, Vol. 8, No. 4, August 1972, pp. 851-860.
- 9) KENDRICK, D.A., RAO, H.S., and WELLS, C.H., **Water quality regulation with multiple polluters**, In Proc. 1971 Jt. Automatic Control Conf., Washington U., St. Louis, August 11-13 1971.
- 10) NGUYEN, Nga P., **A Stochastic Agent-Based Market Model for Water Quality Trading using Evolutionary Simulation Techniques**, Ph. D. Thesis, University of Pennsylvania, Pennsylvania, EEUU, 2009.
- 11) NGUYEN, N., SHORTLE, J., REED, P., and NGUYEN, T.T., **How well do water quality trading markets work with asymmetric information, uncertainty and transaction costs?**, Nov.24,2013, Global Water Forum: [www.globalwaterforum.org](http://www.globalwaterforum.org)
- 12) OSTROM, E., GARDNER, R., and WALKER J., **Rules, Games, and Common-pool Resources**, Ed. The University of Michigan Press, Michigan, USA, 2006.
- 13) PRICE, K.V., and STORN, R.M., **Differential Evolution. A practical Approach to Global Optimization**, Ed. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- 14) SOLOW, R.M., **The economist's approach to pollution and its control**, Science, 173(3996), 1971.
- 15) SHORTLE, J.S., and ABLER, D.G., **Environmental Policies for agricultural pollution control**, Ed. CABI Publishing, New York, USA, 1993.
- 16) TESFATSION Leigh and JUDD Kenneth L., **Handbook of Computational Economics, Volume 2: Agent-based Computational Economics**, Ed. Elsevier, The Netherlands, 2006.
- 17) TIETENBERG, T., and LEWIS L., **Environmental and Natural Resource Economics**, 10<sup>th</sup> Edition, Ed. Pearson Education, New York, USA, 2015.
- 18) VARAIYA Pravin, **Lecture Notes on Optimization**, Ed. University of Berkeley, California, USA, 2007.