

# Sistema multiagente para la monitorización del intercambio de CO<sub>2</sub> entre la superficie del agua y la atmósfera

J. M. Corchado\*, J. Aiken\*\* J. Bajo\*\*\*  
corchado@usal.es, jai@mail.pml.ac.uk, jbajope@upsa.es

\* *Universidad de Salamanca. Dpto. Informática y automática  
Plaza de la Merced s/n. 37008 Salamanca*

\*\* *Plymouth Marine Laboratory. Centre for Air-Sea Interactions and fluxes Prospect Place.  
Plymouth PL1 3 DH. U.K.*

\*\*\* *Universidad Pontificia de Salamanca. Facultad de Informática. Salamanca*

## RESUMEN

Las técnicas de teledetección han permitido grandes avances en el estudio de la interacción existente entre la atmósfera y la superficie marina. Dicha interacción, y más concretamente el intercambio de CO<sub>2</sub>, es un factor determinante en el comportamiento climático. En este artículo se presenta un modelo de sistema multiagente que, basándose en la utilización de agentes deliberativos que incorporan sistemas de razonamiento basado en casos, permite modelar y evaluar la interacción mar-aire de forma automática.

**PALABRAS CLAVE:** agente CBR-BDI, Gaia, matriz sensitiva jacobiana.

## ABSTRACT

During the last decades there have been big advances in the study of the interaction between the atmosphere and the ocean surface. Remote sensing is a new source of a great amount of data that must be analysed. The CO<sub>2</sub> flux is a dominant factor in climatology dynamics. This paper presents a multiagent system model based on deliberative agents that incorporate case based reasoning systems, developed for the analysis and evaluation of the interaction between ocean water masses and the atmosphere.

**KEY WORDS:** CBR-BDI Agent, Gaia, jacobian sensitive matrix.

## INTRODUCCIÓN

En este artículo se presenta un sistema multiagente (SMA) para la monitorización y la evaluación del intercambio de CO<sub>2</sub> existente entre la atmósfera y la superficie de las aguas oceánicas, basado en la utilización de los datos obtenidos a través de técnicas de teledetección. Los SMAs son aplicaciones informáticas distribuidas con autonomía y cierto grado de "inteligencia". Estos grandes sistemas están compuestos por unidades pequeñas llamadas agentes. Un agente es una entidad que debe tener ciertas características, tales como autonomía, situación, reactividad, proactividad, habilidad social, aprendizaje, movilidad u organización (Wooldridge y Jennings, 1995). Estas capacidades pueden modelarse de distintas formas. Por ejemplo la capacidad de

proactividad o razonamiento puede modelarse utilizando sistemas de razonamiento basado en casos (CBR). Hoy en día es un hecho la creciente utilización de los agentes y sistemas multiagente para el desarrollo de aplicaciones en entornos dinámicos y flexibles tales como la web, sistemas de control, robótica, etc. Las características del problema que se presenta en la siguiente sección, hacen que parezca adecuada la utilización de SMAs para la generación de modelos dinámicos de forma automática, así como para el manejo y utilización de datos obtenidos mediante teledetección. En la tercera sección se presenta el SMA diseñado para modelar la interacción mar-aire. La cuarta sección se dedica al agente que modela la interacción. Por último, en la quinta sección se presentan los resultados preliminares obtenidos.

## INTERACCIÓN ENTRE EL AIRE Y EL AGUA OCEÁNICA

Uno de los factores más preocupantes que influyen en el comportamiento climatológico es la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera. El CO<sub>2</sub> es uno de los gases de efecto invernadero, que contribuye a que la Tierra tenga una temperatura habitable, siempre y cuando se mantenga en unas cantidades determinadas (Sarmiento y Dender, 1994). Tradicionalmente se ha considerado que el principal sistema regulador de la cantidad de CO<sub>2</sub> en la atmósfera es la fotosíntesis y respiración realizado por las plantas. Sin embargo, y especialmente gracias a la utilización de técnicas de teledetección se ha descubierto que el papel que juega el océano en la regulación de las cantidades de carbono es muy importante y es una magnitud que permanece indefinida (Takahashi *et al.*, 1993). La tecnología actual permite obtener datos y realizar mediciones impensables hasta hace poco tiempo. Estos datos proporcionan conocimiento sobre las fuentes de origen y disminución de CO<sub>2</sub> así como de sus causas (Lefevre *et al.*, 2002), lo que supone la posibilidad de realizar predicciones sobre el comportamiento futuro del CO<sub>2</sub>.

El sistema multiagente que se presenta tiene como objetivo modelar el flujo de CO<sub>2</sub> intercambiado entre la atmósfera y las aguas de la superficie oceánica. Los principales parámetros a tener en cuenta a la hora de modelar dicho intercambio son: la temperatura del agua y del aire, la salinidad del agua, las presiones atmosféricas e hidrostáticas, la presencia de nutrientes y el vector velocidad del viento (en módulo y dirección). Estos parámetros pueden obtenerse desde barcos oceanográficos o a través de imágenes de satélite.

## SISTEMA MULTIAGENTE

El objetivo final de este proyecto es construir un gran sistema multiagente que se divida en subsistemas, de tal forma que cada elemento se encargue de modelar el intercambio de CO<sub>2</sub> en una zona del océano con unas determinadas características. Cada subsistema se comunicará con el resto de los subsistemas, obteniendo un intercambio de información que ayude a la creación de modelos.

Por el momento se ha desarrollado el prototipo correspondiente al subsistema mostrado en la Figura 1, en la que es posible observar como un agente

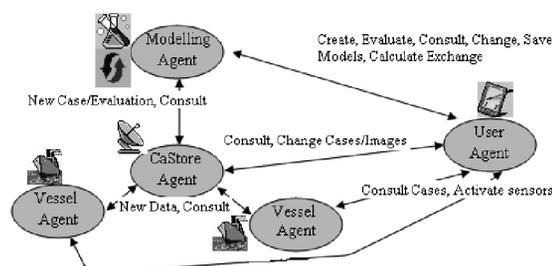


Figura 1. SMA para una zona concreta del Océano.

Modelling se encarga de la creación y evaluación de modelos en función de los datos recibidos desde los agentes Store, Vessel o User. De esta forma es posible monitorizar y predecir el intercambio de CO<sub>2</sub>. El agente Store se encarga de procesar las imágenes de satélite y transformarlas para que el sistema pueda utilizarlas. Cada agente Vessel se instala en un navío y recoge información in-situ que permite evaluar los modelos creados por el agente Modelling. El agente usuario puede interactuar con cualquier agente.

El subsistema se modela en términos de agentes y, para ello, se ha utilizado la metodología de análisis y diseño (Wooldridge, 2000) A través de Gaia se consigue un análisis del problema utilizando criterios de organización y un posterior diseño. Partiendo de los requisitos del problema planteado se decide utilizar seis roles: El rol STORING se encarga de obtener y almacenar datos de carácter permanente en las bases de datos. El rol PROCESSING transforma las imágenes de satélite en casos. El rol DATACAPTURING obtiene datos de los Vessels. El rol CONSTRUCT A PARTIAL CO<sub>2</sub> MODEL se ocupa de generar modelos. El rol OBTAINCO<sub>2</sub> EXCHANGE calcula la tasa de intercambio de CO<sub>2</sub> utilizando los modelos disponibles. El rol AUTOEVALUATION evalúa un modelo contrastando sus resultados con datos reales obtenidos por los sensores de los Vessels. El rol PROCESSING INFORMATION permite que un usuario pueda interactuar con el sistema. Por otro lado con el modelo de interacción es posible obtener las dependencias y relaciones que existen entre roles. En cuanto al diseño Gaia, se consideran tres modelos: modelo de agentes, modelo de servicios y modelo de confianza (Wooldridge, 2000). La Figura 2 muestra el modelo de agentes para nuestro sistema. Cada agente se encarga de jugar una serie de roles. Por ejemplo el agente Store se va a encargar de realizar los roles STORING y PROCESSING, y en tiempo de ejecución será necesario tener al menos una instancia del rol STORING y otra del rol PROCESSING.

Sistema multiagente para la monitorización del intercambio de CO<sub>2</sub> entre la superficie del agua y la atmósfera

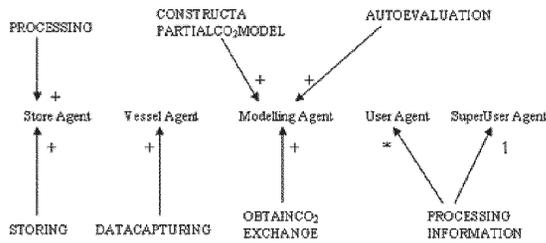


Figura 2. Modelo de agentes Gaia para nuestro SMA.

### AGENTE CBR-BDI

El componente principal de la arquitectura propuesta es el agente encargado de generar modelos. Se trata de un agente deliberativo BDI (Wooldridge y Jennings, 1995) que utiliza un sistema CBR como motor de razonamiento. De esta forma la generación de un modelo supone la ejecución de un ciclo CBR formado por cuatro etapas secuenciales: retrieval, reuse, revise and retain. La forma de implantar el ciclo CBR dentro de un agente BDI consiste en que el agente BDI ejecute las etapas del ciclo CBR como capacidades (Glez-Bedia *et al.*, 2002). Un agente BDI posee capacidades (funcionalidades que el agente es capaz de realizar por sí mismo sin necesidad de contactar con otros agentes) y ofrece servicios a otros agentes. El agente Modelling ofrece cuatro servicios (Obtain Exchange, Obtain Model, Obtain Evaluation y Construct Model) y posee seis capacidades (Forecast Exchange Rate, Evaluate Model, Consult Model, Jacobean Sensivity Matriz - JSM, Pondered Weigh Technique - PWT y Revision Simulated Equation - RSE). Las tres últimas capacidades constituyen el ciclo CBR, y su funcionamiento es el que a continuación pasa a describirse.

En la etapa de recuperación la capacidad JSM obtiene aquellos casos con una descripción de problema más similar al caso actual (Montaño y Palmer, 2002). Se utiliza una red neuronal que permite obtener las componentes principales de la memoria de casos, y conocer aquellas variables de entrada (que forman la descripción del problema) que tienen mayor influencia a la hora de crear clusters. Si consideramos JSM una matriz NxM, el elemento S<sub>ki</sub> en la matriz representa la sensibilidad (influencia) de la salida k sobre la entrada i:

$$S_{ki} = \frac{\partial y_k}{\partial x_i} = \frac{\partial f_k(net_k)}{\partial x_i} = \frac{\partial f_k(net_k)}{\partial net_k} \left( \sum_{j=1}^H w_{kj} \frac{\partial f_j(net_j)}{\partial net_j} w_{ji} \right)$$

donde w<sub>ij</sub> es el peso de la conexión entre la neurona de entrada i y la neurona oculta j. w<sub>kj</sub> es el peso de la conexión entre la neurona oculta j y la neurona de salida k. y<sub>k</sub> es la salida de la neurona k de la capa de salida y<sub>k</sub> = f<sub>k</sub>(net<sub>k</sub>), y y<sub>j</sub> es la salida de la neurona j de la capa oculta y<sub>j</sub> = f<sub>j</sub>(net<sub>j</sub>). f<sub>j</sub> es la función de activación de la neurona h y

$$net_j = \sum_{i=1}^N w_{ji} x_i + \theta_j \quad net_k = \sum_{j=1}^H w_{kj} y_j + \theta_k$$

siendo H el número de neuronas de la capa oculta, y θ<sub>j</sub> y θ<sub>k</sub> los umbrales permitidos. Una vez obtenidas las componentes principales se busca en la memoria de casos aquellos que tengan componentes principales más similares a la descripción del problema actual. Para ello se utiliza un algoritmo de similitud basado en la función coseno.

En la etapa de adaptación se combinan las soluciones de los casos similares recuperados para obtener una solución adecuada al problema actual. Se efectúa mediante la capacidad PWT, en la que los casos se ponderan (Montaño y Palmer, 2002) y se asigna el mayor peso al caso con una descripción de problema más similar.

$$p^* = \frac{1}{\sum_{r=1}^Z e^{-|a-r|}} \sum_{r=1}^Z e^{-|a-r|} p^r$$

donde p\* es la predicción, Z el número de casos similares y p<sup>r</sup> son las predicciones (soluciones) correspondientes a cada caso pasado, a es la medida de mínima similitud para los casos recuperados y r es la medida de similitud para el caso r-ésimo. Se utiliza una red neuronal que se entrena con los casos similares recuperados y sus respectivas soluciones. Una vez entrenada se le proporciona el caso actual y se obtiene su solución.

En la etapa de revision cada modelo se revisa en la capacidad RSE. Para ello se utiliza la ecuación

$$F = k \cdot s \cdot (pCO_{2SW} - pCO_{2AIR})$$

con los coeficientes de intercambio de Wanninkhof (Wanninkhof, 1992).

Finalmente, en la etapa de aprendizaje se compara el valor F con el valor de la predicción. Si la diferencia es inferior al 10%, el caso se almacena en la memoria de casos.

Nuestros agentes trabajan con casos. Un caso es una experiencia pasada, que incluye una descripción

J. M. Corchado, J. Aiken y J. Bajo

del problema, la solución que se utilizó para resolverlo y el resultado obtenido. El agente BDI utiliza sus estructuras internas para representar estos conceptos: creencias, deseos e intenciones. Creencias para representar la descripción del problema, en este caso una creencia de tipo ProblemDescription. El sistema necesita transformar las imágenes de satélite. Para ello el agente Store utiliza algoritmos (Lavender *et al.* 2004; Dransfeld *et al.*, 2005) y obtiene una descripción de problema como la mostrada en la Tabla 1 (Anexo): fecha, latitud, longitud, salinidad, clorofila, viento, presiones parciales y temperaturas. Deseos para representar las metas que el agente persigue, en este caso predecir el flujo de CO<sub>2</sub> intercambiado, calcular los mejores parámetros de predicción para distintos tamaños de ventana, y calcular la mejor ventana de predicción para un determinado % de error máximo permitido. Intenciones o secuencias de acciones seguidas para alcanzar una o varias metas en función de las creencias de las que se dispone.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El sistema descrito ha sido construido como un prototipo autónomo que comenzó a funcionar en mayo de 2004. A pesar de que el sistema no se encuentra totalmente operativo, los resultados iniciales han sido muy satisfactorios desde los puntos de vista técnico y científico. La construcción del sistema distribuido ha sido relativamente fácil gracias a la utilización de bibliotecas CBR-BDI previamente desarrolladas (Corchado y Laza, 2003; Corchado *et al.*, 2005; Bajo y Corchado, 2005). Desde el punto de vista de la ingeniería del software, Gaia (Wooldridge, 2000) proporciona un marco adecuado para el análisis y diseño de sistemas distribuidos basados en agentes. El formalismo definido en (Glez-Bedia *et al.*, 2002) facilita un paso directo entre la definición de agente y la construcción CBR. La utilización de dispositivos inalámbricos tales como PDAs facilita la labor de los usuarios, permitiendo movilidad e independencia de la localización física para interactuar con el sistema.

El sistema ha sido probado bajo condiciones de simulación de forma que los agentes Store y Vessel se han construido incluyendo simuladores que generan casos a partir de los datos reales obtenidos en el Océano Atlántico ( $\pm 37N$ ,  $25W$ ). Bajo estas condiciones los modelos propuestos por el sistema multiagente han sido cada vez más precisos. La Figura 3 muestra una comparativa entre los datos reales y las predicciones realizadas por el SMA trabajando con datos mensuales de 2003-2004.

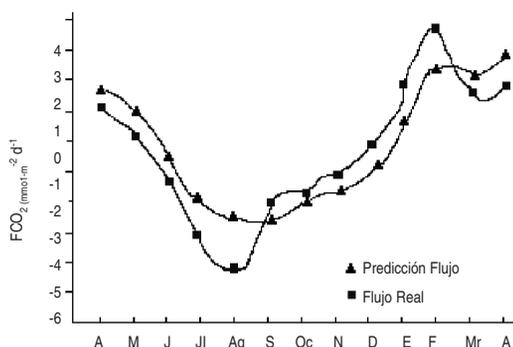


Figura 3. Flujo real de CO<sub>2</sub> y predicción de flujo.

Como puede observarse en la Figura 3 las predicciones realizadas por el SMA son bastante precisas (9 de los 12 modelos fueron aceptados como válidos). El SMA realiza predicciones basándose en la experiencia y en la similitud con situaciones pasadas. Claramente la precisión de las predicciones es más efectiva a medida de que el número de casos disponibles aumente. Por otro lado es necesario controlar que el número de casos manejado no sea muy elevado, ya que la eficiencia del sistema disminuye. Para ello se ha utilizado un sistema de prioridades basado en crear una pirámide de eficiencias que permite clasificar los casos en base a la evaluación obtenida.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias a los proyectos MCYT TIC2003-07369-C02-02 y CASIX de PML.

## BIBLIOGRAFÍA

- BAJO, J. y CORCHADO, J. M. 2005. Evaluation and monitoring of the air-sea interaction using a CBR-Agents approach. *LNAI 3620*. Springer Verlag, pp. 50-62.
- CORCHADO, J. M. y LAZA, R. 2003. Constructing Deliberative Agents with Case-based Reasoning Technology. *Int. J. Intelligent Systems* 18 (12): 1227-1241.
- CORCHADO, J. M., AIKEN, J., CORCHADO, E., LEFEVRE, N. y SMYTH, T. 2004 *Quantifying the Ocean's CO<sub>2</sub> Budget with a CoHeL-IBR System*. 7th European Conference on Case-based Reasoning, Lecture Notes in Computer Science, LNAI 3155, Springer Verlag, pp. 533-546.

- CORCHADO, J. M., CORCHADO, E. S., AIKEN, J. y RIVEROLA, F. 2005. Evaluating the air-sea interactions and fluxes using an instance-based reasoning system. *AI Communications* 18: 247-256.
- DRANSFELD, S., TATNALL, A. R., ROBINSON I. S. y MOBLEY, C. D. 2005. Prioritizing ocean colour channels by neural network input reflectance perturbation. *Int. J. Remote Sensing* 26 (5): 1043-1048.
- GONZÁLEZ-BEDIA, M., CORCHADO, J. M., CORCHADO, E. S. y FYFE, C. 2002. Analytical Model for Constructing Deliberative Agents, *Engineering Intelligent Sys.* 3: 173-185.
- LAVENDER S. J., PINKERTON M H., FROIDEFOND J. M., MORALES J., AIKEN J. y MOORE J. F. 2004. SeaWiFS validation in European coastal waters using optical and bio-geochemical measurements. *Int. J. Remote Sensing* 25 (7-8): 1481-1488(8)
- LEFEVRE, N., AIKEN, J., RUTLLANT, J., DANERI, G., LAVENDER, S. y SMYTH, T. 2002. Observations of pCO<sub>2</sub> in the coastal upwelling off Chile: Sapatial and temporal extrapolation using satellite data. *J. Geophys. Res.* 107, no. 0.
- MONTAÑO, J. J y PALMER, A. 2002. Artificial Neural Networks, opening the black box. *Metodología de las Ciencias del Comportamiento* 4 (1): 77-93.
- SARMIENTO J. L. y DENDER M. 1994. Carbon biogeochemistry and climate change. *Photosynthesis Res.* 39: 209-234.
- TAKAHASHI, T., OLAFSSON, J., GODDARD, J. G., CHIPMAN, D. W. y SUTHERLAND, S. C. 1993. Seasonal Variation of CO<sub>2</sub> and nutrients in the High-latitude surface oceans: a comparative study. *Global Biogeochem. Cycles* 7 (4): 843-878.
- WANNINKHOF, R. 1992. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean. *J. Geophys. Res.* 97, 7, 373-7, 383.
- WOOLDRIDGE, M. y JENNINGS, N. R. (1995) Agent Theories, Architectures, and Languages: a Survey. En: *Intelligent Agents*, Wooldridge y Jennings Eds. Springer-Verlag, pp. 1-22.
- WOOLDRIDGE, M., JENNINGS, N. R. y KINNY, D. 2000. The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design. *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 3 (3): 285-312.

### Anexos

Case Field	Measurement
DATE	Date (dd/mm/yyyy)
LAT	Latitude (decimal degrees)
LONG	Longitude (decimal degrees)
SST	Air Temperature (°C)
SSTSea	Sea Temperature (°C)
S	Salinity (unitless)
WS	Wind strength (m/s)
WD	Wind direction (unitless)
Fluo_calib	fluorescence calibrated with chlorophyll
SW pCO <sub>2</sub>	surface partial pressure of CO <sub>2</sub> (micro Atm)
Air pCO <sub>2</sub>	air partial pressure of CO <sub>2</sub> (micro Atm)
Flux of CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> exchange flux (Moles/m <sup>2</sup> )

**Tabla 1.** Atributos de un caso.