

CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CARBONO PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO: MODELO DE OPTIMIZACIÓN APLICADO A BRASIL

Ernesto D.R. SANTIBAÑEZ GONZÁLEZ

Departamento de Computação, Universidade Federal de Ouro Preto, Morro do Cruzeiro s/n, Ouro Preto, MG.
Brasil
Correo electrónico: santibanez.ernesto@gmail.com

(Recibido marzo 2013; aceptado mayo 2014)

Palabras clave: cambio climático, captura y almacenamiento de CO₂, optimización lineal

RESUMEN

Uno de los temas más investigados actualmente es el problema del cambio climático y sus consecuencias para la economía mundial. En este artículo investigamos la captura y almacenamiento de CO₂ (CCS, por sus siglas en inglés), como una de las estrategias tecnológicas propuestas por la comunidad científica para mitigar el cambio climático. Presentamos un modelo de programación lineal mixta entera para diseñar la red de una cadena de suministros que permita realizar la captura y almacenamiento de CO₂ considerando los aspectos técnicos y económicos del problema. Usamos el modelo propuesto para estudiar el caso de la industria del cemento en Brasil. Proponemos dos escenarios de reducción de CO₂: 5 Mt y 10 Mt por año. Presentamos las conclusiones respecto a las inversiones necesarias para alcanzar esas reducciones, la aplicabilidad del modelo, las plantas de captura de CO₂ que deben ser instaladas, los reservorios geológicos que deben activarse y las redes de tuberías para transporte de CO₂ que deben construirse.

Key words: climate change, carbon capture and storage, linear optimization

ABSTRACT

Currently, climate change and its consequences for the world economy have attracted a lot of multidisciplinary research. In this article, we study the carbon capture and storage (CCS) problem as one of the technological alternatives proposed by the scientific community to mitigate climate change. We present a mixed integer linear programming model to design the infrastructure supply chain network that makes possible the capture and storage of carbon, considering both, the technical and economic aspects involved in the problem. We use the proposed model to study the case of the cement industry in Brazil. Two scenarios of CO₂ reductions are considered: 5 Mt and 10 Mt per year. In addition, regarding the required investments to reach the desired reductions, a synthesis of the findings is reported, which includes the reservoirs to be activated as well as the pipeline networks that should be constructed.

INTRODUCCIÓN

Para la comunidad mundial, el cambio climático es una de las preocupaciones más importantes que existen hoy en día, pues sus consecuencias van más allá de empresas o países, afectando la economía mundial, el ambiente y la salud de la población. El calentamiento global, como resultado del constante aumento de las concentraciones de carbono (CO_2) en la atmósfera, ha sido uno de los temas interdisciplinarios más debatidos en los últimos tiempos. Para resolver este problema y alcanzar niveles aceptables de CO_2 en la atmósfera es necesario el esfuerzo interdisciplinario de la sociedad científica en la implementación de tres acciones mitigantes: (1) mejorar la eficiencia en la generación de energía, (2) reemplazar fuentes de energía por otras con menores niveles de emisión de CO_2 y (3) secuestrar (almacenar) CO_2 . Sin duda, el éxito depende de la implementación coordinada de estas tres opciones.

En este artículo atacamos el problema de la captura y almacenamiento de CO_2 como una de esas estrategias para mitigar el calentamiento global. Para tener una idea del esfuerzo que demanda la implementación de esta estrategia consideramos algunos datos de referencia. En el escenario base se espera que las emisiones de CO_2 equivalente (CO_{2e} , una composición de gases que causan el efecto invernadero y que considera el CO_2) aumenten de las 40 Gt CO_{2e} (año base 2002) por año a las 53 Gt CO_{2e} aproximadamente para el año 2020 (IEA 2009). Para reducir las emisiones de CO_2 en 3.7 Gt CO_2 sería necesario capturar y secuestrar las emisiones de CO_2 equivalentes a un conjunto de plantas de carbón con capacidad para generar 800 GW (Pacala y Socolow 2004). Esta cifra es 2.5 veces mayor que la capacidad total de generación de las plantas de carbón de los Estados Unidos considerando como año base 2010 (EIA 2011).

De manera resumida, el problema tecnológico de captura y almacenamiento de CO_2 (CCS) consiste de tres etapas básicas (1) capturar las emisiones de CO_2 desde diferentes fuentes como plantas generadoras de electricidad en base carbón, empresas de gas o petróleo, productoras de cemento, acero y/o fierro, refinerías de petróleo, entre otras, (2) comprimir y transportar el CO_2 capturado y (3) inyectarlo y almacenarlo en diferentes reservorios geológicos, los cuales pueden ser, acuíferos salinos a grandes profundidades en la tierra, pozos agotados de petróleo o gas y pozos profundos en el océano. En este trabajo consideramos que la tecnología para CCS existe, como se muestra en los trabajos de Middleton y

Bielicki (2009a), Klokk *et al.* (2010) y Keating *et al.* (2011). Por tanto, estamos interesados en diseñar la red de una cadena de suministro (SC, por sus siglas en inglés) en los términos definidos por Klibi *et al.* (2010), que permita capturar y almacenar CO_2 con las mínimas inversiones en los costos de operación y de transporte, necesarias para cumplir con el objetivo de reducir las emisiones de CO_2 . Planteamos el diseño de esta red como un problema de programación lineal entero-mixto (MILP, por sus siglas en inglés). El enfoque que usamos para modelar el diseño de la red puede compararse en ciertos aspectos al empleado para los problemas de localización de instalaciones y de diseño de redes capacitadas (Melkote y Daskin 2001). La relación de este tema con otros citados en la literatura, como es el caso de la optimización de redes con costo fijo y los de localización, se enmarca dentro de los problemas de la clase NP-hard. La problemática de CCS ha sido abordada de acuerdo con sus diferentes directrices con metodologías específicas (MIT CCSTP 2007). Asimismo, existen autores que han propuesto modelos matemáticos en los que integran el uso de sistemas de información (Middleton *et al.* 2012). Sin embargo, todavía hace falta investigación sobre modelos matemáticos que consideren la complejidad real en el diseño de la red de una cadena de suministro para CCS. De manera general, se deberían considerar múltiples fuentes emisoras de CO_2 , así como alternativas de caminos para transportar el CO_2 capturado desde un punto a otro, diferentes dimensiones de tuberías para realizar la transferencia del CO_2 , opciones de sitios geológicos que funjan como reservorios y sus capacidades para almacenarlo, inversiones que pueden ser realizadas en un horizonte de planificación de varios años e incertidumbre respecto de las capacidades de los sitios disponibles para almacenar el CO_2 , entre otros.

El modelo que proponemos en este artículo considera los resultados de investigaciones previas y amplía, en algunos aspectos, los trabajos realizados por Middleton y Bielicki (2009b) y Middleton *et al.* (2012). Para validar el modelo propuesto realizamos un estudio de caso basado en la industria del cemento en Brasil.

En comparación con investigaciones anteriores podemos decir que en este artículo presentamos dos importantes contribuciones: (1) formulamos un modelo MILP alternativo que limita la cantidad de fuentes de almacenamiento (reservorios) de CO_2 que pueden ser abiertas. Hasta el momento, no existen modelos MILP que analicen e integren el impacto de esas limitaciones sobre el diseño de la red de una

cadena de suministro para CCS, (2) es la primera vez que en Brasil se analiza y valida un modelo MILP de captura y almacenamiento de CO₂. Los datos utilizados en la simulación del modelo para la industria del cemento en Brasil fueron reales para algunos estados del país.

El artículo aborda los siguientes temas: una sección en la que explicamos en qué consiste el problema de diseño de la red de una cadena de suministros para la captura y almacenamiento de CO₂. Posteriormente presentamos una revisión de la literatura sobre el tema. Más adelante formulamos el modelo matemático para el problema de diseño que tratamos en este trabajo. Asimismo, discutimos la aplicación del modelo para un caso de estudio en la industria del cemento de Brasil para, finalmente, presentar las conclusiones del trabajo.

EL PROBLEMA DE DISEÑO DE LA RED DE UNA CADENA DE SUMINISTRO PARA CCS

En este artículo estudiamos el diseño de la red de una cadena de suministro para CCS como una de las alternativas para ayudar a resolver el problema de calentamiento global producido por las emisiones de CO₂. El planteamiento considera la identificación de algunos datos básicos como los siguientes: (1) demanda: definida como la cantidad de emisiones de CO₂ que debe ser reducida, es decir, que no sea emitida a la atmósfera, (2) oferta: caracterización de las diversas fuentes emisoras del gas, que están geográficamente dispersas; cada una con un potencial de emisión de CO₂ y por tanto con un límite de emisiones que pueden ser reducidas, (3) fuentes de demanda: identificamos los diversos lugares potenciales (reservorios) geográficamente dispersos donde puede ser inyectado y atrapado el CO₂, cada uno con una capacidad de almacenamiento, (4) identificamos diferentes tipos de tuberías factibles de transportar el CO₂, las cuales se diferencian por su diámetro y capacidad de transporte y (5) caracterizamos las trayectorias posibles (rutas) entre las fuentes que emiten CO₂ y los sitios que potencialmente pueden almacenarlo.

Con esta información establecemos el siguiente razonamiento matemático: (a) decidir qué fuentes de emisión activar y cuánto CO₂ capturar de esas fuentes, (b) qué sitios potenciales de captura de CO₂ activar y la capacidad necesaria, (c) qué tipo de tuberías usar y (d) qué rutas construir. Para ello, el modelo debe disminuir las emisiones de CO₂ en la cantidad (demandada) establecida, minimizando (1)

las inversiones necesarias para la habilitación de las fuentes de emisiones, sitios de captura, compra de tuberías y construcción de caminos en conjunto con (2) los costos de operación de cada fuente y reservorio y con (3) los costos de transporte.

Desde el punto de vista práctico las fuentes de emisión de CO₂ son diversas, incluyendo generadoras de electricidad con base en gas y petróleo, empresas productoras de cemento, fierro y acero, refinerías de petróleo, entre otras. En el caso de los reservorios potenciales para captura de CO₂, estos pueden ser acuíferos salinos ubicados en el subsuelo a unos 800 m de profundidad, yacimientos de explotación de gas o petróleo ya agotados, o depósitos profundos en el mar. En relación con las trayectorias o rutas posibles para conectar una fuente de emisión con un reservorio para secuestro de CO₂, éstas dependen de la geografía del terreno, de la existencia de lagos, ríos, montañas y zonas urbanas, entre otros factores. Cada uno de esos factores puede tener incidencia en el precio de construcción. En algunos casos se tendrán que considerar los costos de expropiar o arrendar algunas áreas por donde pasarían las tuberías que transportarán el CO₂, como sucede actualmente en la industria de transporte de petróleo y gas.

En este artículo nos centramos en el modelaje y solución del problema desde un enfoque matemático, con la idea de que sirva como punto de partida para futuras discusiones sobre las alternativas tecnológicas viables para capturar, comprimir, transportar y almacenar CO₂, entre otros importantes aspectos. El modelo propuesto es generalista, lo que permitirá manipular diferentes estructuras de costos, sin importar la forma práctica en que éstos sean calculados. En dicho modelo cada factor es considerado como un insumo: los costos, el número, la ubicación y la capacidad de cada fuente emisora de CO₂, el sitio del reservorio potencial, la trayectoria y el tipo de tubería para transportar el CO₂.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

Diversos autores han abordado el diseño de una red para CCS, centrándose en algunos aspectos del problema ya sea en forma aislada, simplificando el problema, o integrando varias perspectivas en el análisis. Para resumir esos trabajos, sin pretender discutir todos ellos, podemos clasificarlos de la siguiente forma:

(1) Modelos para evaluación de proyectos de inversión. Donde encontramos trabajos con metodologías simples centradas en la evaluación técnica y

económica de un proyecto de inversión para resolver el problema de transporte e inyección de CO₂. Por ejemplo, en MIT CCSTP (2007, 2009), se toman en cuenta las fuentes emisoras y los sitios para almacenar el CO₂ y se dimensionan los diámetros de las alternativas de tuberías. La conclusión para resolver el problema de CCS fue definir rutas directas de conexión entre las fuentes emisoras y los sitios para secuestro de CO₂ a través de la construcción e instalación de tuberías entre la fuente emisora y el reservorio a expensas de la cantidad máxima que se puede secuestrar en el destino o capturar en la fuente. Por otro lado, una vez definidos los costos de instalación, de construcción, de transporte, de operación y de un horizonte de planificación, se evaluó el proyecto de inversión a través de una tasa de descuento de referencia. En este trabajo no es propuesto un modelo matemático que considere simultáneamente los múltiples aspectos del problema, como la combinación de distintas soluciones fuente-reservorio con diferentes soluciones viables de trayectorias para unir cada par fuente-reservorio con distintos tipos de tuberías (Energy 2010). En el trabajo mencionado (MIT CCSTP 2007, 2009) definen una ruta central con alta capacidad de transporte entre dos puntos, uno de esos puntos está localizado cerca de las fuentes emisoras y es el que colecta el CO₂ que viene de esas fuentes, y otro punto de destino intermedio, localizado cerca de los reservorios de destino para secuestrar el CO₂. La opción en este caso fue construir una trayectoria con una tubería de gran capacidad entre esos puntos intermedios. Cada una de las fuentes emisoras se conecta al punto intermedio más próximo a través de tuberías de menor capacidad de transporte de CO₂. Lo mismo se realiza en la trayectoria de los reservorios de destino.

(2) Modelos de programación lineal entera. Estos trabajos consideran el uso de modelos de programación lineal (PL) y MILP para definir la red de tuberías, con sus distintas dimensiones y capacidades, que permitirá capturar el CO₂ en las fuentes y transportarlo hasta los destinos donde será almacenado. Esta fue justamente la línea que seguimos en esta investigación. Uno de los trabajos que abordan este tema es el de Middleton y Bielicki (2009b), en el que propusieron un MILP para su análisis matemático. Ellos describen el sistema de infraestructura escalable –llamado SimCCS– que utiliza un modelo MILP para realizar una optimización geoespacial y económica para diseñar la red CCS. El MILP propuesto por los autores determina la infraestructura de redes de tuberías que debe ser construida y operada para

capturar, transportar y secuestrar un definido volumen de CO₂. El modelo es estático, es decir, no considera un horizonte de planificación y es determinista, pues no toma en cuenta el grado de incertidumbre en alguno de los aspectos del planteamiento. Sin embargo, el modelo permite decidir la cantidad y la fuente emisora para capturar CO₂, así como el reservorio en el que se inyectará el CO₂ y la cantidad que se secuestrará. Otros aspectos, como dónde construir la red de tuberías, la trayectoria que debe seguir, su capacidad (diámetro) y el cálculo de los menores costos de inversión, construcción, operación y transporte para el nivel definido de captura de CO₂, también son considerados en el modelo. Dicho modelo fue presentado y aplicado por los autores para resolver un problema hipotético de diseño de red CCS en el estado de California-EUA (Middleton y Bielicki 2009a). Adicionalmente, existen otros trabajos en años subsecuentes que utilizan estos mismos modelos (Keating *et al.* 2011, Kuby *et al.* 2011).

En Broek *et al.* (2010), se describe una herramienta que integra el uso de un sistema de información geográfica (ArcGis) con funcionalidades espaciales y de ruteamiento con un modelo de planificación energética del tipo abajo-arriba (bottom-up) –llamado MARKAL– basado en optimización lineal. Esta misma línea de investigación se encuentra en el trabajo de Strachan *et al.* (2011).

Klokk *et al.* (2010), propusieron un modelo matemático para la planificación de la cadena de valor del CO₂. El modelo maximiza el valor presente neto de los ingresos generados por recuperación de petróleo y de los ahorros obtenidos por no pago de multas relacionadas al CO₂. Adicionalmente, también contemplaron los costos de inversión y operación para diseñar la infraestructura de transporte que conecta las fuentes emisoras de CO₂ con los reservorios para almacenarlo. Los autores aplican este modelo para resolver un caso de estudio en Noruega, considerando en total cinco fuentes emisoras de CO₂, catorce pozos de petróleo y dos acuíferos. A diferencia de los modelos propuestos previamente, Klokk *et al.* presentaron un MILP que permite considerar inversiones en infraestructura en el tiempo, perfeccionando la red de transporte. El modelo fue resuelto usando como optimizador XPress versión 19.00. El caso base se resolvió satisfactoriamente en 496 s. Han y Lee (2011), propusieron un MILP para resolver un problema de CCS con algunas variantes interesantes respecto a los modelos desarrollados hasta entonces. En este caso, ellos modelaron variables de localización a nivel de industria, planta y tipo de producción de cada planta. Además, ajustan

la localización de diferentes tipos de instalaciones para la captura de CO₂. Finalmente, incorporan la posibilidad de capturar el CO₂ en diferentes estados físicos. El modelo es determinista y estático (sin horizonte de planificación).

Middleton *et al.* (2012), mejoraron el MILP presentado previamente en varios aspectos (Middleton y Bielicki 2009b, Kuby *et al.* 2011). Esta nueva versión del modelo SimCCS considera la posibilidad de que las inversiones en infraestructura sean realizadas a lo largo de un horizonte de planificación. Adicionalmente, consideran la construcción de varios pozos (con una capacidad máxima) por cada sitio potencial (reservorio) de almacenamiento de CO₂ y la posibilidad de instalar varias unidades de captura de CO₂ por cada fuente emisora. El nuevo modelo es probado en un caso de reducción de emisiones de CO₂ en Texas. En esta zona geográfica podemos encontrar un conjunto de nueve fuentes emisoras de CO₂ y tres posibles reservorios para almacenamiento.

Finalmente está el trabajo de Morbee *et al.* (2012), quienes propusieron un MILP para resolver de manera óptima el problema de planificación de una red de tuberías capaz de transportar el CO₂ capturado desde fuentes emisoras hasta reservorios de CO₂. Este trabajo pone un mayor énfasis en algunos métodos de solución para reducir la complejidad del problema.

A manera de resumen, podemos decir que de los trabajos realizados hasta el momento, el problema de diseño de la red de una cadena de suministro para la CCS es abordado por diferentes metodologías y con diferentes nombres. Sin embargo, sólo algunos de esos autores abordan el problema de optimización del diseño de la red de una cadena de suministro de manera integral usando modelos tipo MILP. El problema en cuestión, desde el punto de vista práctico, es uno de los más importantes actualmente, dado los objetivos de reducción de las emisiones de CO₂ y la consecuente mitigación del calentamiento global de la Tierra. Debemos recordar que nuestro problema de optimización combinatoria es complejo de resolver y por su relación con otros problemas similares puede ser clasificado como un problema NP-hard. Si bien algunos autores han abordado el factor de la incertidumbre en la capacidad de almacenamiento de los reservorios, esos estudios no han integrado dicha incertidumbre a los otros aspectos del problema en los modelos propuestos. La incertidumbre ha sido analizada de forma aislada para posteriormente integrar los resultados a los modelos MILP. Para concluir, recordemos que nuestra contribución en esa línea

es la siguiente: considerar el tema de planificación de las inversiones necesarias para operar un sistema de captura y secuestro de CO₂ como un problema de optimización del diseño de la red de una cadena de suministro. Así como considerar las inversiones en un horizonte de planificación definido, con limitaciones en la cantidad de plantas de captura a instalar y la cantidad de reservorios a abrir.

FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El problema de diseño de la red de una cadena de suministro para la captura y secuestro de CO₂ puede ser definido de la siguiente forma:

Sea N^{source} el conjunto de todas las fuentes emisoras de CO₂; N^{sink} el conjunto de todos los lugares candidatos (reservorios) donde es posible secuestrar CO₂; N el conjunto de todos los lugares candidatos a formar parte de un camino p ; P el conjunto de todos los caminos posibles p que conectan una fuente emisora de CO₂ con un reservorio; E el conjunto de todas las aristas $e=(i,j)$ donde $i,j \in N$; R el conjunto de todas las alternativas de tubería r que se diferencian por su diámetro (capacidad). Observe que N^{source} y N^{sink} son subconjuntos de N . Además cada fuente emisora $i \in N^{source}$ tiene una capacidad de captura (oferta) K_i y cada reservorio $j \in N^{sink}$ tiene una capacidad de secuestro K_j . Para que un camino p , comenzando en i y finalizando en j , sea viable, debe ocurrir que al menos un $i \in N^{source}$ y un $j \in N^{sink}$, además las tuberías tipo r instaladas en ese camino deben tener capacidad suficiente (K_r^{max}) para transportar un flujo x_{ij} de CO₂ y una capacidad mínima de operación (K_r^{min}), y para todo $i \in N^{source}, j \in N^{sink}$ el flujo total saliendo desde i debe ser menor o igual a K_i y el flujo total llegando a j debe ser menor o igual a K_j . Considere f_{ijr} los costos de instalación de la tubería r en (i,j) ; f_i los costos fijos de activar una tecnología de captura (w_i) de CO₂ en la fuente i ; f_j los costos fijos de activar un reservorio j (w_j) para secuestro de CO₂; c_{ij} el costo de transportar CO₂ entre i y j , co_i el costo de capturar CO₂ en la fuente $i \in N^{source}$; cd_j el costo de inyectar y operar el reservorio $j \in N^{sink}$.

Observe también, que en nuestro problema queremos evaluar el impacto de limitar el número de reservorios a instalar (τ^{sink}). El problema consiste en encontrar, para un determinado volumen D de CO₂ a transportar, los caminos viables p de menor costo de operación y transporte. Dicho de otra forma, encontrar una red de costo mínimo que sea capaz de transportar todo el flujo D de CO₂. Este problema puede ser caracterizado como un problema de optimización

de flujo en redes con costos fijos y variables, como es el caso de otros problemas de cadena de suministros.

Respecto a las variables de decisión:

w_i , es 1 si la planta de captura de CO₂ es instalada en $i \in N^{sour}$, 0 caso contrario;

w_j , es 1 si un reservorio para almacenar CO₂ es abierto en $j \in N^{sink}$, 0 caso contrario;

x_{ij} , es el flujo (Kt/año) de CO₂ entre los puntos i y j ;
 y_{ijr} , es 1 si un tubo de tipo r (diámetro) es construido entre i y j , 0 caso contrario;

Matemáticamente, formulamos este problema como uno de programación lineal entera mixta (MILP) de la siguiente forma:

Minimizar

$$\sum_{(i,j) \in E} \sum_{r \in R} f_{ijr} y_{ijr} + \sum_{i \in N^{sour}} f_i w_i + \sum_{j \in N^{sink}} f_j w_j \quad (1)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} \sum_{r \in R} c_{ijr} x_{ij} + \sum_{i \in N^{sour}} \sum_{(i,j) \in E} co_i x_{ij} + \sum_{j \in N^{sink}} \sum_{(i,j) \in E} cd_j x_{ij} \quad (2)$$

Sujeto a

Restricción de flujo y operación

$$x_{ij} \leq \sum_{r \in R} K_r^{\max} y_{ijr} \quad \forall (i,j) \in E \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq \sum_{r \in R} K_r^{\min} y_{ijr} \quad \forall (i,j) \in E \quad (4)$$

Restricción de capacidad en la fuente emisora

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} \leq K_i w_i \quad \forall i \in N^{sour} \quad (5)$$

Restricción de capacidad en el reservorio

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} \leq K_j w_j \quad \forall j \in N^{sink} \quad (6)$$

Restricción de construir y operar tuberías

$$\sum_{r \in R} y_{ijr} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in E \quad (7)$$

Restricción de equilibrio en flujos

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij} = \sum_{(j,i) \in E} x_{ji} \quad \forall j \in [N - (N^{sour} \cup N^{sink})] \quad (8)$$

Restricción número máximo de reservorios activos

$$\sum_{i \in N^{sink}} w_i \leq \tau^{sink} \quad (9)$$

Restricción de flujo mínimo

$$\sum_{\substack{i \in N^{sour} \\ (i,j) \in E}} x_{ij} \geq D \quad (10)$$

Restricciones de padrones de variables binarias y no negativas

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in E \quad (11)$$

$$y_{ijr} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in E, r \in R \quad (12)$$

$$w_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in (N^{sour} \cup N^{sink}) \quad (13)$$

Los términos en la función objetivo minimizan los costos de inversión y construcción (1), y los costos de transporte de CO₂ más los costos de operación de captura y almacenamiento de CO₂ (2).

Las restricciones (3) y (4) garantizan que el flujo de CO₂ entre dos puntos i y j sólo es posible si está construida y operando una tubería con capacidad suficiente.

La restricción (5) asegura que el total de emisiones capturadas en cada fuente sea menor que la capacidad total de generación de CO₂ en esa fuente.

La restricción (6) garantiza que la cantidad total de emisiones de CO₂ almacenadas en el reservorio no supere su capacidad.

La restricción (7) obliga a construir como máximo un tipo de tubería por cada arista.

La restricción (8) refleja el equilibrio de flujo que debe existir en cada lugar que no es fuente ni reservorio.

La restricción (9) garantiza que no se instalen más de un determinado número de reservorios para almacenamiento de CO₂.

La restricción (10) obliga a capturar una cantidad total mínima de emisiones de CO₂. El resto de las restricciones (11) a (13) son las restricciones estándares sobre las variables no negativas y binarias.

En la **figura 1(a)** se muestra una red inicial con las diferentes alternativas de conexión entre fuentes

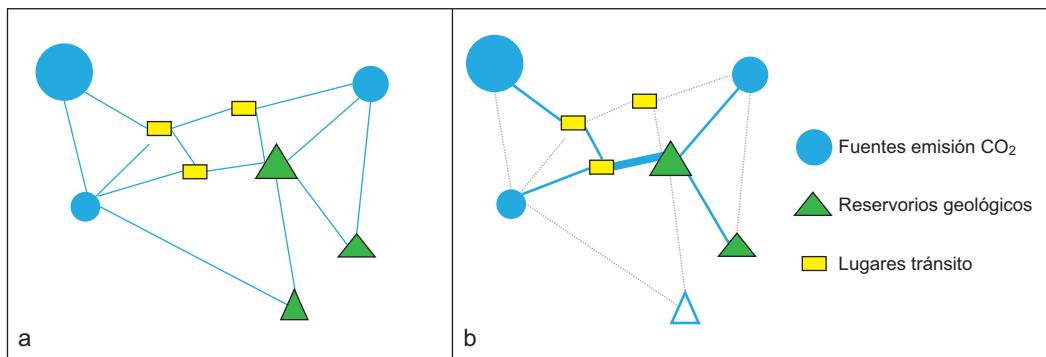


Fig. 1. Ejemplo de red potencial (a) y solución factible (b) para la red de una cadena de suministro para captura y secuestro de CO₂

emisoras de CO₂, lugares o puntos de transición y reservorios potenciales. Los puntos de transición son lugares potenciales que pueden formar parte del camino uniendo fuentes a reservorios.

En la **figura 1(b)** se muestra una solución factible para el problema de diseño de la red de una cadena de suministro para captura y almacenamiento de CO₂. Observe que las líneas en azul son de diferente grosor y están uniendo los distintos puntos formando un camino desde fuentes emisoras hasta los reservorios para el almacenamiento del CO₂. El grosor ilustra que las tuberías van aumentando su diámetro para transportar más CO₂.

UN ESTUDIO DE CASO: CAPTURA Y ALMACENAMIENTO DE CO₂ EN LA REGIÓN SURESTE DE BRASIL

A continuación presentamos la aplicación del modelo propuesto a la región sureste de Brasil. Nuestro interés es reducir las emisiones de CO₂ provenientes de la industria cementera, considerado a nivel mundial uno de los sectores industriales que más genera CO₂.

Según datos publicados por el Sindicato Nacional de la Industria de Cementos de Brasil (SNIC 2012), la industria de fabricación de cemento está formada por 14 grupos empresariales y un total de 79 fábricas distribuidas en varios estados del país. Según el mismo SNIC, entre junio de 2011 y mayo de 2012, se vendieron un total de 66.8 millones de toneladas de cemento. Para nuestro estudio de caso consideramos fábricas con una capacidad de producción media anual de entre 800 mil toneladas (t) y 2.5 millones de toneladas. Esos datos fueron obtenidos de la información publicada por el SNIC (2012).

El estudio de caso considera una región comprendida por los estados de Minas Gerais y el suroeste de São Paulo, incluyendo la Cuenca de San Francisco.

Nuestro objetivo fue diseñar la red de una cadena de suministro para la captura y almacenamiento de CO₂ producido por la industria cementera de esa región.

Las fuentes emisoras corresponden a diez plantas de fabricación de cemento ubicadas en el área en estudio. Considerando como referencia otros estudios de caso realizados en los Estados Unidos de Norteamérica (EUA) y Europa, definimos en 90 % la eficiencia en la captura de CO₂ en las plantas. La capacidad de producción específica de cada fábrica considerada en nuestro estudio, fue asignada aleatoriamente usando el dato de capacidad de producción media anual (entre 800 mil y 2.5 millones de toneladas). Los datos de energía consumida y emisiones de CO₂ por cada tonelada de cemento producida, fórmulas para estimación de capacidad de planta generadora de energía en cada planta, inversión en instalaciones de captura, inversión en compra y construcción de tuberías, entre otros datos, se encuentran disponibles con el autor. Consideraremos una inversión de 3080 dólares EUA/kW (MIT CCSTP 2007). Los datos de inversión y emisiones de CO₂ de cada planta se muestran en el **cuadro I**.

Las tres alternativas de reservorios geológicos para secuestro de CO₂ fueron identificados como acuíferos salinos en la Cuenca de San Francisco (2) y Paraná-Baurú (1). La capacidad total de almacenamiento de CO₂ de las diferentes cuencas de Brasil es de 2035 Gt (Rockett *et al.* 2011). La Cuenca de San Francisco posee el 10 % de la capacidad total de almacenamiento de CO₂ de los acuíferos salinos, mientras que la Cuenca de Paraná supera las 400 Gt. Para nuestro estudio, hemos supuesto una capacidad de almacenamiento muy inferior, menos del 1 % del total, distribuida entre los potenciales reservorios. Consideraremos que las capacidades de almacenamiento de CO₂ son de 10 000, 16 000 y 8 000 Kt/año para las cuencas de San Francisco 1, San Francisco 2 y Paraná 1, respectivamente. Todos los reservorios

CUADRO I. EMISIONES DE CO₂ E INVERSIÓN EN CAPTURA - PLANTAS CEMENTERAS

#	Planta	Emisiones KtCO ₂ /año	Inversión MUS \$
1	Arcos	828.1	47443.2
2	Barroso	1236.9	70864.1
3	Carandaí	672	38500.0
4	Ijaci	1415.4	81090.6
5	Itáu de Minas	1646.4	94325.0
6	Matozinhos	1243.2	71225.0
7	Montes Claros	948.5	54341.1
8	Pedro Leopoldo	1652.7	94685.9
9	Santa Luzia	1480.5	84820.3
10	Vespasiano	959	54942.7

son acuíferos salinos ubicados a 800 m de profundidad. Las tuberías para transporte de CO₂ y los datos asociados a ellas se muestran en el **cuadro II**. Observe que artificialmente disminuimos a 400 kT/año la capacidad mínima de transporte de la tubería de 8 pulgadas, pues caso contrario algunas plantas no tendrían cómo despachar el CO₂ capturado. Los costos de inversión, operación y transporte fueron obtenidos desde diversas fuentes (MIT CCSTP 2007, Energy 2010). Consideramos para nuestro estudio un horizonte de 25 años con los costos actualizados a una tasa de interés del 10 %.

CUADRO II. DATOS DE TUBERÍAS USADAS EN EL CASO DE ESTUDIO

Diámetro (pulgada)	Capacidad (min) Kt/ año	Capacidad (max) Kt/año	Costo \$EUA/km
8	1 000	2000	400 000
12	1 600	4000	600 000
16	3 200	8 000	800 000
20	6 400	12 000	1 000 000
24	9 600	20 000	1 200 000
30	16 000	36 000	1 500 000

La **figura 2(a)** muestra el área de estudio con las diferentes fuentes emisoras y los reservorios potenciales. Observe que existen varias plantas de cemento a menos de 40 km de distancia una de otra y que, debido a la escala usada en el mapa, no son adecuadamente diferenciadas. Por ese motivo, la **figura 2(b)** no está a escala e ilustra la red potencial de caminos que conecta las diferentes fuentes, lugares de transición y reservorios potenciales. En este tipo de proyectos es normal definir una función que contabilice diferentes factores como tipo de terreno y pago de derechos de paso para el costo de construcción de una tubería.

Para facilitar la lectura del estudio y visualizar las aplicaciones potenciales del modelo propuesto, hemos simplificado algunos datos y detalles técnicos que no afectan el propósito principal de este artículo. Por ejemplo, la compresión para alcanzar una presión de CO₂ necesaria para el transporte (10 MPa), las caídas de presión durante el transporte, la capacidad de inyección del reservorio determinada por sus condiciones geológicas (porosidad y espesura) y la presión de llegada del CO₂. Todos estos aspectos técnicos han sido resueltos y comentados por otros autores (Middleton y Bielicki 2009), por lo que pueden ser incorporados en el modelo. Por ejemplo, la caída de presión del CO₂ durante el transporte en la red puede ser resuelta con la instalación, cada cierta cantidad de kilómetros de estaciones de compresión. Respecto de los costos, tanto los de la fuente como los del reservorio, han sido expresados en un sólo valor fijo y otro variable. Así, los costos fijos incluyen los de inversión en las plantas de captura de CO₂, estaciones de compresión, bombeo y otras necesarias. Para los costos fijos en el reservorio, hemos también incluido en un sólo valor los costos de evaluación y sondeo, los costos por cada pozo de perforación, construcción, represurización y bombeo entre otros. El modelo permite descomponer esos costos y realizar sensibilizaciones en caso que se requiera.

La contribución de este modelo de programación lineal mixto entero es que permite evaluar en forma integrada las fuentes de emisión y los lugares de almacenamiento de CO₂, las distintas rutas de transporte y las alternativas de ductos, los costos de emisión, captura, transporte e instalación de plantas de captura y el impacto de limitar la cantidad de fuentes de almacenamiento de CO₂ que pueden ser abiertas. Observe que, como se mencionó previamente, también hemos introducido el concepto de diseño de la red de una cadena de suministro para CCS, integrando el impacto de limitar el número de fuentes emisoras de CO₂ abiertas, cuestión no considerada anteriormente en otros modelos.

RESULTADOS PARA EL ESTUDIO DE CASO

El modelo descrito anteriormente fue programado en el paquete GAMS y usando el optimizador CPLEX 12.3. Todos los resultados fueron obtenidos usando una PC modelo i5 de 2.3 GHz y 2Gb RAM. Con el fin de ilustrar los resultados del modelo se evaluaron dos escenarios. Un escenario (A) con una meta de captura

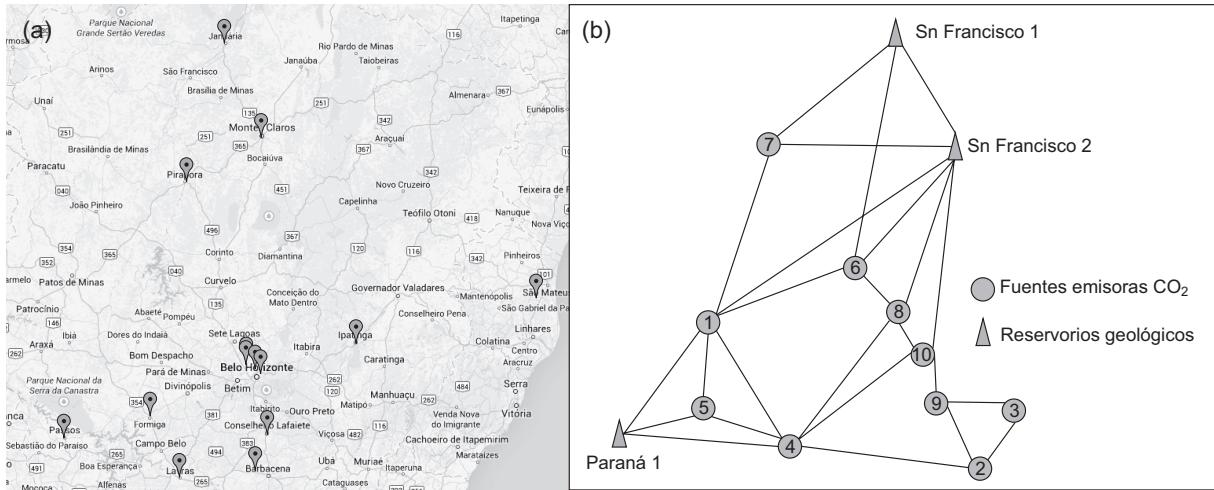


Fig. 2. (a) Área de estudio considerando localización de fábricas de cemento y reservorios (construida usando de www.google-maps.com), (b) red básica con localización de fábricas de cemento y potenciales reservorios geológicos

de CO₂ de 5000 Mt/año y limitado a una cantidad de reservorios para activar y otro escenario (B) con meta de 10 000 Mt/año y limitado a dos reservorios. El cuadro III, en las primeras líneas, muestra los resultados para el escenario A. Puede observarse que el costo total (fijo más variable) es de 570 589 millones de dólares EUA.

El reservorio de San Francisco 2 (12), tiene una capacidad total de 10 000 Mt/año, por lo tanto anualmente es usado sólo el 50 % de su capacidad. Para cumplir con la meta de captura de CO₂, es necesario instalar plantas de captura en las fábricas 6, 8, 9 y 10. En la planta 9 es capturado el 77 % del CO₂ generado por ella. En las otras plantas es capturado el 100 % del CO₂.

Como se puede observar en la figura 3(a) la red de una cadena de suministro considera instalar tuberías de 16 pulgadas entre la planta 6 y el reservorio San Francisco 2, pues desde ese punto se transporta el total anual (5000 Mt/año) de CO₂. También son construidas tuberías de 8 pulgadas (desde las plantas 8 a 6 y 10 a 8) y de 12 pulgadas (entre las plantas 9 y 10). El costo medio de capturar, transportar y almacenar CO₂ es superior a 110 dólares EUA/t. Observe también que, como ha ocurrido en estudios realizados en otros países (EUA y Europa), la mayor inversión es realizada en la instalación de las plantas de captura de CO₂.

Para el escenario B, nuestro objetivo es mostrar las capacidades de conformación de redes más complejas

CUADRO III. ESCENARIOS A Y B: PLANTAS DE CAPTURA DE CO₂ INSTALADAS, TUBERÍAS INSTALADAS Y TRANSPORTE DE CO₂

Planta Captura w_i	CO ₂ capturado kt/año	Conexión y_{ijr}	Tubería Diámetro (pulgadas)	Flujo kt CO ₂ /año x_{ij}
Escenario A				
6	1 243.2	6-12	16	5 000.0
8	1 652.7	8-6	12	3 756.8
9	1 145.1	9-10	8	1 145.1
10	2 104.1	10-8	12	959.0
Escenario B				
3	654.3	3-9	8	654.3
4	1 415.4	4-8	8	1 415.4
5	1 646.4	5-13	8	1 646.4
6	1 243.2	6-12	16	7 405.1
7	948.5	7-12	8	948.5
8	1 652.7	8-6	16	6 161.9
9	1 480.5	9-10	12	2 134.8
10	959.0	10-8	12	3 093.8

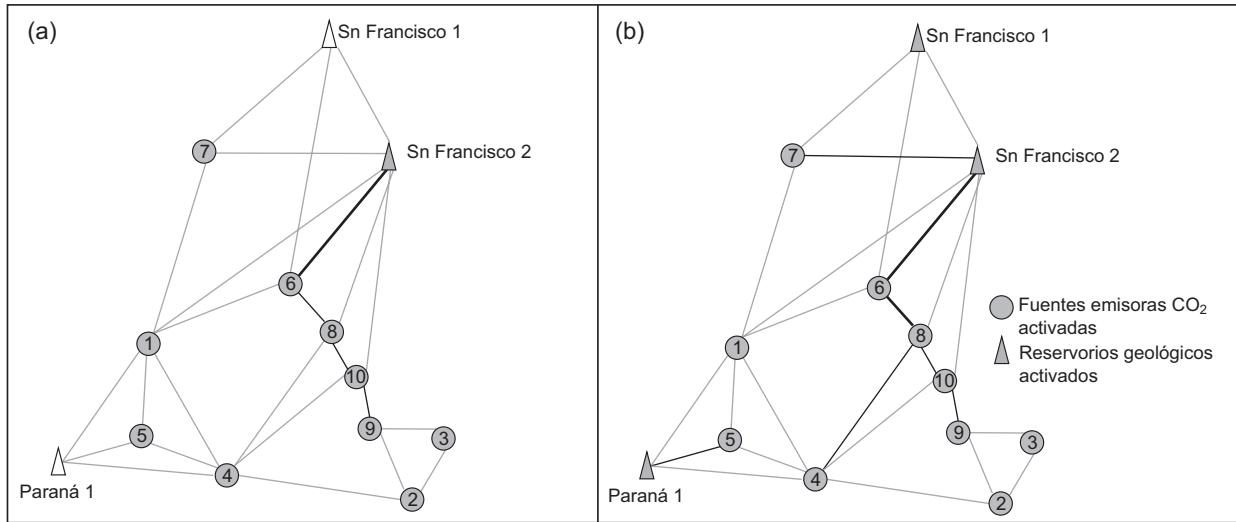


Fig. 3. Red de cadena de suministro para captura y secuestro de carbono: (a) escenario A y (b) escenario B

de una cadena de suministro para CCS, que consideran más tuberías para construir, más plantas de captura para activar y más reservorios. Observamos que la inversión total actualizada alcanza \$1 129 919.63 millones de dólares EUA. Comparado con el escenario A, esta suma es casi el doble. También, podemos notar que la red de la cadena de suministro, como se esperaba, es más compleja. Como puede observarse en el **cuadro III**, en este escenario se abren dos reservorios: San Francisco 2 (12) y Paraná 1 (13). San Francisco 2 es usado hasta un 83 % de su capacidad anual, mientras que Paraná 1 es usado poco más de un 30 % de su capacidad anual. En total se instalaron ocho plantas de captura de CO₂, en las fábricas 3 a 10. La red de la cadena de suministro es más compleja, con ocho conexiones que deben ser construidas, formando en la práctica dos subredes (**Fig. 3b**). Para la construcción de la red son usadas las tuberías de 8 pulgadas de diámetro (entre 3 y 9; 4 y 8; 5 y 13; 7 y 12), de 12 (entre 9 y 10; 10 y 8) y de 16 (entre 6 y 12; 8 y 6). La planta 5 envía el total de CO₂ capturado al reservorio Paraná 1. El resto de las plantas envían el CO₂ capturado al reservorio San Francisco 2. De esas plantas es capturado el 100 % del CO₂, excepto en la planta 3 donde se captura el 79 %.

CONCLUSIONES

En este artículo estudiamos el problema de captura y secuestro de CO₂ como una de las alternativas planteadas por la comunidad científica para mitigar los efectos del cambio climático en el mundo. Con base en la literatura más reciente sobre el tema,

proponemos un modelo de programación lineal mixto entero, que considera aspectos técnicos y económicos para resolver el problema de capturar CO₂ desde fuentes emisoras, transportarlo y finalmente almacenarlo en reservorios geológicos. Para validar el potencial de aplicación de la metodología propuesta usamos como estudio de caso la industria de cementos de Brasil. En particular, analizamos el diseño de la red de una cadena de suministro para la CCS de fábricas de cemento localizadas en un área comprendida entre el noroeste del estado de São Paulo y el Sur del estado de Minas Gerais, incluyendo reservorios geológicos potenciales localizados en el área oriental de la Cuenca de Paraná y en la Cuenca de San Francisco. Concluimos, respecto a la inversión actualizada necesaria para capturar 5 Mt CO₂/año y 10 Mt CO₂/año, que: 1) Observamos que al aumentar la cantidad de CO₂ que debe capturarse y como consecuencia de las emisiones de CO₂ de las fábricas de cemento, así como de la localización espacial de éstas y de los reservorios, el resultado es una red de tuberías más compleja (cadena de suministro). En esta cadena de suministro se requiere instalar un mayor número de plantas de captura de CO₂ y activar también un mayor número de reservorios. Con ello, también aumenta la inversión. 2) En el diseño de la red de una cadena de suministro para CCS, uno de los aspectos con mayor grado de incertidumbre es la capacidad de almacenamiento de los reservorios. Este aspecto podría ser analizado y profundizado en una investigación futura para dimensionar su impacto económico sobre la red de una cadena de suministro para CCS.

REFERENCIAS

- Broek M. A. van den Brederode E., Ramírez-Ramírez A., Kramers L., Kuip M. van der, Wildenborg A. F. B., Turkenburg W. C. y Faaij A. P. C. (2010). Designing a cost-effective CO₂ storage infrastructure using a GIS based linear optimization energy model. *Environ. Modell. Softw.* 25, 1754-1768.
- EIA (2011). DOE/EIA-0226 (2011/03) Electric Power Annual 2010. Energy Information Administration. Reporte. Washington, DC. 97 pp. [en línea]. <http://www.eia.gov/electricity/capacity/>.
- ENERGY (2010). CO₂ pipeline infrastructure: An analysis of global challenges and opportunities. Element Energy Limited. Reporte. Cambridge, Reino Unido. 134 pp.
- Han J.-H. y Lee I.-B. (2011). Development of a scalable and comprehensive infrastructure model for carbon dioxide utilization and disposal. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50, 6297-6315.
- IEA (2009). World Energy Outlook 2009. International Energy Agency. Reporte. París. 698 pp.
- Keating G. N., Middleton R. S., Stauffer P. H., Viswanathan H. S., Letellier B. C., Pasqualini D., Pawar R. J. y Wolfsberg A. V. (2011). Mesoscale carbon sequestration site screening and CCS infrastructure analysis. *Environ. Sci. Technol.* 45, 215-22.
- Klibi W., Martel A. y Guitouni A. (2010). The design of robust value-creating supply chain networks: A critical review. *Eur. J. Oper. Res.* 203, 283-293.
- Klokk Ø., Schreiner P. F., Pagès-Bernaus A. y Tomsgard A. (2010). Optimizing a CO₂ value chain for the Norwegian continental shelf. *Energ. Policy*. 38, 6604-6614.
- Kuky M. J., Middleton R. S. y Bielicki J. M. (2011). Analysis of cost savings from networking pipelines in CCS infrastructure systems. *Energy Procedia*. 4, 2808-2815.
- Melkote S. y Daskin M. S. (2001). Capacitated facility location-network design problems. *Eur. J. Oper. Res.* 129, 481-495.
- Middleton R. S. y Bielicki J. M. (2009a). A comprehensive carbon capture and storage infrastructure model. *Energy Procedia*. 1, 1611-1616.
- Middleton R. S. y Bielicki J. M. (2009b). A scalable infrastructure model for carbon capture and storage: SimCCS. *Energ. Policy* 37, 1052-1060.
- Middleton R. S., Kuby M. J., Wei R., Keating G. N. y Pawar R. J. (2012). A dynamic model for optimally phasing in CO₂ capture and storage infrastructure. *Environ. Modell. Softw.* 37, 193-205.
- MIT CCSTP (2007). MIT CO₂ pipeline transport and cost model version 1. Carbon Capture and Sequestration Technologies Program. Massachusetts Institute of Technology. Reporte. Boston, MA. 21 pp.
- MIT CCSTP (2009). Carbon management GIS: CO₂ pipeline transport costs estimation. Carbon Capture and Sequestration Technologies Program. Massachusetts Institute of Technology. Reporte. Boston, MA. 16 pp.
- Morbee J., Serpa J. y Tzimas E. (2012). Optimised deployment of a European CO₂ transport network. *Int. J. Greenh. Gas. Con.* 7, 48-61.
- Pacala S. y Socolow R. (2004). Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science* 305, 968-72.
- Rockett G. C., Machado C. X., Ketzer J. M. M. y Centeno C. I. (2011). The CARBMAP project: Matching CO₂ sources and geological sinks in Brazil using geographic information system. *Energy Procedia*. 4, 2764-2771.
- SNIC (2012). Sindicato Nacional da Indústria do Cimento – Brasil. A industria de fabricación de cemento no Brasil [en línea]. <http://www.snic.org.br/>. 23.11.2012.
- Strachan N., Hoefnagels R., Ramírez A., Broek M. A. van den, Fidje A., Espelgren K., Seljom P., Blesl M., Kober T. y Grohnheit P. E. (2011). CCS in the North Sea region: A comparison on the cost-effectiveness of storing CO₂ in the Utsira formation at regional and national scales. *Int. J. Greenh. Gas. Con.* 5, 1517-1532.