

# **Análisis del uso de CCA como cementante suplementario para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en una industria cementera colombiana**

Daniel Fernando Acosta González.  
Johan David Marín Benjumea

## **1. Contexto**

En los últimos años Colombia ha tomado diferentes medidas y ha desarrollado distintos planes, con el objetivo de la mitigación de gases de efecto invernadero (Álvarez et al, 2015). Debido a estas medidas diferentes industrias, se han visto en la necesidad de desarrollar estrategias e implementar tecnologías que le permitan reducir sus emisiones.

La del cemento y el concreto, teniendo en cuenta la cantidad que se emite en la producción de cemento (León, s.f.), está tomando medidas e investigando en tecnologías que permitan reducirlos (Barreto et al, 2008). Una de estas estrategias es el uso de materiales cementantes suplementarios. Por su facilidad de obtención en el país y su procesamiento con bajas emisiones de gases de efecto invernadero, la ceniza de cascarilla de (CCA), parece ser un producto potencial para este fin.

Sin embargo, debido a la infraestructura de las carreteras colombianas, y a la logística necesaria para proveer CCA a las concreteras, puede aumentar considerablemente la emisión de gases, pudiendo obstaculizar que se cumpla el objetivo inicial. Por ello, es importante realizar una evaluación particular para cada empresa y tomar de esta forma la decisión más adecuada.

Es por este motivo que este estudio se desarrolló con el objetivo de evaluar la viabilidad de utilizar CCA como material cementante suplementario, en 4 plantas de concreto de un grupo empresarial colombiano, para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## **2. Metodología**

Para desarrollar evaluar si la opción es viable se hizo mediante la aplicación de un modelo de optimización lineal, solucionando con Python, sobre 2 escenarios diferentes de la cadena de suministro. De 7 cementeras (Rioclaro, Yumbo, Tolú viejo, Cartagena, Sogamoso, Montebello, Nare) hacia 4 concreteras consideradas (Barranquilla, Flandes, Fusagasugá, Pto. Tejada) de un reconocido grupo empresarial colombiano.

*Escenario base*

No se utilizan cementantes suplementarios, el cemento va desde las plantas de cemento hasta las plantas de concreto. Se utiliza un modelo de optimización para asignar la demanda de cemento que suplirá cada planta de cemento para cada planta de concreto emitiendo la menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### *Escenario 1*

Se produce cascarilla de arroz en 2 trilladoras (Valledupar y Yopal), donde se procesan como CCA y se transportan hasta cada una de las concreteteras.

#### *Escenario 2*

Se tiene un centro de distribución que agrupa la cascarilla de arroz que se envía sin procesar desde las trilladoras, allí se procesa en CCA y se envía a las plantas de concreto. Para este escenario se realizó un modelo en el que se cambió la localización del centro de distribución, evaluando 4 posibilidades seleccionadas arbitrariamente en la zona central del país (Fusagasugá, Ibagué, Tunja y Yopal).

Para poner en funcionamiento del modelo para cada una de las concreteteras se tiene nombre, ubicación (latitud y longitud), y demanda, para cada concretetera nombre, ubicación (latitud y longitud), y capacidad de producción de cemento (Argos, s.f.); la capacidad es un supuesto. Para las trilladoras se tiene nombre, ubicación (latitud y longitud), y capacidad de trilla; un 20% del volumen trillado es cascarilla de arroz y un 20% del peso de la cascarilla se convierte en CCA.

Para calcular las emisiones de tonelada transportada por arco, se utiliza la distancia calculada en Google Maps, multiplicado por el consumo promedio de la ruta según el Sisetag; en el caso de la cascarilla de arroz se pondera el consumo debido a que el peso transportado es menor. Finalmente se multiplica por el factor de emisión y se pondera por el peso. León (s.f.) brinda la información de las emisiones por tonelada de cemento producida, toda la información recopilada se brinda en el documento de Excel adjunto, junto al código de Python utilizado.

### **3. Modelos**

#### *Escenario base*

##### **Supuestos**

Las emisiones de la combustión de cascarilla de arroz son despreciables.

Solo se produce el cemento que se va a enviar.

Cada cementera, tiene una capacidad e producción de 2000 toneladas

##### **Conjuntos**

*M*: Plantas de cemento *i*

*C*: Plantas de concreto *j*

##### **Parámetros**

$T$ : kg de CO<sub>2</sub>/por tonelada de cemento producida

$P_i$ : Capacidad en toneladas de cemento de las plantas de cemento

$D_j$ : Demanda mensual de cemento de la planta de concreto j

$E_{ij}$ : kg de CO<sub>2</sub>/por tonelada transportada de la planta de cemento i a la planta de concreto j

Variables de decisión

$X_{ij}$ : Cantidad de cemento que va desde la planta de cemento i hasta la planta de concreto j

Función objetivo

$$\min W = T * \sum \sum X_{ij} + \sum \sum X_{ij} * E_{ij}$$

Restricciones:

$$D_j \leq \sum_i X_{ij} \forall j$$

Demanda no debe exceder la sumatoria de toneladas enviadas a la concretera j desde las diferentes cementeras

$$\sum_j X_{ij} \leq P_i \forall i$$

Las toneladas de cemento enviadas desde las cementeras no pueden superar su capacidad máxima

$$X_{ij} \geq 0$$

La cantidad de cemento enviada desde cada cementera a cada concretera no puede ser negativa

*Escenario 1*

Supuestos

Las emisiones resultantes de la combustión de cascarilla de arroz para producir CCA son despreciables

Conjuntos

$M$ : Plantas de cemento i

$C$ : Plantas de concreto j

$A$ : Arroceras k

Parámetros

$T$ : kg de CO<sub>2</sub>/por tonelada de cemento producida

$P_i$ : Capacidad en toneladas de cemento de las plantas de cemento

$D_j$ : Demanda mensual de material cementante en la planta de concreto j

$N_k$ : Capacidad en tonelada de ceniza que tiene la arrocera k

$E_{ij}$ : kg de CO<sub>2</sub>/por tonelada transportada de la planta de cemento i a la planta de concreto j

$F_{kj}$ : Kg de CO<sub>2</sub>/por tonelada transportada de la arrocera k a la planta de concreto j

Variables de decisión

$X_{ij}$ : Cantidad de cemento que va desde la planta de cemento i hasta la planta de concreto j

$Y_{kj}$ : Cantidad de ceniza que va desde la arrocera k hasta la planta de concreto j

Función objetivo

$$\min W = T * \sum \sum X_{ij} + \sum \sum X_{ij} * E_{ij} + \sum \sum Y_{kj} * F_{kj}$$

Restricciones:

$$D_j \leq \sum_i X_{ij} + \sum_k Y_{kj} \quad \forall j$$

La demanda no debe exceder la sumatoria de toneladas enviadas a la concretera j desde las diferentes cementeras

$$\sum_k Y_{kj} \leq 0.3 * \sum_i X_{ij}$$

La ceniza de cascarilla de arroz no puede exceder el 30% del cemento en la mezcla (demanda)

$$\sum_j Y_{kj} \leq N_k$$

La cantidad de ceniza enviada de cada arrocera a las concreteras no puede superar la capacidad de cada arrocera

$$X_{ij} \geq 0$$

La cantidad de cemento enviada desde cada cementera a cada concretera no puede ser negativa

$$Y_{kj} \geq 0$$

La cantidad de cascarilla enviada desde cada arroceras a cada concretera no puede ser negativa

$$\sum_j X_{ij} \leq P \quad \forall i$$

Las toneladas de cemento enviadas desde las cementeras no pueden superar su capacidad máxima

### Escenario 2

#### Supuestos

Las emisiones de la combustión de cascarilla de arroz son despreciables

Solo se produce el cemento que se va a enviar

#### Conjuntos

- M: Plantas de cemento i
- C: Plantas de concreto j
- A: Arroceras K
- N: Centro de consolidación

#### Parámetros

- T: kg de CO<sub>2</sub>/por tonelada de cemento producida
- $P_i$ : Capacidad en toneladas de cemento de las plantas de cemento = 2000 Ton
- $M_k$ : Capacidad en toneladas de cascarilla de arroz de la arroceras k
- $D_j$ : Demanda mensual de cemento de la planta de concreto j
- $E_{ij}$ : kg de CO<sub>2</sub>/por tonelada transportada de la planta de cemento i a la planta de concreto
- $F_k$ : Kg de CO<sub>2</sub>/por tonelada transportada de la arroceras k al punto de consolidación
- $H_{lj}$ : Kg de CO<sub>2</sub>/por tonelada transportada del punto de consolidación l a la concretera j

#### Variables de decisión

- $X_{ij}$ : Cantidad de cemento que va desde la planta de cemento i hasta la planta de concreto j
- $Y_k$ : Cantidad de cascarilla que va desde la arroceras k hasta El punto de consolidación

$V_j$ : Es la cantidad de ceniza de arroz que se manda desde el punto de consolidación a la planta de concreto j.

Función objetivo

$$\min W = T * \sum \sum X_{ij} + \sum \sum X_{ij} * E_{ij} + \sum \sum Y_k * F_k + \sum \sum V_j * H_j$$

Restricciones:

$$D_j \leq \sum_i X_{ij} + V_j$$

Demanda no debe exceder la sumatoria de toneladas de cemento y CCA enviadas a la concretera j desde las diferentes cementeras y el punto de consolidación

$$\sum_j X_{ij} \leq P_i \forall i$$

Las toneladas de cemento enviadas desde las cementeras no pueden superar su capacidad máxima

$$Y_k \leq M_k \forall k$$

La cantidad de cascarilla de arroz enviada de cada arrocería al punto de consolidación no puede superar la capacidad de cada arrocería

$$\sum_j V_j \leq 0.3 * \sum_i X_{ij}$$

La ceniza de cascarilla de arroz no puede exceder el 30% del cemento en la mezcla (demanda)

$$V_j \leq 0.2 * \sum_k Y_k$$

La cantidad de CCA enviada desde el centro de consolidación no puede superar el 20% del peso de la cascarilla de arroz que recibe

$$X_{ij} \geq 0$$

La cantidad de cemento enviada desde cada cementera a cada concretera no puede ser negativa

$$Y_k \geq 0$$

La cantidad de cascarilla enviada desde cada arrocería al centro de consolidación no puede ser negativa

$$V_j \geq 0$$

La cantidad de ceniza enviada desde el centro de consolidación a cada concretera no puede ser negativa

#### 4. Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los 3 escenarios planteados en los modelos de la *Sección 1*. Dichos modelos fueron implementados con el paquete CPLEX de Python en la plataforma Google Colab.

##### *Escenario base*

solution for: emisiones  
objective: 3377969.048  
x\_Yumbo\_Pto\_Tejada = 2000  
x\_Cartagena\_Barranquilla = 2000  
x\_Sogamoso\_Fusagasuga = 1000  
x\_Montebello\_Pto\_Tejada = 500  
x\_Nare\_Flandes = 1000

El escenario base muestra una emisión de 3.377.969,048 Kg de CO<sub>2</sub> como cantidad mínima y propone enviar 2000 Toneladas de cemento desde Yumbo a Puerto Tejada, 2000 Toneladas de cemento desde Cartagena a Barranquilla, 1000 Toneladas de cemento desde Sogamoso hasta Fusagasugá, 500 Toneladas de cemento desde Montebello a Puerto Tejada y 100 toneladas desde Nare hasta Flandes.

##### *Escenario 1 (cascarilla desde trilladoras)*

objective: 3167062.091  
x\_Yumbo\_Pto\_Tejada = 2000  
x\_Cartagena\_Barranquilla = 2000  
x\_Sogamoso\_Fusagasuga = 770  
x\_Montebello\_Pto\_Tejada = 308  
x\_Nare\_Flandes = 1000  
y\_Yopal\_Fusagasuga = 230  
y\_Valledupar\_Pto\_Tejada = 192

El escenario 1, muestra una emisión de 3.167.062,091 Kg de CO<sub>2</sub> como cantidad mínima y propone enviar 2000 (Yumbo-Puerto Tejada), 2000 (Cartagena-Barranquilla), 770 (Sogamoso-Fusagasugá), 308 (Montebello-Puerto Tejada), 1000 (Nare-Flandes) toneladas de cemento, mientras que 230 (Yopal-Fusagasugá), 192 (Valledupar-Puerto Tejada) toneladas de ceniza de cascarilla de arroz.

*Escenario 2 (puntos de consolidación)*

solution for: emisiones

objective: 3299670.031

x\_Yumbo\_Pto\_Tejada = 2000

x\_Cartagena\_Barranquilla = 2000

x\_Sogamoso\_Fusagasuga = 770

x\_Montebello\_Pto\_Tejada = 308

x\_Nare\_Flandes = 1000

y\_Valledupar\_Fusagasuga = 958

y\_Yopal\_Fusagasuga = 1152

v\_Fusagasuga\_Fusagasuga = 230

v\_Fusagasuga\_Pto\_Tejada = 192

objective: 3289049.549

x\_Yumbo\_Pto\_Tejada = 2000

x\_Cartagena\_Barranquilla = 1809

x\_Sogamoso\_Fusagasuga = 1000

x\_Montebello\_Pto\_Tejada = 500

x\_Nare\_Flandes = 770

y\_Valledupar\_Ibague = 953

y\_Yopal\_Ibague = 1152

v\_Ibague\_Barranquilla = 191

v\_Ibague\_Flandes = 230

objective: 3245147.284

x\_Yumbo\_Pto\_Tejada = 2000

x\_Cartagena\_Barranquilla = 1809

x\_Sogamoso\_Fusagasuga = 1000

x\_Montebello\_Pto\_Tejada = 500

x\_Nare\_Flandes = 770

y\_Valledupar\_Tunja = 953

y\_Yopal\_Tunja = 1152

v\_Tunja\_Barranquilla = 191

v\_Tunja\_Flandes = 230

objective: 3247565.006

x\_Yumbo\_Pto\_Tejada = 2000

x\_Cartagena\_Barranquilla = 1809

x\_Sogamoso\_Fusagasuga = 1000

x\_Montebello\_Pto\_Tejada = 500

x\_Nare\_Flandes = 770

y\_Valledupar\_Yopal = 953

y\_Yopal\_Yopal = 1152

v\_Yopal\_Barranquilla = 191

v\_Yopal\_Flandes = 230

Entre los 4 puntos de consolidación planteados, el de mejor desempeño fue el de Tunja con unas emisiones de 3.245.147,284 Kg de CO<sub>2</sub> y se sugiere que 2000 Toneladas de cemento sean enviadas de Yumbo a Puerto Tejada, 1809 Toneladas de cemento de Cartagena a Barranquilla, 1000 Toneladas de cemento de Sogamoso a Fusagasugá, 500 Toneladas de cemento de Montebello a Puerto Tejada, 770 Toneladas de cemento de Nare a Flandes, 953



toneladas de cascarilla de arroz desde Valledupar a Tunja, 1152 toneladas de cascarilla de arroz desde Yopal a Tunja, 191 toneladas de CCA desde Tunja a Barranquilla y 230 toneladas de CCA desde Tunja a Flandes.

## **5. Conclusiones**

El escenario con mejor desempeño fue el *escenario 1*, con 3.167.062,091 Kg de CO<sub>2</sub> emitidos. Este escenario muestra beneficios en el uso de cascarilla de arroz como material cementante y sugiere que no es necesario un punto de consolidación o al menos ninguno de los seleccionados para el *escenario 2*.

El factor logístico es un tema de gran importancia en el desarrollo de estrategias para disminuir las emisiones de efecto invernadero, los resultados muestran como el CCA solo es viable como cementante suplementario para las plantas de concreto más cercanas a las trilladoras o al punto de consolidación.

## **Referencias**

- Álvarez Espinosa, A. C., Ordoñez, D. A., Nieto, A., Wills, W., Romero, G., Calderón, S. L., & Delgado, R. (2015). Compromiso de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: Consecuencias económicas. *Departamento Nacional de Planeación DNP. Documento, 440*.
- Argos. (s. f.). Nuestras *plantas en Colombia*. Argos Colombia. Recuperado 18 de enero de 2020, de <https://colombia.argos.co/categoria/plantas/>
- Barreto, A. E. H., Correa, M. M. J., Muñoz, A. O., & de Correa, C. M. (2008). Tecnologías para la reducción de emisiones de gases contaminantes en plantas cementeras. *Ingeniería e Investigación, 28*(3), 41-46.
- León Vélez, A. E. Determinación de la energía contenida y emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación del cemento.
- Rodríguez Sánchez, A. M., & Tibabuzo Jiménez, M. P. (2019). Evaluación de la ceniza de cascarilla de arroz como suplemento al cemento en mezclas de concreto hidráulico.