

Green CFLP: Modelo bi-objetivo de localización de instalaciones con restricciones sobre los impactos ambientales

Gabriel Hincapié Osorno

Marzo 2016

Tesis para optar por el título académico de
Magíster en Ingeniería

Departamento de Ingeniería de Producción
Escuela de Ingeniería
Universidad EAFIT
Medellín

Índice

Resumen	i
1. Introducción	1
2. Revisión de la literatura	3
2.1. Problema de localización y extensiones	3
2.2. Problemas de localización con consideraciones ambientales	4
2.3. Problemas de localización: modelos y consideraciones para la industria cementera	8
3. Objetivos	11
3.1. Objetivo general	11
3.2. Objetivos específicos	11
4. Contexto del problema	12
5. Estrategia de modelado	13
6. Modelo matemático	18
7. Experimentos computacionales	25
8. Conclusiones	38
9. Recomendaciones para trabajos posteriores	39
Agradecimientos	40
Anexos	41

Resumen

Este trabajo de investigación presenta un problema de localización bi-objetivo, como extensión del problema clásico de localización de instalaciones con capacidad (CFLP), aplicado a la industria del cemento. Se consideran los costos y las emisiones de CO₂ en las decisiones de localizar los procesos, así como en la obtención y transporte de recursos estratégicos para la producción de cemento. Esta investigación está motivada por el impacto que pueden tener las decisiones de localización, no sólo en la reducción de costos, sino también en las emisiones de CO₂ ocasionadas por la producción de cemento, las cuales son significativas en el total asociado a la actividad humana. Este problema se ha definido como un problema lineal entero mixto (MILP), y se resuelve con el método de ϵ restricciones. El problema formulado tiene la capacidad de encontrar diferentes configuraciones de la cadena de suministro que se ajustan a las restricciones planteadas. En promedio en el 67 % de los experimentos se encuentra la solución óptima. El tiempo promedio de ejecución de cada experimento fue de 3.9 horas.

Palabras clave: Green CFLP, optimización bi-objetivo, MILP, emisiones de CO₂, método ϵ restricciones.

1. Introducción

En el área de Investigación de Operaciones, el diseño y actualización de una cadena de suministro está ligado al problema conocido como localización de instalaciones, el cual es de suma importancia para dar soporte a la estrategia de una gran variedad de empresas, tanto en el área de servicios como de manufactura. Por ejemplo, la decisión sobre la ubicación de una sucursal bancaria es determinante para el logro de los niveles de cobertura previamente establecidos por la dirección. Del mismo modo, una compañía de manufactura debe procurar que sus instalaciones se encuentren localizadas de tal manera que la empresa pueda simultáneamente satisfacer la demanda esperada en un área geográfica determinada, y obtener un desempeño financiero satisfactorio. Las consideraciones de los ejemplos anteriores están direccionadas a maximizar o minimizar una función objetivo, la cual está generalmente expresada en términos de costos (minimización) o de utilidades (maximización).

En un problema de localización, el modelo para la toma de decisiones incluye la definición de un conjunto de clientes que deben ser atendidos por parte de una o varias instalaciones, las cuales se deben localizar (i.e, ubicar) a partir de un conjunto de posibles ubicaciones candidatas, previamente identificadas. La decisión sobre localización de estas instalaciones se toma con base en un objetivo, para el caso de problemas mono-objetivo o con base en varios objetivos como en el caso de los problemas multi-objetivo.

Dada la necesidad actual de promover iniciativas y esfuerzos para mitigar los efectos adversos sobre el medio ambiente ocasionados por la actividad humana, recientemente en el entorno académico se ha planteado la necesidad de abordar los problemas de localización desde una perspectiva multi-objetivo en la cual se incluya la dimensión ambiental a los ya comunes objetivos económicos. Este nuevo tipo de problemas pretende establecer las condiciones para equilibrar los componentes económicos que definen la viabilidad de una compañía, y los impactos ambientales correspondientes.

Como caso de estudio, la industria cementera es un sector crítico en impactos ambientales, debido a que éste emite entre un 5% y un 7% del total de emisiones de CO₂ de las actividades desarrolladas por el hombre, de acuerdo con [1–4]. La producción mundial de cemento del año 2006 fue de 2.56Gt, y se pronostica un aumento anual del 0.98% al 1.63%, con lo que alcanzará en el año 2050 una producción en el rango de 3.66Gt y 4.30Gt, respectivamente, según lo indica [5]. Esto representa un incremento en la producción de entre 42.9% y 71.8% en el período 2006-2050. Para los artículos publicados en los años 1998, 2007 y 2010, las emisiones de CO₂ están en el rango de 0.65 a 0.94 toneladas por cada tonelada de cemento producido [1], [6–9]. De lo anterior puede inferirse que existe un avance en los procesos productivos del cemento con lo que se ha logrado disminuir las emisiones de CO₂, pero al mismo tiempo no todas las cementeras utilizan las mismas tecnologías y materias primas para su producción.

Debido a la estructura actual del mercado con los tratados de libre comercio (TLC's) con países con grandes desarrollos industriales, es viable que una compañía cementera importe un producto semi-terminado, para que luego lo integre a los procesos de la cadena productiva y se obtenga el resultado deseado. Este caso se presenta con la importación de clínker, el cual puede competir en costo e impactos ambientales con el clínker producido localmente. Esto es posible debido a la existencia de líneas de producción de clínker con capacidades de entre 10000 y 20000 toneladas/día, y que se encuentran ubicadas en ríos aptos para comercio nacional, o en las costas para la distribución internacional, de acuerdo con [10]. Estas opciones para obtener clínker impactan los modelos de localización, en los cuales la decisión de abrir una instalación

está en función de la tecnología y la capacidad a operar, de acuerdo con importar o no clínker, o bien establecer una mezcla de clínker local y clínker importado.

De lo anterior el problema de localización se extiende, al incluir la selección de tecnología y la capacidad de operación de cada una de las instalaciones y procesos. Estas decisiones permiten concentrar la producción, logrando beneficios por economías de escala y reducción de impactos ambientales. Sin embargo, se incrementan las distancias con los clientes y los costos de transporte asociados. El presente trabajo se ocupa del tratamiento de este problema, de modo que el modelo matemático planteado permite encontrar soluciones en las que se concentra la producción o fabricar en una mayor cantidad de instalaciones, elaborando el cemento a partir de clínker local y/o importado. Todo esto se debe dar cumpliendo los objetivos financieros y los ambientales.

Este trabajo se divide de la siguiente forma: En la sección 2 se presenta la revisión de la literatura asociada a los problemas de localización que incluyen variables de impacto medioambiental, así como trabajos que se han realizado para disminuir las emisiones de CO₂ en la industria cementera. En la sección 3 se presentan los objetivos del trabajo. En la sección 4 se propone el contexto del problema. En la sección 5 se plantea la estrategia de solución para el problema formulado. En la sección 6 se plantea la representación matemática del problema. En la sección 7 se exponen los resultados de los experimentos computacionales. En la sección 8 se muestran las conclusiones. En la sección 9 se plantean recomendaciones para trabajos futuros.

2. Revisión de la literatura

2.1. Problema de localización y extensiones

El problema de localización fue inicialmente propuesto por Weber en 1909 [11], citado por [12–14]. En este primer trabajo el objetivo era minimizar la distancia total entre los clientes y una bodega. Este problema se generalizó cuando la cantidad de instalaciones pasó de ser un parámetro a ser una variable. La primera solución a este problema fue propuesta en 1963 por [15], citado por [16], donde con un método aproximado se encuentra una solución, y en la cual no se consideran limitaciones en la capacidad de las instalaciones. Esta versión es conocida como el uncapacited facility location problem (UFLP). En 1974, [17] citado por [16] encuentra una solución exacta del problema en el que se considera la capacidad de las instalaciones. Este modelo se conoce como capacited facility location problem (CFLP).

Con base en los modelos canónicos UFLP y CFLP se han hecho extensiones que involucran variables adicionales para ajustar estos modelos a situaciones determinadas. En la revisión realizada en [16] se encuentran variables tales como número de productos, número de materias primas, demandas determinísticas y estocásticas, problemas estáticos y dinámicos —es decir, los primeros no consideran el instante en el que se toma la decisión de localizar, en cambio en los segundos las decisiones están en función del tiempo, por ejemplo se puede abrir una instalación en un periodo de tiempo y más adelante esta puede ser cerrada incurriendo en unos costos de apertura y de cierre—, entre otros. En 1996, [18] se sugieren nuevos modelos a fin de estimular la investigación en el área. Entre los trabajos que sugieren se encuentran problemas con estructura de costos de transporte no lineales, con funciones objetivo donde se maximiza el retorno de la inversión (TIR), con decisiones que incluyen ruteo de vehículos, entre otros. La complejidad de estos modelos en cuanto a tiempo de cómputo y nivel de incertidumbre en las variables consideradas han sido motivo de investigación, para lo cual se han hecho revisiones, como es el caso de [18].

En la tabla 1 se agrupan algunos trabajos de localización que se destacan por tener dos funciones objetivo —modelos bi-objetivo—, diferenciados por los objetivos considerados y por el método de solución utilizado. En [19] se evidencia que los problemas multi-objetivo empezaron a tener mayor acogida desde 1990, y el objetivo de minimización de costos se acompaña de otros objetivos como riesgo ambiental, accesibilidad a los recursos, distancias recorridas para cumplir con la demanda, la sostenibilidad en las dimensiones económica, ambiental y social, entre otros, y que son objeto de interés para la ingeniería, las matemáticas, las ciencias ambientales, entre otras disciplinas.

	Función objetivo			Método de solución	
	Financiero	Servicio al cliente	Flexibilidad en producción	Exacto	Aproximado
Brimberg, J. y Revelle, C. (1998) [20]	x	x		x	
Sabri, E. H. y Beamon B. M. (2000) [21]	x		x	x	
Villegas, J. G. et al (2006) [22]	x	x		x	x
Bhattacharya, R. y Bandyopadhyay, S. (2010) [23]	x				x
Shankar, B. L. et al. (2013) [24]	x	x			x

Tabla 1: Problemas de localización bi-objetivo

En este tipo de problemas, modelos como los de [20] balancean los costos de producción y distribución, teniendo en cuenta que, como consecuencia, no es posible en todos los casos cumplir con la demanda de los clientes, lo cual es penalizado con un costo. En [21] se plantea como estrategia de solución un modelo matemático no lineal, minimizando, por una parte, los costos fijos de producción, los costos variables de materia prima, el inventario y el transporte, y por otra parte maximizando la capacidad de respuesta a la demanda. Este modelo se compone de múltiples elementos (proveedores, plantas, centros de distribución y clientes); las decisiones que se toman involucran horizontes tanto estratégicos como operativos, y existe incertidumbre en demanda, producción y abastecimiento. El problema se ha resuelto usando el método ϵ restricciones (epsilon-constraint method). En [22] minimizan mediante dos algoritmos genéticos y un método de programación matemática los costos de atender la demanda en los centros de compra de café y los costos fijos en los que se incurre cuando se abren los depósitos de café y maximizan la cobertura de los clientes, teniendo en cuenta que las instalaciones no tienen una capacidad asignada. Este problema ha sido aplicado a una red de suministro de café, en la cual se disminuyeron los costos operacionales (costo de operar un depósito de café y el costo de atender los centros de compra de cada depósito) sin afectar el nivel de servicio. En [23] se desarrolla un metaheurístico evolutivo para minimizar los costos de transporte, inventario y faltantes, a fin de encontrar una solución intermedia en el que el costo de la bodega y el costo de toda la cadena de suministro hagan parte de la frontera de Pareto, demostrando así que las soluciones que se obtienen minimizando de forma individual los costos de cada uno de los niveles (planta de manufactura, bodega central, bodegas locales y centros de distribución) generalmente no hacen parte de la frontera de Pareto. En [24] se propone un metaheurístico basado en la inteligencia de enjambre para el diseño de una cadena de suministro de elaboración de bombas centrífugas, minimizando el costo de apertura de plantas de producción, el costo de inventario y transporte, y maximizando el porcentaje de entregas a clientes.

2.2. Problemas de localización con consideraciones ambientales

La preocupación por el cuidado del medio ambiente ha hecho que diferentes sectores industriales deban convertir sus actividades productivas en actividades responsables con el medio ambiente. Este interés por

disminuir las emisiones en los sectores productivos se asocia a las reducciones potenciales que se pueden lograr, y son establecidas a través de regulaciones que son aplicadas por organizaciones tanto nacionales como internacionales [25].

La reducción de emisiones es más apremiante por el fenómeno del cambio climático, por esto se han generado una gran cantidad de modelos, y se agrupan en lo que se ha denominado *Green Supply Chain Management*. Se recomienda leer la revisión de la literatura [26], en donde figuran publicaciones de entre 1990 y 2005, y de allí establecen un punto de partida en los problemas de manejo de una cadena de suministro verde, y en donde se agrupan los avances en investigación por contexto de problema y metodología de solución. En la revisión realizada en [27] se estudia el diseño de una cadena de suministro sostenible, y en donde 84 de los 87 artículos citados estudian tanto la sostenibilidad financiera como ambiental. También se recomienda leer el trabajo realizado en [28] donde se realiza una revisión de literatura de problemas de optimización multi-objetivo entre los cuales en algunos trabajos se incluyen objetivos ambientales, además proponen un problema de localización que considera objetivos ambientales y la capacidad finita.

En la tabla 2 se agrupan trabajos de localización o de diseño de cadenas de suministro que consideran factores económicos y ambientales.

	Función Objetivo		Método de solución	
	Financiero	Ambiental	Exacto	Aproximado
Diabat y Simchi-Levi (2009) [29]	x		x	
Wang, et al (2011) [30]	x	x	x	
Bojarski, et al (2009) [31]	x	x	x	
Hugo y Pistikopoulos (2005) [32]	x	x	x	
Ramudhin, et al (2008) [33]	x	x	x	
Guillén-Gosálbez y Grossmann (2009) [34]	x	x	x	
Guillén-Gosálbez y Grossmann (2010) [35]	x	x	x	
Treidl y Jammerneegg (2014) [36]	x		x	
Pinto-Varela, et al (2011) [37]	x	x	x	
Corbett, et al (1995) [38]	x	x		x
Neto, et al (2009) [39]	x	x		x
Elhedhli y Merrick (2012) [40]	x	x		x
Maryam Mirhadi, et al (2015) [41]	x	x		x
Miret, et al (2016) [42]	x	x	x	

Tabla 2: Artículos que consideran aspectos financieros y ambientales

Existen diferentes métodos para abordar problemas bi-objetivo, a continuación se plantean dos métodos en los que se convierte a mono-objetivo. En [29] plantea un problema lineal con el que obtiene una solución exacta para un modelo en el que se minimizan los costos fijos y de distribución, y en las restricciones fijan la cantidad máxima de emisiones de CO₂ permitida. En [30] proponen un problema lineal para minimizar los costos fijos, de transporte e inversión en la protección del medio ambiente, de modo que también sean minimizadas las emisiones de CO₂ en producción y transporte. El problema, en principio multi-objetivo es normalizado a fin de ser solucionado como un problema mono-objetivo.

En [31] desarrollan un problema lineal entero mixto (MILP) con el que encuentran soluciones exactas a problemas en los cuales consideran la compra de tecnologías que impactan las emisiones de CO₂, a fin

de maximizar el valor presente neto (VPN) compuesto por ganancias, costos de operación e inversión, y minimizar el daño causado que se valora por medio de catorce categorías intermedias (toxicidad para los humanos, efectos respiratorios, radiación ionizante, entre otros) del indicador IMPACT 2002+, en el cual se incluyen las emisiones asociadas al transporte. [32] diseñan un MILP cuyas funciones objetivo son, por una parte, minimizar el VPN del costo de transporte, materias primas, producción e inventario, y por otra, minimizar las emisiones que producen un efecto negativo en la población, y que son valoradas a partir del Eco-indicador 99 que mide los efectos de las emisiones en la salud humana, la calidad ambiental, el agotamiento de recursos, entre otros.

Algunos modelos logran ser permisivos debido a la forma en que se modelan y a las variables que se tienen en cuenta, penalizando en el indicador financiero el comportamiento que se considera perjudicial en términos ambientales. En [33] se plantea un modelo MILP de minimización de costos fijos, materias primas, producción, transporte y compra de bonos de CO₂, minimizando a su vez las emisiones de CO₂ asociadas a las operaciones de producción y transporte. Aquí el máximo de emisiones posible de CO₂ como restricción del modelo se entiende como las emisiones operativas, las cuales son compensadas con la compra de bonos. La solución encontrada bajo MILP es contrastada con el método de programación por metas. En [34] se desarrolla un modelo no lineal entero mixto (MINLP) con incertidumbre tanto en la necesidad de obtención de materia prima como en el impacto ambiental, a fin de maximizar el VPN compuesto de los factores ventas, costo de la materia prima, costo de producción y transporte. Otro modelo que incluye incertidumbre en el impacto ambiental es el realizado por [35], para lo cual se ha usado un modelo MINLP con un método de ϵ restricciones obteniendo un conjunto de soluciones exactas y por medio del método de ramificación y acotamiento (Branch and Bound) se aseguran que cada uno de estos puntos es un óptimo global. En [36] han usado el método ϵ restricciones en un modelo MILP para minimizar tanto costos de transporte como emisiones. En [37] se realiza un modelo MILP para un problema multi-período donde se toman las decisiones dependiendo de la demanda para cada instante de tiempo en el que se discretiza el problema, que considera en lo económico los costos de instalación, materias primas, producción, almacenamiento y transporte, y lo ambiental las emisiones de CO₂ asociadas a la producción y al transporte.

En [38] plantean un heurístico con el que encuentran una solución aproximada al problema de disminuir la contaminación en lugares preestablecidos donde la financiación de los proyectos descontaminantes es pública, el objetivo financiero es maximizar la utilización del presupuesto disponible, y el objetivo ambiental maximizar la reducción en el impacto ambiental que tienen los proyectos. En [39] desarrollan un modelo enfocado en equilibrar, por una parte, el impacto del reciclaje y el transporte de desechos (área poco explorada, según esta revisión) con las ganancias que de esto puede obtenerse. El modelo usado es un heurístico de dos fases con el que construyen la frontera de Pareto. En [40] proponen un heurístico con el que se encuentra una solución aproximada a partir de una relajación lagrangeana, donde los objetivos son minimizar los costos fijos, costos de manejo de materiales, transporte y ambientales, expresadas en términos emisión, y compra y venta de bonos de CO₂.

2.3. Problemas de localización: modelos y consideraciones para la industria cementera

En el contexto de la industria cementera, en [41] se propone un método para la ubicación de una fábrica de cemento por medio de un proceso analítico jerárquico (AHP). En este proceso se asignan pesos a los factores económico, ambiental y social que acarrea la localización de la instalación, e incluye información cuantitativa y cualitativa. La apertura de la instalación trae beneficios económicos a una comunidad, pero también ésta es afectada por las emisiones producto de su trabajo bajo dicha instalación. En [42] se propone un MILP que minimiza los costos de operación, transporte, inversión y almacenamiento, y a su vez minimiza las emisiones asociadas a producción, transporte y almacenamiento. Se hace una conversión del objetivo ambiental a objetivo financiero a partir del eco-cost, que es el costo de capturar las emisiones. El modelo es planteado para que sea multi-período y los combustibles son biomasa de primera y segunda generación.

A fin de conocer en mayor detalle la huella de carbono de la industria cementera y el impacto que esta tiene en el medio ambiente, se realiza una revisión a la literatura de cómo se ha abordado la reducción de emisiones de CO₂ en esta industria. En la tabla 3 se resumen los trabajos encontrados.

Autores	Característica							
	Nuevo proceso de producción	Localización	Reconversión tecnológica	Reducción CO ₂	Reducción energética	Valoración de los costos	Caso aplicación	Análisis de ciclo de vida
Hendriks, C. A. et al (1998) [1]	x			x	x	x		
Gartner, E. (2004) [43]	x			x	x			
Ogbeide, S. O. (2010) [44]			x	x		x	x	
Chen, C. et al (2010) [3]				x				x
Naranjo, M. et al (2011) [45]	x		x	x				
Moya, J.A. et al (2011) [46]			x	x	x	x		
Ali, M. B. et al (2011) [47]	x		x	x	x	x		
Schneider, M. et al (2011) [48]	x			x	x	x		
Valderrama, C. et al (2012) [49]			x	x	x		x	x
Benhelal, E. et al (2012) [50]	x			x	x			
Liang, X. y Li, J. (2012) [51]			x	x			x	
Mikulčić, H. et al (2013) [52]			x	x	x		x	
Mirhadi Fard, M. et al (2015) [41]		x		x				

Tabla 3: Trabajos de la industria cementera con preocupaciones ambientales

En [1] analiza la producción de cemento por países y/o regiones detallando cuantas emisiones son del

proceso productivo y de la necesidad energética de la producción. Además proponen la reducción de las emisiones de CO₂ por medio de cambios en los procesos productivos, en los combustibles, en las materias primas, entre otros. En [41] se considera la localización como un aspecto clave en la reducción de CO₂, además de involucrar en esta decisión la sostenibilidad económica y social. Es el único artículo de la industria cementera que tiene en cuenta la localización como una forma de reducción de las emisiones. En [44] se estudia el caso de una fabrica cementera con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ por medio de reconversión de tecnologías de producción, uso de combustibles con menor huella de carbono e instalación de tecnologías para captura de CO₂ al final del proceso productivo.

En la revisión de literatura realizada, con el fin de estudiar la forma cómo se aborda la disminución de emisiones de CO₂ de la industria cementera se encontró que los problemas se han abordado de las siguientes formas:

- Se han planteado nuevos procesos productivos donde se incorporan materias primas que tienen menor huella de carbono.
- Se ha aplicado reconversión tecnológica que consiste en modernizar los procesos productivos actuales.
- Se ha valorado el impacto del proceso productivo actual.
- Se ha estudiado la posibilidad de disminuir el impacto de las emisiones de CO₂ por medio de las decisiones de localización.

Ninguno de los trabajos de localización o de diseño de una cadena de suministro o disminución de emisiones de la industria cementera ha planteado un modelo de localización de instalaciones con el que se tomen las siguientes decisiones conjuntamente:

- Transporte de la materia prima.
- Tipo de combustible a utilizar en la producción (calcinación en el horno).
- Transporte del combustible desde la fuente energética para la producción (calcinación en el horno).
- Localización de las instalaciones que conforma el proceso productivo (hornos y moliendas)
- Tecnología de los equipos que conforman el proceso de producción.
- Capacidad instalada en los equipos que conforman el proceso de producción.
- Distribución del producto (cemento) a cada cliente.

Hasta donde se pudo establecer en los estudios que se han realizado, nunca se ha considerado simultáneamente aspectos como:

- Localización de plantas.

- Selección de tecnologías.
- Producción y transporte asociado a cada proceso.
- La posibilidad de importar un producto semi-terminado para un proceso intermedio (Clínker).
- Selección de combustibles.

A propósito de la importación de clínker, una decisión que acompaña el diseño de una cadena de suministro es el transporte, sea producto del comercio local o entre países, y que logra actuar como soporte para la manufactura, tanto en el área de suministro como de comercialización. Como se muestra en [53], el costo del transporte tiene un impacto significativo no solo de la cantidad de transacciones internacionales sino también de la estructura económica de las actividades que se realizan. Las ventajas económicas del transporte dependen de varios factores entre los que se encuentran:

- Las condiciones geográficas.
- El tipo de producto a transportar.
- Las economías de escala.
- La infraestructura.
- El modo de transporte.
- La competencia.
- La regulación por parte de cada gobierno.

El tiempo de transporte y la calidad del servicio son otras variables importantes a la hora de elegir el modo de transporte. La importancia de estas es diferente para cada industria y sus diferentes productos. La forma en como estas variables se relacionan implican un trade off. Por ejemplo, el transporte aéreo es el más rápido y seguro pero al mismo tiempo es el más costoso y el de mayor emisión de CO₂. Por lo tanto, conocer la forma como interactúan estas variables del transporte hace que las tareas de suministro y distribución tomen un papel importante, y en donde se logran operaciones sostenibles tanto en lo financiero como en lo ambiental. En [54] se resalta la importancia que tiene el transporte a gran escala para lograr la disminución de las emisiones de CO₂. En [55] se plantea un problema de localización que tiene la finalidad de representar el comportamiento y beneficios económicos que se obtiene a partir de la producción a gran escala. A lo anterior se suma que la decisión debe tener en cuenta las emisiones de CO₂, al modo de un problema bi-objetivo, lo cual es una oportunidad de investigación para el diseño de una herramienta que ayude a la toma de decisiones de nivel estratégico para la industria cementera.

Debido a la alta huella de carbono de la industria cementera es interesante plantear un modelo estratégico, es decir, de diseño de una cadena de suministro que considere las decisiones nombradas anteriormente, con el objetivo de disminuir las emisiones de CO₂ tanto en la producción como en el transporte.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo de diseño de cadena de suministro para la industria del cemento, de modo que permita sobre los diferentes procesos (extracción, calcinación-importación de clínker, molienda y despacho) la toma de decisiones sobre apertura de instalaciones, inversión en tecnología, compra y flujo de materiales nacionales e importados, y asignación de producción y despacho, de modo que sean considerados minimizados tanto los costos como las emisiones de CO₂ asociadas.

3.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión de la literatura en cuanto a uso de herramientas de optimización para la solución de problemas de gestión ambiental en procesos productivos.
- Plantear un modelo de optimización, tomando como referente un caso de estudio de la industria del cemento.
- Hacer pruebas al modelo planteado, de modo que puedan evidenciarse sus características, para evaluar la robustez del modelo, así como la pertinencia de su formulación.

4. Contexto del problema

La producción de cemento consiste en los siguientes procesos: obtención de materias primas, calcinación que se da en los hornos, molienda donde entra principalmente clínker y yeso, y despacho donde se le envía al cliente producto en sacos o a granel. Las emisiones de CO₂ de la producción de cemento son generadas en los siguientes procesos de producción [2]:

- El 50 % en la calcinación, donde por medio de una reacción química, el carbonato de calcio (CaCO₃) se convierte en óxido de calcio (CaO).
- El 40 % en la combustión en el horno necesaria para el proceso de calcinación.
- El 5 % en el transporte.
- El 5 % restante es de la energía usada en el proceso de manufactura.

Los costos y emisiones del proceso de calcinación dependen del combustible con que se opera. Los hornos tienen la capacidad de realizar la combustión a partir de carbón, gas, desechos orgánicos, desechos industriales o una mezcla de los anteriores.

Con la extracción de las materias primas se da inicio al proceso de producción del cemento. Su principal componente es la piedra caliza que en su mayoría está compuesta por calcita o carbonato de calcio (CaCO₃), que más adelante en el proceso de calcinación por medio de una reacción con el calor pasa a ser óxido de calcio y dióxido de carbono $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. El óxido de calcio reacciona con otros elementos para formar silicatos de calcio y aluminatos. Esta reacción produce un material nodular llamado clínker; esto se da a una temperatura entre 1350 - 1450 °C. El clínker pasa al proceso de molienda donde en una proporción de 70-30 se mezcla con unos aditivos que en su mayoría es yeso, esto con la finalidad de retardar el proceso de fraguado (endurecimiento al ser mezclado con agua), para que pueda ser utilizado en obras civiles.

Debido al desarrollo de nuevas tecnologías de producción en la industria cementera se ha hecho viable en términos económicos y ambientales importar clínker desde un país como China que tiene más del 50 % de la producción y que ha logrado disminuir las emisiones de CO₂ por medio de mejoras en sus procesos productivos [51] y [56].

Es importante entender que si en el proceso se importa clínker, se generaron emisiones de CO₂ por la manufactura y el transporte necesario para disponer de este producto, por lo cual es necesario tener en cuenta estas emisiones de CO₂ en los cálculos.

5. Estrategia de modelado

Como estrategia de solución, el modelo propuesto corresponde al diseño de una cadena de suministro para una compañía de cemento, en donde el problema de localización se resuelve a través de un MILP, para el cual se tienen sitios candidatos para la extracción de la materia prima, para el proceso de calcinación que se da en el horno y para la molienda del clínker con aditivos donde se produce el cemento. Esto compone el proceso productivo. Dicho modelo incluye la consecución de objetivos financieros y ambientales. La decisión de abrir las instalaciones necesarias del proceso productivo considera la tecnología a utilizar, y la capacidad de operación. Las decisiones que se toman para el diseño de la cadena de suministro son:

- i. La compra de materias primas (combustible, caliza y yeso),
- ii. La posibilidad de importar clínker como producto semi-terminado el cual entra directamente al proceso de molienda para así obtener cemento.

De lo anterior, el proceso productivo puede estar compuesto de horno y molienda cuando la operación es enteramente nacional, o solo molienda cuando se utiliza clínker importado como producto semi-terminado, es posible una configuración que mezcle estas dos formas de producción. En la figura 1 se define la cadena de suministro que se plantea. Se excluyen los procesos de homogeneización de la materia prima y el proceso de empaque del producto debido a que sus emisiones no son significativas comparadas con el de los otros procesos.

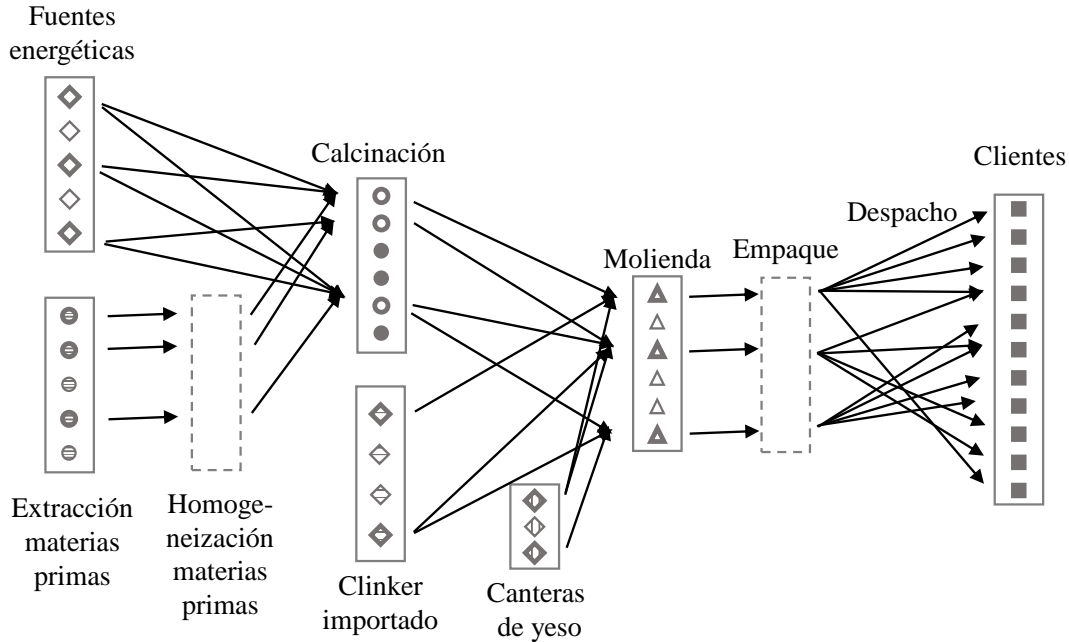


Figura 1: Cadena de suministro del cemento

En la configuración tradicional de la industria cementera las plantas deben estar junto a grandes depósitos de caliza que aseguren su operación por 50 años según [57, 58], lo cual es una condición que define los sitios candidatos para el modelo. Se plantea el modelo con estas características con el fin de permitir que en las posibles soluciones se encuentre la configuración actual de esta cadena de suministro, y que en Colombia no sólo es factible, sino que es llevado a cabo por algunas compañías. En la figura 2 se muestra la localización planteada.

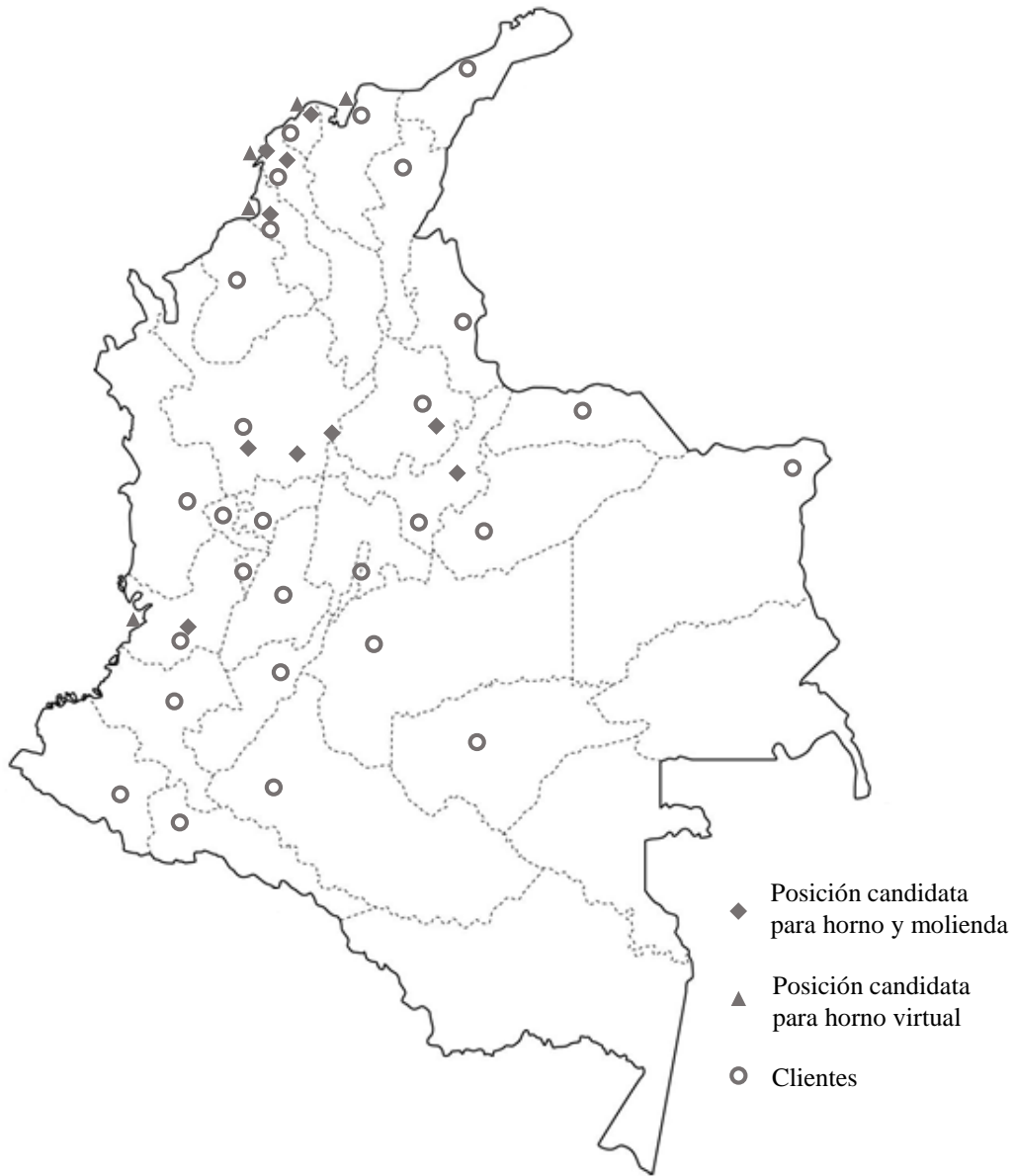


Figura 2: Distribución posiciones candidatas y clientes

Para el modelo, las unidades asociadas a producción de cemento, emisiones de CO_2 asociadas y transporte tienen un rango discretizado. Lo anterior aplica para definir diferentes estructuras de costos y emisiones

en la producción, tal como lo plantea [55] a propósito de los costos de producción y de construcción de la instalación. Dicha discretización puede adoptar múltiples formas, como se puede ver en la figura 3 la representación de funciones (i) lineales, (ii) convexas, (iii) concava, (iv) sigmoideal y (v) escalonada. Para este caso, los costos de producción y las emisiones de CO₂ generadas en la producción tienen una estructura convexa, los costos de transporte tienen una estructura lineal.

Los datos de entrada del modelo se basan en un trabajo de recopilación de la información técnica sobre las oportunidades de mejoramiento ambiental en procesos de producción del cemento, desarrollado dentro del grupo de investigación en Gestión de Producción y Logística de la universidad EAFIT, basado en los artículos [57, 59–61]. La importación de clínker implica considerar costos, de transporte marítimo y las emisiones asociadas. Estos datos son acordes a los publicados en [62].

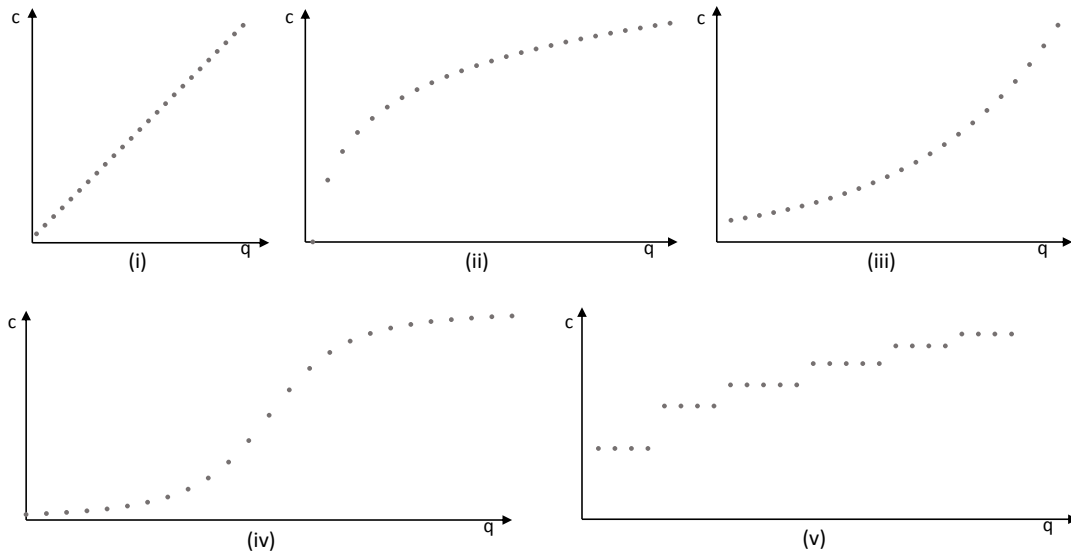


Figura 3: Posibles curvas de costos y emisiones

Para el caso, existen diferentes métodos para la solución de problemas bi-objetivo, tales como la ponderación de objetivos, el *Goal Programming*, el método de ϵ restricciones, entre otros. Para este caso, al igual que en los problemas planteados en [34–36, 39], se usará el método de ϵ restricciones. Este consiste en minimizar cada uno de los objetivos de forma independiente, obteniendo P1 y P2 (ver figura 4a); luego se formula el modelo matemático con restricciones en uno de los objetivos según los valores obtenidos en P1 o P2 y se minimiza el objetivo del cual no se tuvo en cuenta sus valores, con esto se obtiene los puntos PR \mathcal{E} 1 – PR \mathcal{E} 5 (ver figura 4b) que conforman la llamada frontera de Pareto. Estos puntos son soluciones no dominadas por otras en términos de sus funciones objetivo.

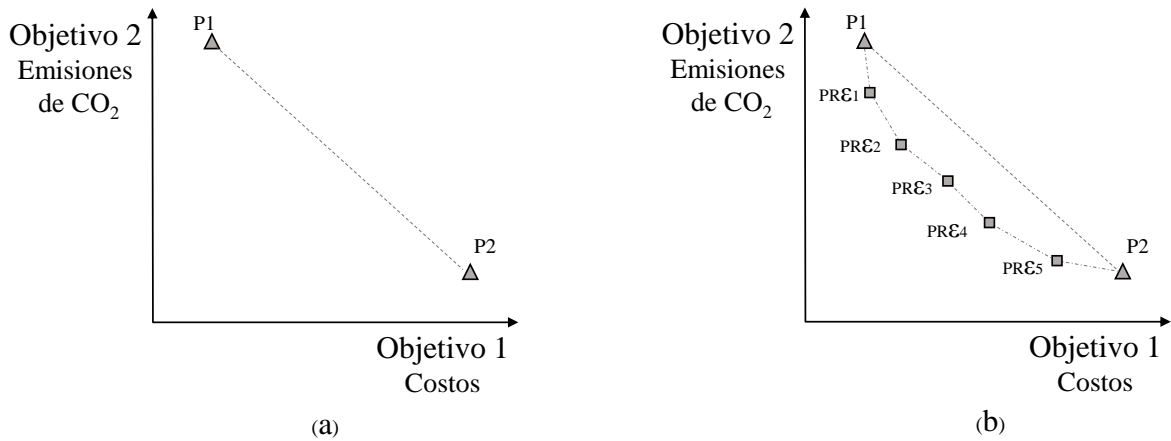


Figura 4: Método de solución de ϵ restricciones

La decisión acerca de cual de las soluciones no dominadas seleccionar se deja a la compañía, que conoce el funcionamiento de esta industria. Esta decisión va a estar condicionada tanto por el presupuesto que tiene la empresa para la inversión como por las regulaciones ambientales por parte del gobierno al momento de realizar el diseño de la cadena productiva. En las tablas 4 y 5 se especifica cuáles son las variables económicas y ambientales respectivamente, que definen el alcance de este modelo.

Objetivo de la reducción de los costos	Cadena de suministro industria cementera							
	Materias primas	Combustibles	Horno y molienda	Electricidad necesario para la producción	Terreno	Producto en proceso	Importación producto semi terminado (clínker)	Producto terminado
Compra	x	x	x	x	x	No tiene	x	No tiene
Transporte	x	x	No se considera	No tiene	No tiene	x	x	x
Proceso productivo	No se considera	No tiene	x	No tiene	No tiene	x	No tiene	No tiene

Tabla 4: Consideraciones económicas del problema

Objetivo de la reducción de las emisiones	Cadena de suministro industria cementera						
	Fabricación de equipos	Producción combustible	Producción materias primas	Adecuación instalaciones	Producción del clínker	Molienda del clínker	Transporte y distribución
Emisiones indirectas CO₂ relacionado con el consumo de electricidad	No se considera	x	No se considera	No se considera	x	x	No se considera
Emisiones CO₂ para cada posible combustible	No se considera	x	No se considera	No se considera	x	No tiene	x
Emisiones CO₂ en el proceso de calcinación	No se considera	No tiene	No se considera	No se considera	x	No tiene	No tiene

Tabla 5: Consideraciones ambientales del problema

6. Modelo matemático

El modelo matemático para la solución del problema se plantea de la siguiente forma:

Conjuntos e Índices:

- Q, q : Canteras para extracción de materia prima para elaboración de cemento.
- N, n : Unidades asociadas a producción en cantera (extracción).
- E, e : Fuentes de recursos energéticos.
- F, f : Combustibles para el proceso de calcinación.
- P, p : Proyectos para proceso de calcinación.
- K, k : Procesos de calcinación (hornos).
- W, w : Unidades asociadas a producción en horno (calcinación).
- V, v : Procesos de calcinación virtuales. Este proceso auxiliar tiene como función representar la importación de clínker, el cual ya opera como producto listo para la molienda.
- U, u : Unidades asociadas a procesos de calcinación virtuales (clínker importado).
- Y, y : Fuentes de extracción de Yeso.
- R, r : Proyectos para proceso de molienda.
- M, m : Procesos de Molienda.
- S, s : Unidades asociadas a producción en molienda.
- C, c : Clientes.

Parámetros:

- d_c : Demanda de cemento del cliente $c, c \in C$
- a_q : Capacidad de explotación de la cantera $q, q \in Q$
- b_p : Capacidad máxima para asignar al proyecto $p, p \in P$ un proceso de calcinado.
- g_r : Capacidad máxima para asignar al proyecto $r, r \in R$ un proceso de molienda.
- δ : Incremento de producción en las canteras de caliza.
- α_p : Incremento de capacidad en el proyecto p para el proceso de calcinado, $p \in P$
- β_r : Incremento de capacidad en el proyecto r para el proceso de molienda, $r \in R$

Los parámetros δ , α_p y β_r permiten establecer los rangos de producción para los procesos de extracción, calcinado y molienda, respectivamente, de acuerdo con lo visto en la sección 5, figura 1.

- h_{qk} : Costo de transporte de una unidad de materia prima desde la cantera $q, q \in Q$, al proceso de calcinación $k, k \in K$; el factor de costo del transporte terrestre afecta este parámetro.
- i_{ek} : Costo de transporte de una unidad [de combustible] desde una fuente de recurso energético $e, e \in E$ al proceso de calcinación $k, k \in K$; el factor de costo del transporte terrestre afecta este parámetro.
- j_{km} : Costo de transporte de una unidad de clínker local desde el proceso de calcinación $k, k \in K$ al proceso de molienda $m, m \in M$; el factor de costo del transporte terrestre afecta este parámetro.
- l_{vm} : Costo de transporte de una unidad desde el proceso virtual de calcinación (clínker importado) $v, v \in V$ al proceso de molienda $m, m \in M$; el factor de costo del transporte terrestre afecta este parámetro.

- ω_{ym} : Costo de transporte de una unidad de yeso desde la fuente $y, y \in Y$ al proceso de molienda $m, m \in M$; el factor de costo del transporte terrestre afecta este parámetro.
- ψ_{mc} : Costo de transporte de una unidad de cemento desde el proceso de molienda $m, m \in M$ al cliente $c, c \in C$; el factor de costo del transporte terrestre afecta este parámetro.
- ϕ_p^k : Costo de instalar el proceso de calcinación (horno) $k, k \in K$, para el proyecto $p, p \in P$
- ϕ_r^m : Costo de instalar el proceso de molienda $m, m \in M$, para el proyecto $r, r \in R$
- τ_{qn}^q : Costo de extraer $\delta \cdot n$ unidades, $n \in N$, de la cantera $q, q \in Q$
- τ_{pw}^k : Costo de producir $\alpha_p \cdot w$ unidades, $w \in W$, en el proceso de calcinación $k, k \in K$ del proyecto $p, p \in P$
- τ_{rs}^m : Costo de producir $\beta_r \cdot s$ unidades, $s \in S$, en el proceso de molienda $m, m \in M$, del proyecto $r, r \in R$
- τ_{vu}^v : Costo de importar $\varphi \cdot u$ unidades de clínker, $u \in U$, al horno virtual $v, v \in V$
- σ_{qk}^q : Distancia entre la cantera $q, q \in Q$ y el proceso de calcinación $k, k \in K$
- σ_{ek}^e : Distancia entre la fuente de recurso energético $e, e \in E$ y el proceso de calcinación $k, k \in K$
- σ_{km}^k : Distancia entre el proceso de calcinación $k, k \in K$ y el proceso de molienda $m, m \in M$
- σ_{vm}^v : Distancia entre el horno virtual $v, v \in V$ y el proceso de molienda $m, m \in M$
- σ_{ym}^y : Distancia entre la fuente de yeso $y, y \in Y$, y el proceso de molienda $m, m \in M$
- σ_{mc}^m : Distancia entre el proceso de molienda $m, m \in M$ y el cliente $c, c \in C$
- ρ_q^q : Costo de apertura de la cantera $q, q \in Q$
- ρ_{kp}^k : Costo de apertura del proceso de calcinación $k, k \in K$ asociada al proyecto $p, p \in P$
- ρ_{mr}^m : Costo de apertura del proceso de molienda $m, m \in M$ con el proyecto $p, p \in P$
- φ : Capacidad de transporte marítimo para el clínker importado.
- π_{ef} : Capacidad calórica del recurso energético $e, e \in E$, combustible $f, f \in F$
- ξ_{pf} : Vector de factibilidad de un proyecto $p, p \in P$ con un combustible $f, f \in F$
- ν_{ef} : Vector de correspondencia entre una fuente de recurso energético $e, e \in E$ y las fuentes de combustible $f, f \in F$ que allí se encuentran.
- μ_e^e : Costo del recurso energético disponible $e, e \in E$
- μ_y^y : Costo del yeso disponible en la fuente de yeso $y, y \in Y$
- λ_p : Necesidad energética del proceso de calcinación operando con la tecnología factible para el proyecto $p, p \in P$
- κ_{pw} : Emisiones de CO₂ por unidad producida en proceso de calcinación para el proyecto $p, p \in P$, según la capacidad de operación $w, w \in W$
- θ_v : Emisiones de CO₂ en la producción y el transporte de φ unidades de clínker importada a un horno virtual $v, v \in V$
- η_{rs} : Emisiones de CO₂ por unidad de producción en molienda para el proyecto $r, r \in R$, según la capacidad de operación $s, s \in S$
- ζ_p : Costos fijos del proyecto de calcinación $p, p \in P$
- ϵ_r : Costos fijos del proyecto de molienda $r, r \in R$
- γ : Factor de impacto ambiental unitario del transporte terrestre.
- t : Emisión unitaria del transporte terrestre.
- z : Emisión máxima permitida en procesos de producción y transporte.

Variables de decisión:

X_{qn}^a Variable binaria X_{qn}^a toma el valor de 1 si n es la cantidad producida en la cantera $q \in Q$ y 0 de lo contrario.

X_{kwpf}^b Variable binaria. X_{kwpf}^b toma el valor de 1 si w es la cantidad producida en el horno k con el proyecto p y el combustible f y 0 de lo contrario.

X_{msr}^c Variable binaria. X_{msr}^c toma el valor de 1 si s es la cantidad producida en la molienda m con el proyecto r y 0 de lo contrario.

X_{ef}^d Cantidad comprada en e del combustible f

X_y^e Cantidad de yeso comprado en $y \in Y$

X_{vu}^f Variable binaria. X_{vu}^f toma el valor de 1 si en el horno virtual v se importa la cantidad u y 0 de lo contrario.

t_{qk}^g Cantidad transportada desde la cantera q hasta el horno k

t_{ekf}^h Cantidad transportada desde la fuente de recurso energético e hasta el horno k de combustible f

t_{km}^i Cantidad transportada desde el horno k hasta la molienda $m \in M$

t_{vm}^j Cantidad transportada desde el horno virtual v hasta la molienda $m \in M$

t_{ym}^k Cantidad transportada desde la fuente de yeso $y \in Y$ hasta la molienda $m \in M$

t_{mc}^l Cantidad transportada desde la molienda $m \in M$ hasta el cliente $c \in C$

Función objetivo:

Para la definición de las dos funciones objetivo, se definen primero las siguientes variables, expresadas en términos de las variables enunciadas previamente:

Costos de apertura de las instalaciones

$$CAI = \sum_{q \in Q} \sum_{n \in N} X_{qn}^a \cdot \rho_q^q + \sum_{k \in K} \sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} X_{kwpf}^b \cdot \rho_{kp}^k + \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} X_{msr}^c \cdot \rho_{mr}^m \quad (1)$$

Costo de inversión tecnológica

$$CIT = \sum_{k \in K} \sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} X_{kwpf}^b \cdot \phi_p^k + \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} X_{msr}^c \cdot \phi_r^m \quad (2)$$

Costos de producción (costos fijos y variables)

$$CP = \sum_{k \in K} \sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} X_{kwpf}^b \cdot \zeta_p + \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} X_{msr}^c \cdot \epsilon_r \quad (3)$$

$$\sum_{q \in Q} \sum_{n \in N} X_{qn}^a \cdot \tau_{qn}^q + \sum_{k \in K} \sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} X_{kwpf}^b \cdot \tau_{pw}^k + \sum_{g \in G} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} X_{msr}^c \cdot \tau_{msr}^m$$

Compra de clínker importado

$$CCI = \sum_{v \in V} \sum_{u \in U} X_{vu}^f \cdot \tau_{vu}^v \quad (4)$$

Compra de recurso energético y yeso

$$CEY = \sum_{r \in R} \sum_{f \in F} X_{rf}^e \cdot \mu_e^e + \sum_{y \in Y} X_y^e \cdot \mu_y^y \quad (5)$$

Costos de transporte

$$\begin{aligned}
CT = & \sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} t_{qk}^g \cdot h_{qk} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} t_{km}^i \cdot j_{km} + \sum_{v \in V} \sum_{m \in M} t_{vm}^j \cdot l_{vm} \\
& + \sum_{e \in E} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} t_{ekf}^h \cdot i_{ek} + \sum_{y \in Y} \sum_{m \in M} t_{ym}^k \cdot \omega_{ym} + \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} t_{mc}^l \cdot \psi_{mc}
\end{aligned} \tag{6}$$

Impacto en la operación en los hornos

$$IOK = \sum_{k \in K} \sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \alpha_p \cdot X_{kwpf}^b \cdot \kappa_{pw} \cdot w \tag{7}$$

Impacto en la operación y transporte del clínker importado

$$IOV = \sum_{v \in V} \sum_{u \in U} X_{vu}^k \cdot \theta_v \cdot u \tag{8}$$

Impacto en la operación en las moliendas

$$IOM = \sum_{m \in M} \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \beta_r \cdot X_{msr}^c \cdot \eta_{sr} \cdot s \tag{9}$$

Impacto en el transporte cantera-horno

$$ITQ = \sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} t_{qk}^g \cdot \sigma_{qk}^q \cdot t \tag{10}$$

Impacto en el transporte recurso energético-horno

$$ITE = \sum_{r \in R} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} t_{rkf}^r \cdot \sigma_{rk}^r \cdot t \tag{11}$$

Impacto en el transporte horno-molienda

$$ITK = \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} t_{km}^i \cdot \sigma_{km}^k \cdot t \tag{12}$$

Impacto en el transporte horno virtual-molienda

$$ITV = \sum_{v \in V} \sum_{m \in M} t_{vm}^j \cdot \sigma_{vm}^v \cdot t \tag{13}$$

Impacto en el transporte yeso-molienda

$$ITY = \sum_{y \in Y} \sum_{m \in M} t_{ym}^k \cdot \sigma_{ym}^y \cdot t \tag{14}$$

Impacto en el transporte molienda-cliente

$$ITM = \sum_{m \in M} \sum_{c \in C} t_{mc}^l \cdot \sigma_{mc}^m \cdot t \tag{15}$$

De lo anterior se plantean las dos funciones objetivo:

Costos

$$\text{Min } CAI + CIT + CP + CCI + CEY + CT \quad (16)$$

Impacto ambiental en emisiones de CO₂

$$\text{Min } IOK + IOV + IOM + ITQ + ITE + ITK + ITV + ITY + ITM \quad (17)$$

Restricciones:

Las restricciones se muestran a continuación:

$$\sum_{n \in N} \delta \cdot n \cdot X_{qn}^a \geq \sum_{k \in K} t_{qk}^g \quad \forall q \in Q \quad (18)$$

$$\sum_{e \in E} \pi_{ef} \cdot X_{ef}^d \cdot \nu_{ef} \geq \sum_{k \in K} \sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \alpha_p \cdot w \cdot X_{kwpf}^b \cdot \lambda_p \quad \forall f \in F \quad (19)$$

$$X_{ef}^d \leq \sum_{k \in K} t_{ekf}^h \quad \forall e \in E \quad \forall f \in F \quad (20)$$

$$\sum_{e \in E} t_{ekf}^h \cdot \pi_{ef} \geq \sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \alpha_p \cdot X_{kwpf}^b \cdot \lambda_p \quad \forall k \in K \quad \forall f \in F \quad (21)$$

$$\sum_{q \in Q} t_{qk}^g \geq \sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \alpha_p \cdot w \cdot X_{kwpf}^b \quad \forall k \in K \quad (22)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \alpha_p \cdot w \cdot X_{kwpf}^b \geq \sum_{m \in M} t_{km}^i \quad \forall k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{u \in U} X_{vu}^f \cdot u \cdot \varphi \geq \sum_{m \in M} t_{vkm}^v \quad \forall v \in V \quad (24)$$

$$X_y^e = \sum_{m \in M} t_{ym}^k \quad \forall y \in Y \quad (25)$$

$$\sum_{k \in K} t_{km}^i + \sum_{v \in V} t_{vm}^j + \sum_{y \in Y} t_{ym}^k \geq \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \beta_r \cdot n \cdot X_{msr}^c \quad \forall m \in M \quad (26)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \beta_r \cdot s \cdot X_{msr}^c \geq \sum_{c \in C} t_{mc}^l \quad \forall m \in M \quad (27)$$

$$\sum_{m \in M} t_{mc}^m \geq d_c \quad \forall c \in C \quad (28)$$

$$\left(\sum_{k \in K} t_{km}^i + \sum_{v \in V} t_{vm}^j \right) \cdot (1/0,7) \geq \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \beta_r \cdot s \cdot X_{msr}^c \quad \forall m \in M \quad (29)$$

$$\sum_{y \in Y} t_{ym}^k \cdot (1/0,3) \geq \sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \beta_r \cdot s \cdot X_{msr}^c \quad \forall m \in M \quad (30)$$

$$\sum_{n \in N} \delta \cdot n \cdot X_{qn}^q \leq a_q \quad \forall q \in Q \quad (31)$$

$$\sum_{w \in W} \alpha_p \cdot w \cdot X_{kwpf}^b \leq b_p \quad \forall k \in K \quad \forall p \in P \quad \forall f \in F \quad (32)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} \beta_r \cdot s \cdot X_{msr}^c \leq g_r \quad \forall m \in M \quad (33)$$

$$\sum_{n \in N} X_{qn}^q \leq 1 \quad \forall q \in Q \quad (34)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} X_{kwpf}^b \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (35)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{r \in R} X_{msr}^m \leq 1 \quad \forall m \in M \quad (36)$$

$$\sum_{u \in U} X_{vu}^v \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (37)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{w \in W} \sum_{f \in F} X_{kwpf}^b \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (38)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{s \in S} X_{msr}^c \leq 1 \quad \forall m \in M \quad (39)$$

$$t_{qk}^q \geq 0 \quad \forall q \in Q, \quad \forall k \in K \quad (40)$$

$$t_{ek}^r \geq 0 \quad \forall e \in E, \quad \forall k \in K \quad (41)$$

$$t_{km}^k \geq 0 \quad \forall k \in K, \quad \forall m \in M \quad (42)$$

$$t_{ym}^y \geq 0 \quad \forall y \in Y, \quad \forall m \in M \quad (43)$$

$$t_{mc}^m \geq 0 \quad \forall m \in M, \quad \forall c \in C \quad (44)$$

$$X_{ef}^d \geq 0 \quad \forall e \in E \quad \forall f \in F \quad (45)$$

$$X_y^e \geq 0 \quad \forall y \in Y \quad (46)$$

$$X_{qn}^a \in \{0,1\} \quad \forall q \in Q, \quad \forall n \in N \quad (47)$$

$$X_{vu}^f \in \{0,1\} \quad \forall v \in V, \quad \forall u \in U \quad (48)$$

$$X_{kwpf}^b \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \quad \forall w \in W, \quad \forall p \in P \quad \forall f \in F \quad (49)$$

$$X_{msr}^c \in \{0,1\} \quad \forall m \in M, \quad \forall s \in S, \quad \forall r \in R \quad (50)$$

La expresión (18) indica que la cantidad de extracción de las canteras asignadas a un proceso de calcinación debe ser mayor o igual a la cantidad transportada de dichas canteras al proceso de calcinación.

La expresión (19) indica que lo requerido de cada combustible para los procesos de calcinación debe ser mayor o igual a la necesidad energética requerida en el proceso de calcinación, de acuerdo con la tecnología instalada y la producción en el horno.

La expresión (20) indica que la cantidad de combustible que es comprada en cada fuente energética sea, a lo sumo, igual al combustible transportado entre las fuentes de recursos energéticos y el proceso de calcinación que le corresponde.

La expresión (21) indica que el combustible transportado hasta el proceso de calcinación es al menos igual a la necesidad calórica de cada horno de calcinación, de acuerdo con el combustible con que opera.

La expresión (22) indica que lo transportado a cada proceso de calcinación desde las canteras debe ser al menos igual a su producción correspondiente en los hornos.

La expresión (23) indica que lo producido en cada proceso de calcinación debe ser como mínimo lo transportado desde dicho proceso al proceso de molienda.

La expresión (24) indica que la cantidad de clínker importado debe ser como mínimo lo transportado desde cada proceso de calcinación al proceso de molienda.

La expresión (25) indica que la compra de yeso debe ser igual a la cantidad de yeso transportada de cada fuente de yeso a los procesos de molienda.

La expresión (26) indica que todo lo que debe ser transportado al proceso de molienda (yeso y clínker, sea nacional o importado) debe ser al menos igual a la cantidad de molienda que debe ser enviado a los clientes asignados.

La expresión (27) indica que lo producido desde cada proceso de molienda debe ser al menos igual a la cantidad de molienda que debe ser enviada a los clientes asignados.

La expresión (28) indica que la cantidad de molienda que debe ser enviada a los clientes asignados debe ser como mínimo lo que el cliente ha demandado.

La expresión (29) indica que el total de clínker enviado al proceso de molienda (nacional + importado) debe sumar como mínimo el 70% del material que compone el proceso de molienda. La expresión (30) indica que el total de yeso enviado al proceso de molienda debe ser como mínimo el 30% del material que compone el proceso de molienda.

La expresión (31) a (33) indica que lo producido en las canteras, procesos de calcinación (hornos) y procesos de molienda no supere la capacidad máxima de dichos procesos, sean de explotación (canteras) o de producción (hornos, moliendas).

La expresión (34) indica que en cada cantera solo puede producirse una cantidad determinada. La expresión (35) y (36) indica que cada proceso de calcinación y molienda está determinado por una sola tecnología y una sola capacidad.

La expresión (37) indica que solo puede importarse una cantidad determinada de clínker para un proceso virtual de calcinación.

La expresión (38) indica que cada proceso de calcinación está determinado por una sola tecnología, una sola cantidad producida y un solo combustible.

La expresión (39) indica que cada proceso de molienda está determinado por una sola tecnología y una sola cantidad producida.

Las ecuaciones (40) a (50) corresponden al dominio de las variables de decisión.

7. Experimentos computacionales

Se realizaron un conjunto de experimentos computacionales con el fin de evaluar el desempeño del modelo matemático. Se implementa el MILP en Xpress IVE, y se generaron archivos en formato mps para ser ejecutados en Gurobi 5.6.0 en computadores con procesadores Intel(R) Xeon(R) CPU E5410 @ 2.33GHz/ 8 Cores y 16 GB RAM y sistema operativo Rocks 6.1.1. Se usaron un total de 24 instancias de prueba, las cuales se resolvieron por medio del método ϵ restricciones para su solución. Para cada instancia se obtuvieron 40 puntos, se obtuvieron 20 puntos minimizando los costos y otros 20 minimizando el impacto ambiental. Para cada experimento se tuvo como criterio de parada un tiempo de ejecución de máximo 28.800 segundos (8 horas).

La demanda anual de cemento en Colombia es conocida. Esta se asigna a cada departamento según su población, y varía desde 0.55 hasta 4 veces la demanda actual. El aumento pronosticado de la demanda total actual para el año 2050, de acuerdo con [5], es 1.57 veces respecto del año 2006. Para el transporte, el costo está dado en dólares por kilómetro recorrido, y cuya variación está comprendida entre 0.01 hasta 0.9. El costo de importar clínker es en todos los escenarios de 32 dólares por tonelada, a lo cual se suma el costo de alquilar un barco con capacidad de 60000 toneladas durante 35 días, que equivale a un valor de 700000 dólares; el costo del combustible es de 200000 dólares, y el costo de transitar por el canal de Panamá es de 80000 dólares. Los costos de anualizar la inversión de los hornos y moliendas varia en bajo (15 años) y alto (25 años). Estas variaciones en los parámetros se dan con el fin de validar el modelo en diferentes escenarios. En la tabla 6 se resumen los escenarios en los que varían las instancias.

La capacidad de explotación máxima depende de las reservas conocidas de cada cantera, para este caso son suficientemente grandes para que sea capaz de atender el horno con mayor capacidad de producción. Las capacidades máximas para los proyectos de calcinación y molienda corresponden a los datos publicados en los trabajos realizados por [57, 59–61], los costos y emisiones de estos proyectos también se basan en estos artículos. El incremento en la producción en las canteras es de la mitad de la producción mínima del horno más pequeño, esto con el fin de discretizar solo 20 capacidades de producción para este proceso, debido a que no es un proceso crítico. El incremento de la capacidad de los proyectos de calcinado es del 0.5 % respecto a la capacidad máxima de producción del proyecto seleccionado, este nivel de discretización debido al impacto de este proceso en costos y emisiones. El incremento de la capacidad de los proyectos en la molienda es del 5 % respecto a la capacidad máxima de producción del proyecto seleccionado. La producción mínima en los hornos y moliendas es del 50 % de su capacidad máxima, esto con la finalidad de que los valores de costos y emisiones estén en los rangos de operación normales para esta industria, se discretiza la producción en 100 y 20 capacidades de producción respectivamente para los hornos y las moliendas. Los costos de transporte están asociados a la distancia recorrida entre origen y destino. La distancia entre origen y destino, es la ruta por carretera de menor distancia que une estos puntos.

Demanda	Factor costo de transporte terrestre	Costo clínker importado	Tiempo amortización inversión horno y molienda
0.55 veces la demanda del mercado	Bajo (0.01)	Bajo	Bajo (15 años)
	Medio (0.12)		Alto (25 años)
	Alto (0.9)		Bajo (15 años)
	Bajo (0.01)		Alto (25 años)
	Medio (0.12)		Bajo (15 años)
	Alto (0.9)		Alto (25 años)
Demanda actual del mercado	Bajo (0.01)		Bajo (15 años)
	Medio (0.12)		Alto (25 años)
	Alto (0.9)		Bajo (15 años)
	Bajo (0.01)		Alto (25 años)
	Medio (0.12)		Bajo (15 años)
	Alto (0.9)		Alto (25 años)
1.57 veces la demanda actual del mercado	Bajo (0.01)		Bajo (15 años)
	Medio (0.12)		Alto (25 años)
	Alto (0.9)		Bajo (15 años)
	Bajo (0.01)		Alto (25 años)
	Medio (0.12)		Bajo (15 años)
	Alto (0.9)		Alto (25 años)
4 veces la demanda actual del mercado	Bajo (0.01)	Bajo (15 años)	
	Medio (0.12)	Alto (25 años)	
	Alto (0.9)	Bajo (15 años)	
	Bajo (0.01)	Alto (25 años)	
	Medio (0.12)	Bajo (15 años)	
	Alto (0.9)	Alto (25 años)	

Tabla 6: Configuración instancias de prueba del modelo matemático

El tiempo promedio de ejecución de los experimentos para el total de las fronteras fue de 3.9 horas, donde la cantidad promedio de soluciones óptimas encontradas del total de las fronteras fue de 26.79 soluciones.

Para el modelo propuesto es más difícil encontrar soluciones cuando se minimizan los costos que cuando se minimizaron el impacto. A esta conclusión se puede llegar debido a que cuando se minimizaron los costos en 163 casos no se encontró una solución entera, en cambio cuando se minimizó el impacto en solo 30 casos no se encontró una solución entera. En la tabla 7 se detalla cada uno de los parámetros que se tuvo en cuenta para la construcción de las fronteras de Pareto.

	Parámetros		
	Demanda	Factor costo transporte	Años amortización inversión hornos y moliendas
Frontera Pareto 1 (F1)	0.55	0.01	15
Frontera Pareto 2 (F2)	0.55	0.12	15
Frontera Pareto 3 (F3)	0.55	0.9	15
Frontera Pareto 4 (F4)	0.55	0.01	25
Frontera Pareto 5 (F5)	0.55	0.12	25
Frontera Pareto 6 (F6)	0.55	0.9	25
Frontera Pareto 7 (F7)	1	0.01	15
Frontera Pareto 8 (F8)	1	0.12	15
Frontera Pareto 9 (F9)	1	0.9	15
Frontera Pareto 10 (F10)	1	0.01	25
Frontera Pareto 11 (F11)	1	0.12	25
Frontera Pareto 12 (F12)	1	0.9	25
Frontera Pareto 13 (F13)	1.57	0.01	15
Frontera Pareto 14 (F14)	1.57	0.12	15
Frontera Pareto 15 (F15)	1.57	0.9	15
Frontera Pareto 16 (F16)	1.57	0.01	25
Frontera Pareto 17 (F17)	1.57	0.12	25
Frontera Pareto 18 (F18)	1.57	0.9	25
Frontera Pareto 19 (F19)	4	0.01	15
Frontera Pareto 20 (F20)	4	0.12	15
Frontera Pareto 21 (F21)	4	0.9	15
Frontera Pareto 22 (F22)	4	0.01	25
Frontera Pareto 23 (F23)	4	0.12	25
Frontera Pareto 24 (F24)	4	0.9	25

Tabla 7: Parámetros utilizados para la elaboración de las fronteras de Pareto

En las figuras 5 y 6 se comparan las fronteras de Pareto de los experimentos realizados en los cuales algunas soluciones son débilmente dominadas. En las figuras 7 y 8, se comparan las mismas fronteras pero en estas no están las soluciones con dominancia débil, en las gráficas con demanda de 0.55 veces la demanda actual del mercado las cantidad de soluciones pasaron de cuarenta a solo cuatro. Para todas las gráficas se puede observar que el comportamiento de los puntos en la frontera tienen la misma forma, donde los puntos de los experimentos con un menor tiempo de amortización (15 años) se encuentran desplazados a la derecha en el eje del costo total respecto a los experimentos con mayor tiempo de amortización (25 años). Los puntos de las fronteras de Pareto que se encuentran en la figura 5 que hacen parte de los datos con demanda 0.55 comparten las mismas decisiones. La explicación a esto es la poca cantidad de soluciones factibles que existen para este problema con demanda baja. Para problemas con demanda mayor existen una mayor cantidad de soluciones factibles y las fronteras de Pareto siguen con el mismo comportamiento entre cada pareja de experimentos que se diferencian en el tiempo de amortización, pero las decisiones que se toman no siempre son las mismas para cada pareja de puntos.

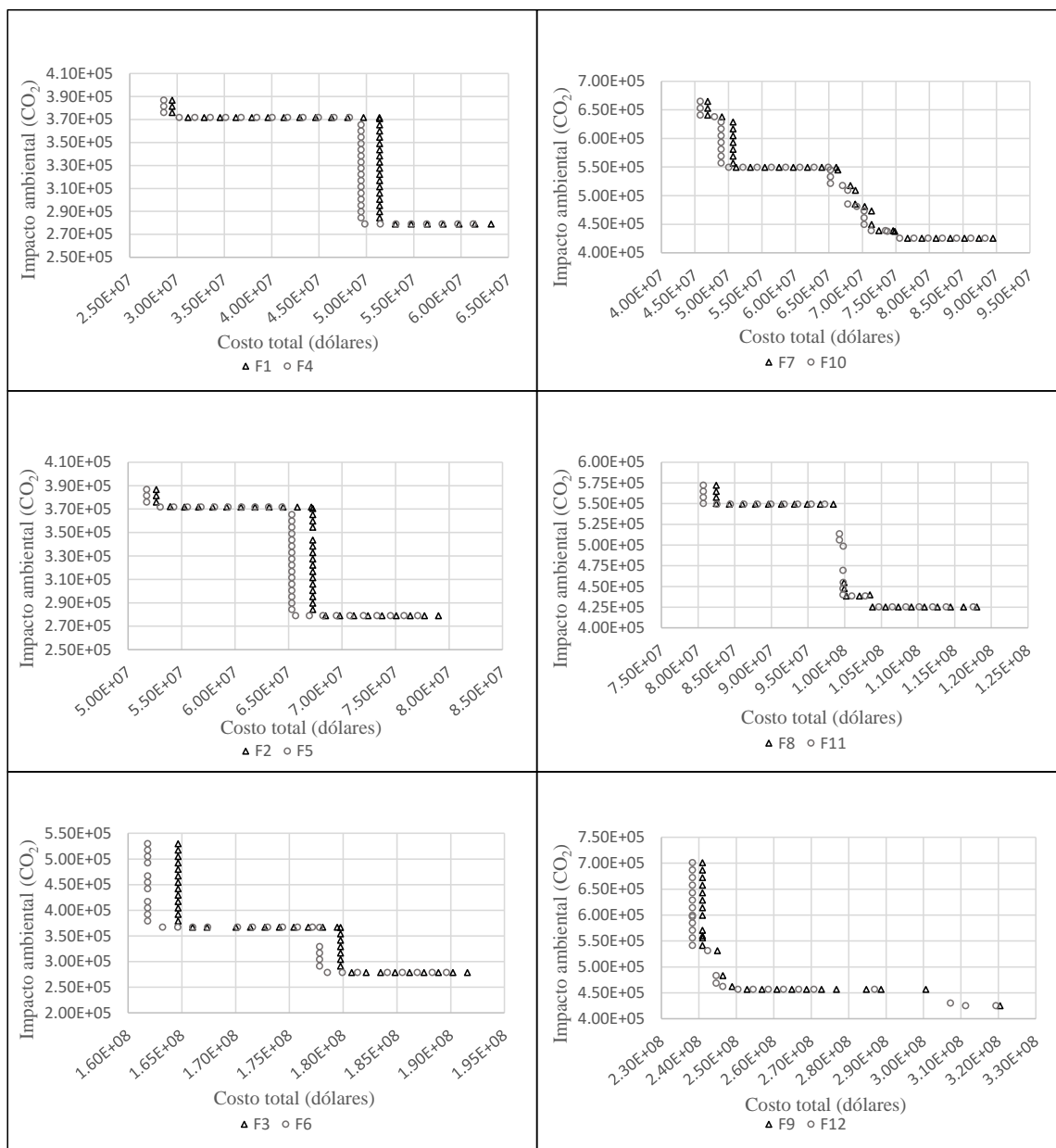


Figura 5: Fronteras de Pareto con demandas de 0.55 y 1 veces la actual

En la figura 6 en F15 vs F18 se puede observar que hay una región en la cual no se tienen soluciones pero por las soluciones vecinas a estas se puede determinar el rango de estas soluciones en caso de que existan. Esto mismo sucede para otras gráficas.

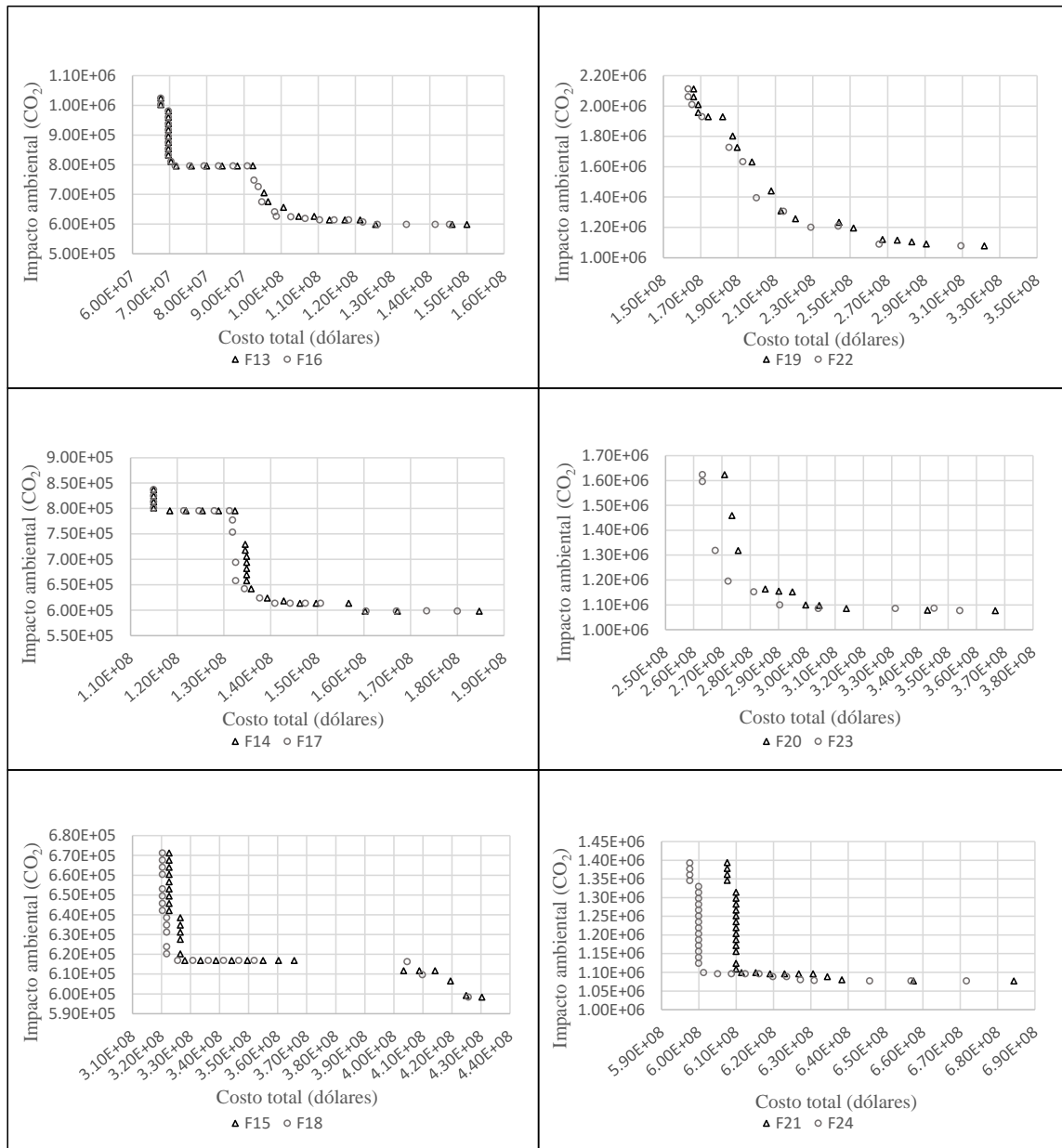


Figura 6: Fronteras de Pareto con demandas de 1.57 y 4 veces la actual

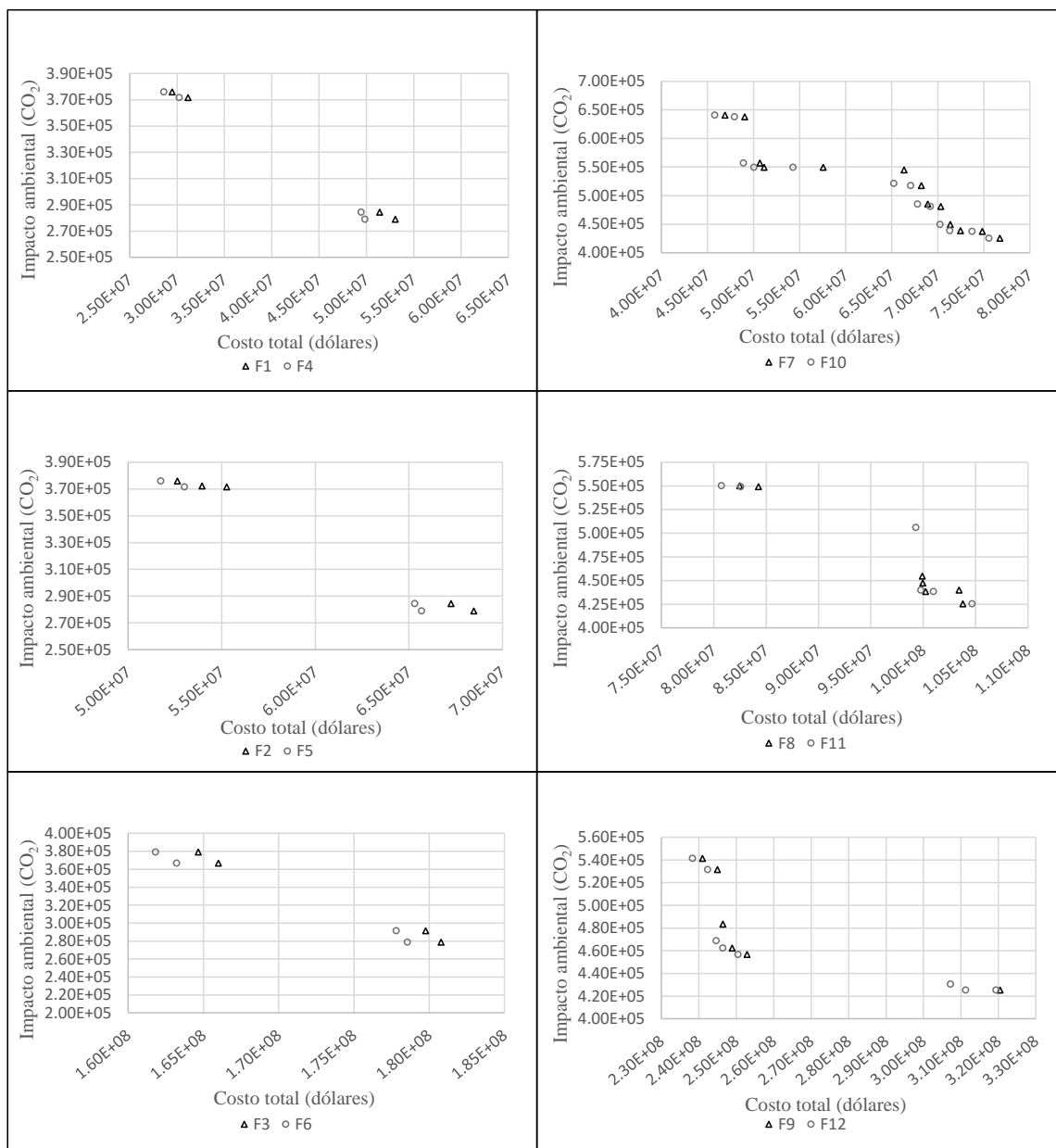


Figura 7: Fronteras de Pareto con demandas de 0.55 y 1 veces la actual

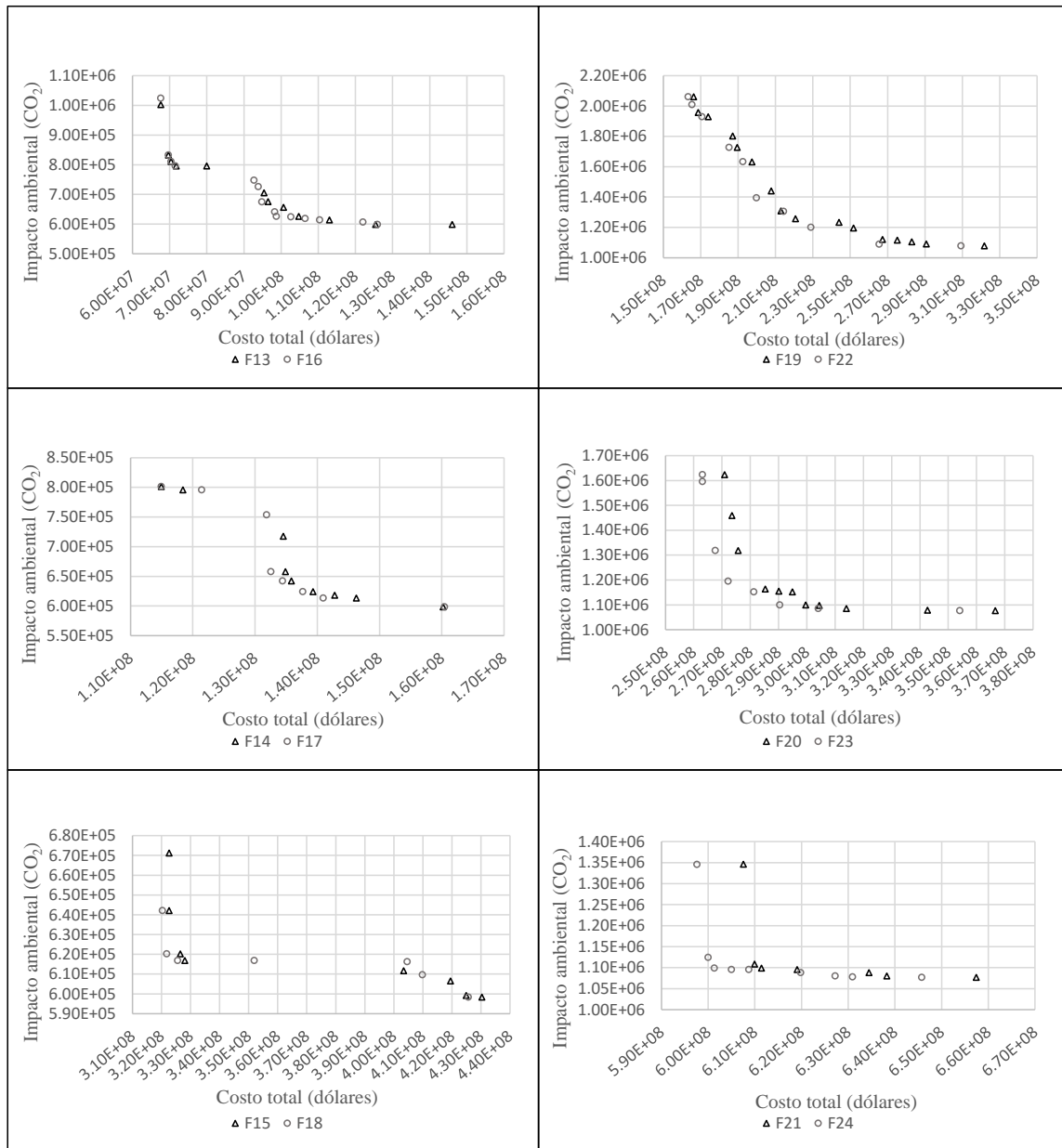


Figura 8: Fronteras de Pareto con demandas de 1.57 y 4 veces la actual

Se puede observar en la figuras 9 - 12 como el modelo planteado permite encontrar soluciones por medio de diferentes configuraciones en la producción y la distribución. En la figura 9 todo se produce a nivel nacional desde una sola instalación y luego se distribuye. En la figura 10 se importa clínker para ser procesado en una molinenda para luego distribuirse a los clientes. En la figura 11 se importa clínker para ser procesado desde dos molinendas para luego distribuirse a los clientes. En la figura 12 se hace una mezcla entre producir internamente e importar clínker, se opera un horno, dos hornos virtuales y cuatro molinendas.

En los experimentos realizados siempre que se minimiza el impacto sin restricción en los costos o se es muy flexible con el costo total (ϵ restricción en costos), se deja de importar clínker y toda la producción se hace con recursos nacionales, sin importar el factor de costo de transporte ni el tiempo de amortización de la inversión. Este comportamiento se da en la figura 9, con lo que se infiere que el impacto del transporte y de la manufactura en el país del que se importa el clínker es mayor que el impacto generado con la producción local.



Figura 9: Minimizando costo
demanda 1.57 F13₁₀

En los experimentos realizados cuando se minimiza los costos sin restricción en las emisiones ambientales o cuando se es muy flexible con las emisiones (ϵ restricción en emisión ambiental) y el factor de costo de transporte terrestre es bajo, la producción se basa en clínker importado, sin importar tiempo de amortización de la inversión. Este comportamiento se da en la figura 10 y figura 11, con lo que se infiere que producir el clínker nacionalmente es muy costoso debido a la alta inversión que se debe realizar en el horno.



Figura 10: Minimizando impacto demanda 1 F10₁₉

En los experimentos realizados cuando se minimiza los costos sin restricción en las emisiones ambientales o cuando se es muy flexible con las emisiones (ϵ restricción en emisión ambiental) y el factor de costo de transporte terrestre es medio y la demanda es menor o igual a 1.57, la producción se basa en clínker importado, sin importar tiempo de amortización de la inversión. Este comportamiento se da en la figura ?? en las figuras 10 y 11.



Figura 11: Minimizado costo
demanda 4 F22₁₉

En los experimentos realizados cuando se minimiza los costos sin restricción en las emisiones ambientales o cuando se es muy flexible con las emisiones (ϵ restricción en emisión ambiental) y el factor de costo de transporte terrestre es medio y la demanda mayor o igual a 1.57, la producción es una mezcla de producción interna e importación de clínker, sin importar tiempo de amortización de la inversión. Este comportamiento se da en la figura 12.



Figura 12: Minimizando impacto demanda 4 F20₁₄

En las figuras 13, 14, 15 y 16 se grafican las soluciones no dominadas y débilmente dominadas. Entre soluciones con los mismos parámetros (demanda y años de amortización inversión) pero se diferencian en los costo de transporte cada una de las fronteras se desplazan sobre el eje del costo total, esto debido a que el transporte es fundamental para la distribución del producto terminado, donde no hay ninguna actividad o proceso que la pueda reemplazar.

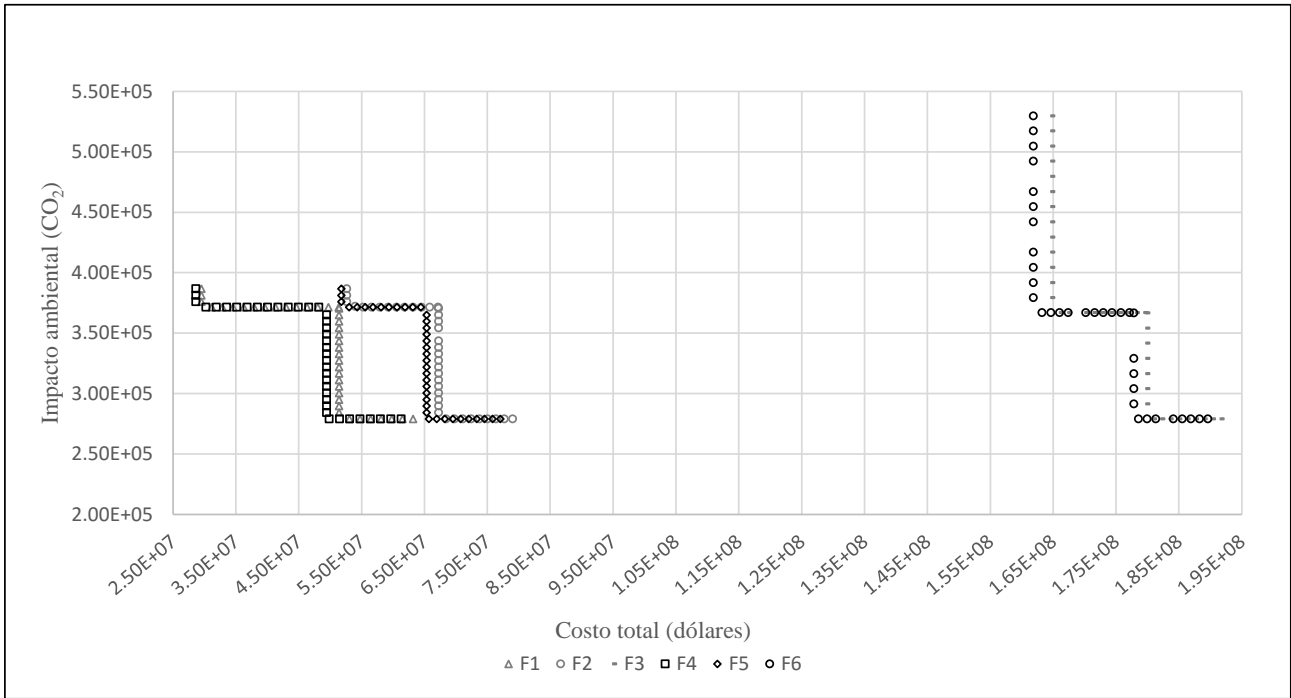


Figura 13: Gráfico fronteras de Pareto demanda 0.55

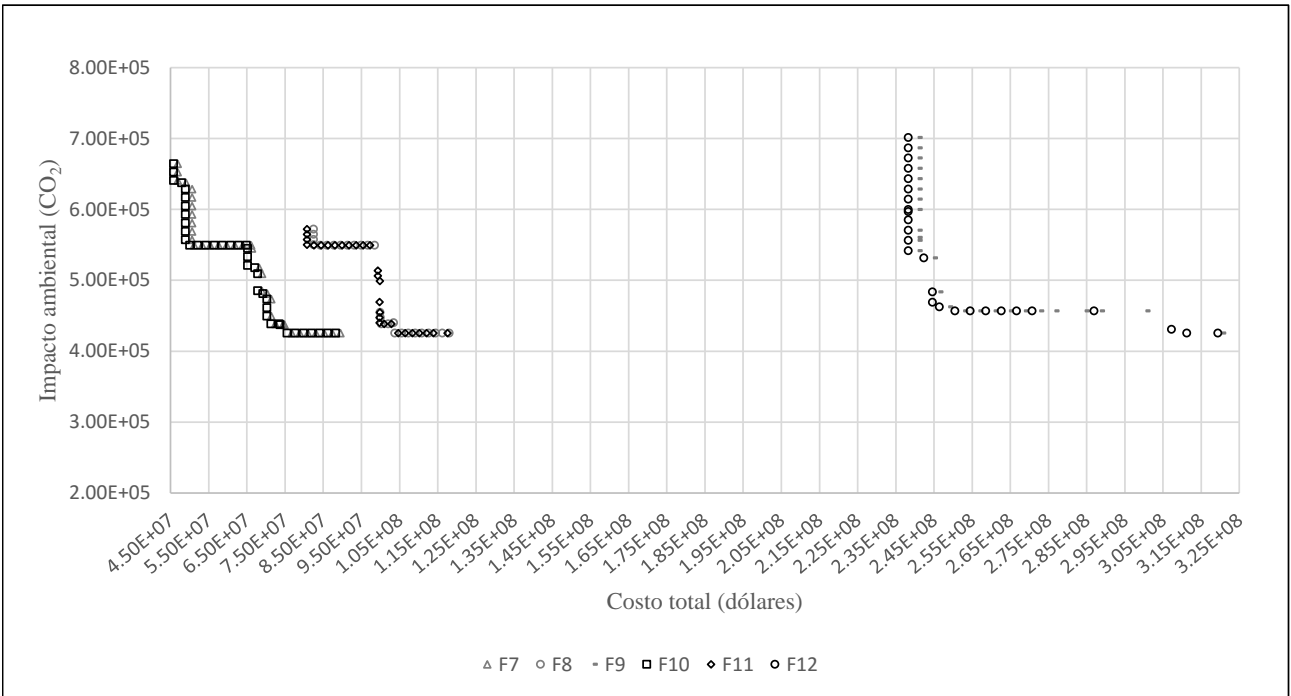


Figura 14: Gráfico fronteras de Pareto demanda 1

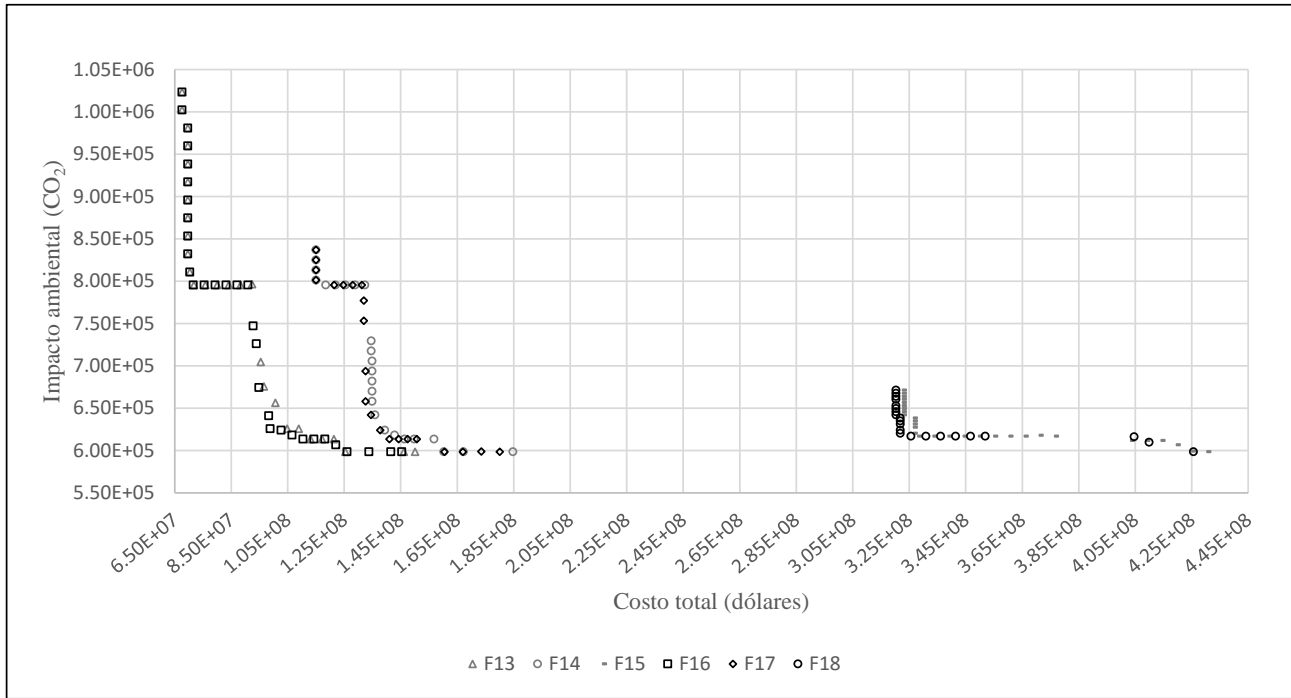


Figura 15: Gráfico fronteras de Pareto demanda 1.57

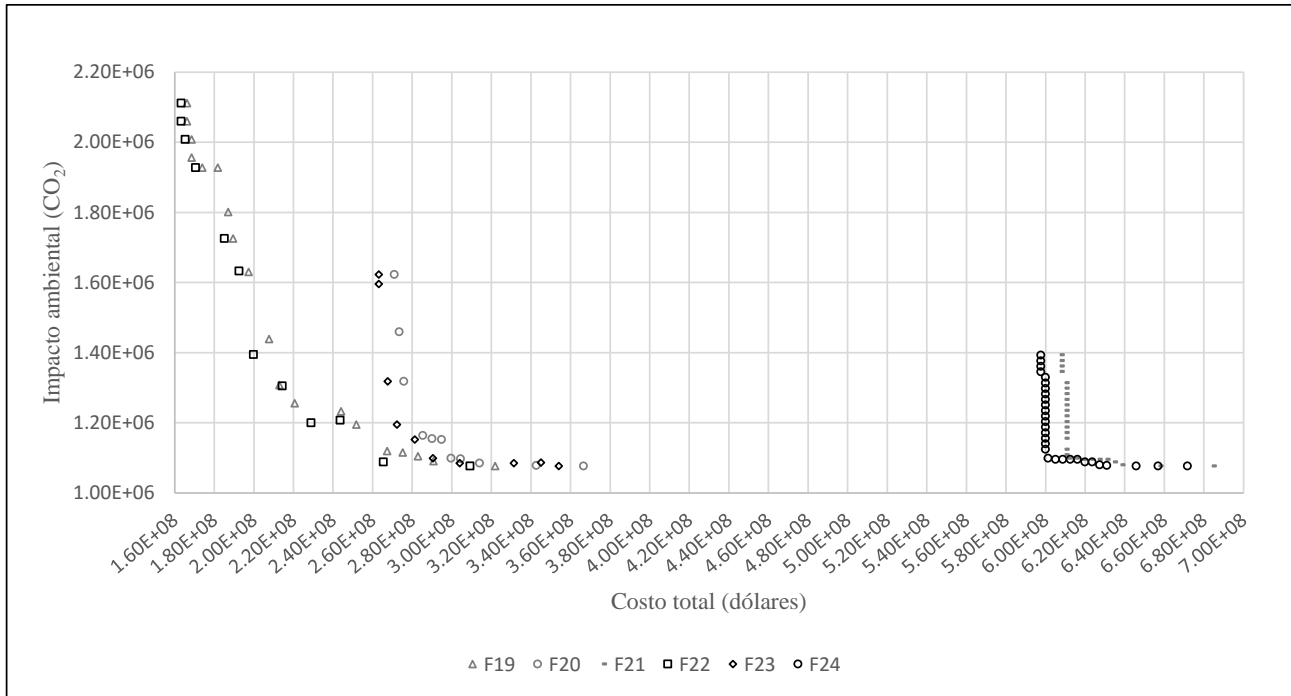


Figura 16: Gráfico fronteras de Pareto demanda 4

8. Conclusiones

La industria cementera ha estado bajo la mirada de diferentes gobiernos con el objetivo de regular las emisiones que genera su operación. Esto lleva a dicha industria a considerar en su ejecución el cumplimiento de metas de reducción de impactos ambientales. En este sentido, deben alinearse tanto los horizontes estratégico, táctico y operativo para llevar a buen término esta pretensión, cumpliendo a su vez el objetivo financiero que es inherente a la operación industrial.

Para ello se ha planteado un modelo MILP de diseño de cadena de suministro que es capaz de generar alternativas que contribuyan a concentrar la producción, de distribuir la producción en varias instalaciones, de producir con base en clínker importado o local, encontrando soluciones óptimas para minimizar conjuntamente los aspectos económicos y ambientales, en particular las emisiones de CO₂.

Existe una relación entre los costos de la producción de cemento y las emisiones generadas, donde un cemento más limpio es más costoso de producir.

Siempre que se minimizó las emisiones de CO₂ la producción es interna, debido a que no se compensa las emisiones del transporte marítimo con las ventajas de la producción a gran escala con la producción en el exterior.

Se pueden lograr mejores operaciones en términos ambientales con bajas inversiones en tecnología, mejorando la distribución o considerando importar clínker. Por ejemplo, en la frontera de Pareto 24 se logran mejoras ambientales del 25 % en la reducción de emisiones de CO₂ por medio de un aumento en aproximadamente 3.4 % de los costos respecto a la solución de menores costos.

Al diseñar una cadena de suministro se consideran una gran cantidad de variables, por tanto es posible que los resultados obtenidos por los métodos disponibles sean contra intuitivos en un comienzo. Sin embargo, si se analiza que pueden existir economías de escala y beneficios tanto económicos como ambientales se logra entender las causas asociadas a las soluciones encontradas.

Algunas de las fronteras de Pareto quedaron zonas sin explorar, pero debido a que se conoce las soluciones que delimitan estas regiones se puede descartar realizar explorarlas debido a que serian soluciones con dominancia débil.

Conociendo que los equipos de la industria cementera son diseñados para operar aproximadamente 30 años sin necesidad de modificaciones, y que las inversiones en la industria cementera son intensivas en capital hace que las soluciones varíen mucho dependiendo de a cuánto tiempo es diferida la inversión. De lo anterior es recomendable tener atención en este parámetro a la hora de analizar los resultados.

9. Recomendaciones para trabajos posteriores

Este trabajo puede extenderse de múltiples maneras:

Considerando nuevos experimentos con diferentes estructuras en los costos de producción y transporte con el fin de determinar que comportamiento se da con esta modificación.

Se deja abierta la posibilidad de realizar una extensión al modelo propuesto en el que se produzcan varias referencias con el fin de observar si es mejor tener fabricas especializadas o producir varias referencias en una misma instalación.

Existe la posibilidad de realizar la extensión al modelo planteado en el que la materia prima no sea exclusivamente piedra caliza sino otros materiales cementantes con lo que se puede lograr reducir las emisiones de CO₂.

Se deja la posibilidad de realizar una extensión al modelo planteado en el que se pueda comprar y vender bonos de CO₂, con lo que se puede lograr un retorno en las inversiones realizadas.

Se deja la posibilidad de realizar una extensión al modelo creando escenarios multi-periodo en los cuales la demanda varié dejando la posibilidad de ampliar o disminuir la capacidad en las plantas que se operan en periodos anteriores o abrir o cerrar plantas más adelante.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis familia por todo el apoyo que me han dado y siempre han estado pendientes de mi.

Un especial agradecimiento a Mario César Vélez y a Nora Cadavid que fueron las personas que me guiaron en el camino para alcanzar este logro en mi vida.

Quiero agradecer a la Universidad EAFIT, por la beca y sostenimiento que me dio durante el tiempo que realice la maestría. También agradecer a Colciencias que con su convocatoria 645 de 2014 también apoyó la investigación realizada.

Al apoyo brindado por las personas de Apolo en el cual se ejecutaron los experimentos computacionales necesarios para comprobar la robustez del modelo planteado.

Finalmente a cada una de las personas que distintas formas contribuyeron a que se cumpliera con los objetivos de este proyecto.

Anexos

En las tablas 8-31 se muestran los resultados detallados de los experimentos MILP realizados en Gurobi para cada una de las fronteras de Pareto. No todas las soluciones hacen parte de la frontera de Pareto debido a que la solución encontrada es dominada por otra. En las columnas 2 y 13 se encuentra el costo que se da en dólares, en la columna 3 y 12 está el impacto ambiental total dado en emisiones de CO₂ en toneladas. En la columna 4 está el valor de la ϵ restricción ambiental en toneladas de CO₂. En las columnas 5 y 15 está la diferencia entre la mejor cota inferior y la mejor solución entera encontrada. En las columnas 7 y 17 se encuentra el costo relacionado al proceso que implica la operación de los hornos (apertura de los hornos, costo tecnologías de los hornos, operación de las canteras, costo del recurso energético, costo transporte recurso energético). En las columnas 8 y 18 está el costo de importar el clínker. En las columnas 9 y 19 está el impacto de las emisiones de CO₂ en toneladas de la operación y transporte de los hornos. En las columnas 10 y 20 está el impacto de producir el clínker en el exterior y de importarlo.

	Minimizando costos										Minimizando impacto ambiental									
	Costo (E^7)	Impacto Ambiental (E^5)	Restricción ϵ (E^5)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E^7)	Costo asociado clínker (E^7)	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E^5)		Impacto (E^5)	Costo (E^7)	Restricción ϵ (E^7)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E^6)	Costo asociado clínker (E^7)	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E^5)	
Minimizando costo	2.95	3.87	N.A.	0	11.12	0.00	1.41	0.00	1.84		2.79	6.32	N.A.	0	18.2	4.84	0.00	1.25	0.00	
R \mathcal{E} 1 amb	5.14	2.84	2.84	0	11698.31	3.67	0.00	1.25	0.00	R \mathcal{E} 1 costos	3.72	3.12	3.12	0	2.19	1.68	1.41	0.00	1.84	
R \mathcal{E} 2 amb	5.14	2.90	2.90	0	2715.46	3.67	0.00	1.25	0.00	R \mathcal{E} 2 costos	3.72	3.29	3.29	0	2.28	3.37	1.41	0.00	1.84	
R \mathcal{E} 3 amb	5.14	2.95	2.95	0.01	9638.4	3.67	0.00	1.25	0.00	R \mathcal{E} 3 costos	3.72	3.45	3.45	0	5.9	5.05	1.41	0.00	1.84	
R \mathcal{E} 4 amb	5.14	3.00	3.00	0	12812.56	3.67	0.00	1.25	0.00	R \mathcal{E} 4 costos	3.72	3.62	3.62	0	6.89	6.73	1.41	0.00	1.84	
R \mathcal{E} 5 amb	5.14	3.06	3.06	0	15228.65	3.67	0.00	1.25	0.00	R \mathcal{E} 5 costos	3.72	3.79	3.79	0	13.52	8.42	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 6 amb	5.14	3.11	3.11	0	15689.24	3.67	0.00	1.44	0.00	R \mathcal{E} 6 costos	3.72	3.96	3.96	0	37.55	1.01	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 7 amb	5.14	3.17	3.17	0	23283.02	3.67	0.00	1.25	0.00	R \mathcal{E} 7 costos	3.72	4.13	4.13	0	17.6	1.18	1.41	0.00	1.84	
R \mathcal{E} 8 amb	5.14	3.22	3.22	0	13950.4	3.67	0.00	1.26	0.00	R \mathcal{E} 8 costos	3.72	4.30	4.30	0	29.01	1.35	1.41	0.00	1.84	
R \mathcal{E} 9 amb	5.14	3.27	3.27	16.56	28800.41	3.67	0	1.25	0	R \mathcal{E} 9 costos	3.72	4.46	4.46	0	42.7	1.51	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 10 amb	5.14	3.33	3.33	33.79	28800.43	3.67	0.00	1.25	0	R \mathcal{E} 10 costos	3.72	4.63	4.63	0	56.98	1.68	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 11 amb	5.14	3.38	3.38	0	14140.52	3.67	0.00	1.44	0.00	R \mathcal{E} 11 costos	3.72	4.80	4.80	0	104.51	1.85	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 12 amb	5.14	3.44	3.44	0	14372.13	3.67	0.00	1.44	0.00	R \mathcal{E} 12 costos	3.72	4.97	4.97	0	106.27	2.02	1.41	0.00	1.84	
R \mathcal{E} 13 amb	5.14	3.49	3.49	0	7529.49	3.67	0.00	1.25	0.00	R \mathcal{E} 13 costos	3.72	5.14	5.14	0	580.25	2.19	1.41	0.00	1.84	
R \mathcal{E} 14 amb	5.14	3.54	3.54	0	12786.1	3.67	0.00	1.25	0.00	R \mathcal{E} 14 costos	2.79	5.31	5.31	0	153.8	3.83	0.00	1.25	0.00	
R \mathcal{E} 15 amb	5.14	3.60	3.60	0	16026.14	3.67	0.00	1.26	0.00	R \mathcal{E} 15 costos	2.79	5.47	5.47	0	484.04	4.00	0.00	1.25	0	
R \mathcal{E} 16 amb	5.14	3.65	3.65	0	16297.8	3.67	0.00	1.44	0.00	R \mathcal{E} 16 costos	2.79	5.64	5.64	0	1095.14	4.17	0.00	1.25	0.00	
R \mathcal{E} 17 amb	5.14	3.71	3.71	0	10524.34	3.67	0.00	1.44	0.00	R \mathcal{E} 17 costos	2.79	5.81	5.81	0	1099.15	4.34	0.00	1.25	0.00	
R \mathcal{E} 18 amb	2.95	3.76	3.76	0	885.91	0.00	1.41	0.00	1.84	R \mathcal{E} 18 costos	2.79	5.98	5.98	0	859.04	4.51	0.00	1.25	0.00	
R \mathcal{E} 19 amb	2.95	3.81	3.81	0	646.42	0.00	1.41	0.00	1.84	R \mathcal{E} 19 costos	2.79	6.15	6.15	0	949.52	4.67	0.00	1.25	0.00	

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 8: Resultados de la frontera de Pareto 1 (F1)

	Minimizando costos										Minimizando impacto ambiental									
	Costo (E^7)	Impacto Ambiental (E^5)	Restricción ϵ (E^5)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E^7)	Costo asociado clínker (E^7)	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E^5)		Impacto (E^5)	Costo (E^7)	Restricción ϵ (E^7)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E^6)	Costo asociado clínker (E^7)	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E^5)	
Minimizando costo	5.26	3.87	N.A.	0	12.56	0	1.41	0	1.84		2.79	7.90	N.A.	0	24.19	4.84	0	1.25	0	
R \mathcal{E} 1 amb	6.73	2.84	2.84	0	4410.47	3.67	0	1.25	0	R \mathcal{E} 1 costos	3.72	5.39	5.39	0	168.77	9.52	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 2 amb	6.73	2.90	2.90	0	9083.31	3.67	0	1.25	0	R \mathcal{E} 2 costos	3.72	5.53	5.53	0	421.15	2.64	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 3 amb	6.73	2.95	2.95	0	6745.75	3.67	0	1.26	0	R \mathcal{E} 3 costos	3.72	5.66	5.66	0	291.03	3.96	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 4 amb	6.73	3.00	3.00	0.01	18911.87	3.67	0	1.25	0	R \mathcal{E} 4 costos	3.72	5.79	5.79	0	308.65	5.28	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 5 amb	6.73	3.06	3.06	0.01	18360.27	3.67	0	1.44	0	R \mathcal{E} 5 costos	3.72	5.92	5.92	0	437.09	6.60	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 6 amb	6.73	3.11	3.11	0	22160.81	3.67	0	1.25	0	R \mathcal{E} 6 costos	3.72	6.05	6.05	0	253.45	7.92	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 7 amb	6.73	3.17	3.17	0.01	14404.53	3.67	0	1.44	0	R \mathcal{E} 7 costos	3.72	6.19	6.19	0	630.44	9.24	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 8 amb	6.73	3.22	3.22	15.80	28801.79	3.67	0	1.26	0	R \mathcal{E} 8 costos	3.72	6.32	6.32	0	893.27	1.06	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 9 amb	6.73	3.27	3.27	14.79	28800.42	3.67	0	1.25	0	R \mathcal{E} 9 costos	3.72	6.45	6.45	0	1150.92	1.19	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 10 amb	6.73	3.33	3.33	0	7757.03	3.67	0	1.26	0	R \mathcal{E} 10 costos	3.72	6.58	6.58	0	1490.05	1.32	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 11 amb	6.73	3.38	3.38	0	13056.65	3.67	0	1.26	0	R \mathcal{E} 11 costos	3.72	6.71	6.71	0	2108.68	1.45	1.41	0	1.84	
R \mathcal{E} 12 amb	6.73	3.44	3.44	6.75	28800.41	3.67	0	1.25	0	R \mathcal{E} 12 costos	2.79	6.85	6.85	0	2606.34	3.79	0	1.25	0	
R \mathcal{E} 13 amb	7.41	3.49	3.49	25.54	28803.08	3.89	0	1.33	0	R \mathcal{E} 13 costos	2.79	6.98	6.98	0	2170.48	3.92	0	1.25	0	
R \mathcal{E} 14 amb	6.73	3.54	3.54	15.37	28800.43	3.67	0	1.25	0	R \mathcal{E} 14 costos	2.79	7.11	7.11	0	1429.77	4.05	0	1.25	0	
R \mathcal{E} 15 amb	6.73	3.60	3.60	0	25205.04	3.67	0	1.26	0	R \mathcal{E} 15 costos	2.79	7.24	7.24	0	1912.61	4.18	0	1.25	0	
R \mathcal{E} 16 amb	6.73	3.65	3.65	0.01	11072.75	3.67	0	1.26	0	R \mathcal{E} 16 costos	2.79	7.37	7.37	0	1316.1	4.31	0	1.25	0	
R \mathcal{E} 17 amb	6.73	3.71	3.71	0.01	21594.52	3.67	0	1.26	0	R \mathcal{E} 17 costos	2.79	7.51	7.51	0	698.5	4.45	0	1.25	0	
R \mathcal{E} 18 amb	5.26	3.76	3.76	0	6269.74	0	1.41	0	1.84	R \mathcal{E} 18 costos	2.79	7.64	7.64	0	783.11	4.58	0	1.25	0	
R \mathcal{E} 19 amb	5.26	3.81	3.81	0	6601.11	0	1.41	0	1.84	R \mathcal{E} 19 costos	2.79	7.77	7.77	0	1659.72	4.71	0	1.25	0	

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 9: Resultados de la frontera de Pareto 2 (F2)

	Minimizando costos								Minimizando impacto ambiental										
	Costo (E ⁵)	Impacto Ambiental (E ⁵)	Restricción € (E ⁵)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E ⁷)	Costo asociado clínker (E ⁷)	Impacto asociado horno (op+transp) (E ⁵)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E ⁵)	Impacto (E ⁵)	Costo (E ⁷)	Restricción € (E ⁵)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E ⁷)	Costo asociado clínker (E ⁷)	Impacto asociado horno (op+transp) (E ⁵)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E ⁵)	
Minimizando costo	1.65	5.30	N.A.	0	139.52	3.67	1.16E+07	2.63	1.20	Minimizando impacto ambiental	2.79	1.92	N.A.	0	15.56	4.85E+07	0	1.25	0
R E 1 amb	1.80	2.91	2.91	0	8097.52	3.67	0	1.26	0	R E 1 costos	3.67	1.66	1.66	0	1497.55	3.80E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 2 amb	1.80	3.04	3.04	0	14093.97	3.67	0	1.26	0	R E 2 costos	3.67	1.67	1.67	0	2397.88	3.94E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 3 amb	1.80	3.17	3.17	0	18532	3.67	0	1.25	0	R E 3 costos	-	-	1.69	-	-	-	-	-	-
R E 4 amb	1.80	3.29	3.29	0.01	16543.06	3.67	0	1.26	0	R E 4 costos	3.67	1.70	1.70	0	2117.61	4.20E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 5 amb	1.80	3.42	3.42	11.41	28810.78	3.67	1.70E+01	1.44	0	R E 5 costos	3.67	1.71	1.71	0	2249.3	4.34E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 6 amb	1.80	3.54	3.54	0.01	22106.26	3.67	0	1.25	0	R E 6 costos	3.67	1.73	1.73	0	2794.99	4.47E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 7 amb	1.80	3.67	3.67	5.22	28800.45	3.67	4.11E+01	1.26	0	R E 7 costos	3.67	1.74	1.74	0	3291.99	4.61E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 8 amb	1.65	3.79	3.79	0	6444.8	3.67	1.16E+07	1.25	1.20	R E 8 costos	3.67	1.75	1.75	0	3142.08	4.74E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 9 amb	1.65	3.92	3.92	0.01	7533.72	3.67	1.16E+07	1.25	1.20	R E 9 costos	3.67	1.77	1.77	0	2991.17	4.88E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 10 amb	1.65	4.04	4.04	0	9608.25	3.67	1.16E+07	1.44	1.20	R E 10 costos	3.67	1.78	1.78	0.01	4326.24	5.01E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 11 amb	1.65	4.17	4.17	0	5327.8	3.67	1.16E+07	1.25	1.20	R E 11 costos	3.67	1.79	1.79	0.01	6267.03	5.15E+07	1.16E+07	1.25	1.20
R E 12 amb	1.65	4.30	4.30	0	4947.38	3.67	1.16E+07	1.25	1.20	R E 12 costos	2.79	1.81	1.81	0	2015.63	3.77E+07	0	1.25	0
R E 13 amb	1.65	4.42	4.42	0	7669.12	3.67	1.16E+07	1.44	1.20	R E 13 costos	2.79	1.82	1.82	0	1875.3	3.90E+07	0	1.25	0
R E 14 amb	1.65	4.55	4.55	0	6333.72	3.67	1.16E+07	1.44	1.20	R E 14 costos	2.79	1.83	1.83	0	4013.84	4.04E+07	0	1.25	0
R E 15 amb	1.65	4.67	4.67	0	3272.71	3.67	1.16E+07	1.25	1.20	R E 15 costos	2.79	1.85	1.85	0	3993.61	4.17E+07	0	1.25	0
R E 16 amb	1.65	4.80	4.80	0	2268.4	3.67	1.16E+07	1.26	1.20	R E 16 costos	2.79	1.86	1.86	0	16325.31	4.31E+07	0	1.25	0
R E 17 amb	1.65	4.92	4.92	0.01	7421.37	3.67	1.16E+07	1.26	1.20	R E 17 costos	2.79	1.88	1.88	0	27220.62	4.44E+07	0	1.25	0
R E 18 amb	1.65	5.05	5.05	0	2694.48	3.67	1.16E+07	1.26	1.20	R E 18 costos	2.79	1.89	1.89	0	2494.9	4.58E+07	0	1.25	0
R E 19 amb	1.65	5.17	5.17	0	2532.79	3.67	1.16E+07	1.25	1.20	R E 19 costos	2.79	1.90	1.90	0	22397.43	4.71E+07	0	1.25	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 10: Resultados de la frontera de Pareto 3 (F3)

	Minimizando costos								Minimizando impacto ambiental										
	Costo (E ⁷)	Impacto Ambiental (E ⁵)	Restricción € (E ⁵)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E ⁷)	Costo asociado clínker (E ⁷)	Impacto asociado horno (op+transp) (E ⁵)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E ⁵)	Impacto (E ⁵)	Costo (E ⁷)	Restricción € (E ⁵)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E ⁷)	Costo asociado clínker (E ⁷)	Impacto asociado horno (op+transp) (E ⁵)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E ⁵)	
Minimizando costo	2.86E+07	3.87E+05	N.A.	0	9.07	0	1.41E+07	0	1.84E+05	Minimizando impacto ambiental	2.79E+05	6.13E+07	N.A.	0	18.86	4.74E+07	0	1.25E+05	0
R E 1 amb	4.94E+07	2.84E+05	2.84E+05	0	16480.39	3.56E+07	0	1.26E+05	0	R E 1 costos	3.72E+05	3.02E+07	3.02E+07	0	2.54	1.63E+06	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 2 amb	4.94E+07	2.90E+05	2.90E+05	0	7095.15	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 2 costos	3.72E+05	3.19E+07	3.19E+07	0	2.78	3.27E+06	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 3 amb	4.94E+07	2.95E+05	2.95E+05	0	12317.03	3.56E+07	0	1.26E+05	0	R E 3 costos	3.72E+05	3.35E+07	3.35E+07	0	5.89	4.90E+06	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 4 amb	4.94E+07	3.00E+05	3.00E+05	0	11970.43	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 4 costos	3.72E+05	3.51E+07	3.51E+07	0	11.43	6.53E+06	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 5 amb	4.94E+07	3.06E+05	3.06E+05	0	11219.75	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 5 costos	3.72E+05	3.68E+07	3.68E+07	0	13.5	8.17E+06	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 6 amb	4.94E+07	3.11E+05	3.11E+05	0	12722.75	3.56E+07	0	1.44E+05	0	R E 6 costos	3.72E+05	3.84E+07	3.84E+07	0	28.46	9.80E+06	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 7 amb	4.94E+07	3.17E+05	3.17E+05	0	13918.64	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 7 costos	3.72E+05	4.00E+07	4.00E+07	0	18.82	1.14E+07	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 8 amb	4.94E+07	3.22E+05	3.22E+05	0	17525.6	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 8 costos	3.72E+05	4.17E+07	4.17E+07	0	22.84	1.31E+07	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 9 amb	4.94E+07	3.27E+05	3.27E+05	32.48	28800.42	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 9 costos	3.72E+05	4.33E+07	4.33E+07	0	50.83	1.47E+07	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 10 amb	4.94E+07	3.33E+05	3.33E+05	37.62	28804.52	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 10 costos	3.72E+05	4.49E+07	4.49E+07	0	59.11	1.63E+07	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 11 amb	4.94E+07	3.38E+05	3.38E+05	0	4609.55	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 11 costos	3.72E+05	4.66E+07	4.66E+07	0	92.36	1.80E+07	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 12 amb	4.94E+07	3.44E+05	3.44E+05	0	22394.12	3.56E+07	0	1.26E+05	0	R E 12 costos	3.72E+05	4.82E+07	4.82E+07	0	251.12	1.96E+07	1.41E+07	0	1.84E+05
R E 13 amb	4.94E+07	3.49E+05	3.49E+05	0.01	2440.23	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 13 costos	2.79E+05	4.99E+07	4.99E+07	0	157.19	3.60E+07	0	1.25E+05	0
R E 14 amb	4.94E+07	3.54E+05	3.54E+05	0.01	22973.44	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 14 costos	2.79E+05	5.15E+07	5.15E+07	0	426.76	3.76E+07	0	1.25E+05	0
R E 15 amb	4.94E+07	3.60E+05	3.60E+05	0	8370.25	3.56E+07	0	1.26E+05	0	R E 15 costos	2.79E+05	5.31E+07	5.31E+07	0	318.11	3.93E+07	0	1.25E+05	0
R E 16 amb	4.94E+07	3.65E+05	3.65E+05	0	11682.35	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R E 16 costos	2.79E+05	5.48E+07	5.48E+07	0	1128.89	4.09E+07	0	1.25E+05	0
R E 17 amb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R E 17 costos	2.79E+05	5.64E+07	5.64E+07	0	658.28	4.25E+07	0	1.25E+05	0
R E 18 amb	2.86E+07	3.76E+05	3.76E+05	0	1219.6	0	1.41E+07	0	1.84E+05	R E 18 costos	2.79E+05	5.80E+07	5.80E+07	0	919.31	4.42E+07	0	1.25E+05	0
R E 19 amb	2.86E+07	3.81E+05	3.81E+05	0	2170.58	0	1.41E+07	0	1.84E+05	R E 19 costos	2.79E+05	5.97E+07	5.97E+07	0	714.87	4.58E+07	0	1.25E+05	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 11: Resultados de la frontera de Pareto 4 (F4)

	Minimizando costos										Minimizando impacto ambiental									
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)		
Minimizando costo	5.18E+07	3.87E+05	N.A.	0	12	0	1.41E+07	0	1.84E+05	2.79E+05	7.71E+07	N.A.	0	24.09	4.74E+07	0	1.25E+05	0		
R ϵ 1 amb	6.53E+07	2.84E+05	2.84E+05	0.01	4792.04	3.56E+07	0	1.26E+05	0	R ϵ 1 costos	3.72E+05	5.30E+07	5.30E+07	0	148.2	1.27E+06	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 2 amb	6.53E+07	2.90E+05	2.90E+05	0	7850.77	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 2 costos	3.72E+05	5.43E+07	5.43E+07	0	337.91	2.53E+06	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 3 amb	6.53E+07	2.95E+05	2.95E+05	0	15364.69	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 3 costos	3.72E+05	5.55E+07	5.55E+07	0	185.2	3.80E+06	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 4 amb	6.53E+07	3.00E+05	3.00E+05	0	11451.93	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 4 costos	3.72E+05	5.68E+07	5.68E+07	0	357.77	5.06E+06	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 5 amb	6.53E+07	3.06E+05	3.06E+05	0	11733.28	3.56E+07	0	1.26E+05	0	R ϵ 5 costos	3.72E+05	5.81E+07	5.81E+07	0	278.75	6.33E+06	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 6 amb	6.53E+07	3.11E+05	3.11E+05	0	9614.14	3.56E+07	0	1.44E+05	0	R ϵ 6 costos	3.72E+05	5.93E+07	5.93E+07	0	590.75	7.60E+06	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 7 amb	6.53E+07	3.17E+05	3.17E+05	0	22918.36	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 7 costos	3.72E+05	6.06E+07	6.06E+07	0	754.44	8.86E+06	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 8 amb	6.53E+07	3.22E+05	3.22E+05	9.52	28800.42	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 8 costos	3.72E+05	6.19E+07	6.19E+07	0	1128.71	1.01E+07	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 9 amb	6.53E+07	3.27E+05	3.27E+05	0.01	10634.59	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 9 costos	3.72E+05	6.31E+07	6.31E+07	0	694.71	1.14E+07	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 10 amb	6.53E+07	3.33E+05	3.33E+05	0	23844.32	3.56E+07	0	1.26E+05	0	R ϵ 10 costos	3.72E+05	6.44E+07	6.44E+07	0	1983.63	1.27E+07	1.41E+07	0	1.84E+05	
R ϵ 11 amb	6.53E+07	3.38E+05	3.38E+05	0.01	20924.03	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 11 costos	3.72E+05	6.57E+07	6.57E+07	0	2361.13	3.60E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 12 amb	6.53E+07	3.44E+05	3.44E+05	0.01	27844.57	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 12 costos	2.79E+05	6.69E+07	6.69E+07	0	2003.4	3.72E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 13 amb	6.53E+07	3.49E+05	3.49E+05	0	16701.9	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 13 costos	2.79E+05	6.82E+07	6.82E+07	0	3108.6	3.85E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 14 amb	6.53E+07	3.54E+05	3.54E+05	0.01	11147.96	3.56E+07	0	1.44E+05	0	R ϵ 14 costos	2.79E+05	6.95E+07	6.95E+07	0	1966.79	3.98E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 15 amb	6.53E+07	3.60E+05	3.60E+05	0	13221.32	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 15 costos	2.79E+05	7.07E+07	7.07E+07	0	715.48	4.10E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 16 amb	6.53E+07	3.65E+05	3.65E+05	0	14687	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 16 costos	2.79E+05	7.20E+07	7.20E+07	0	1901.71	4.23E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 17 amb	-	-	3.71E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 17 costos	2.79E+05	7.33E+07	7.33E+07	0	1331.3	4.36E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 18 amb	5.18E+07	3.76E+05	3.76E+05	0	8544.56	0	1.41E+07	0	1.84E+05	R ϵ 18 costos	2.79E+05	7.45E+07	7.45E+07	0	2804.19	4.48E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 19 amb	5.18E+07	3.81E+05	3.81E+05	0	561.69	0	1.41E+07	0	1.84E+05	R ϵ 19 costos	2.79E+05	7.58E+07	7.58E+07	0	720.23	4.61E+07	0	1.25E+05	0	

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 12: Resultados de la frontera de Pareto 5 (F5)

	Minimizando costos										Minimizando impacto ambiental									
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)		
Minimizando costo	1.62E+08	5.30E+05	N.A.	0	88.19	3.56E+07	1.16E+07	2.63E+05	1.20E+05	2.79E+05	1.90E+08	N.A.	0	15.87	4.74E+07	0	1.25E+05	0		
R ϵ 1 amb	1.78E+08	2.91E+05	2.91E+05	0	2504.25	3.56E+07	4.11E+01	1.26E+05	0	R ϵ 1 costos	3.67E+05	1.63E+08	1.63E+08	0	2345.13	3.70E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 2 amb	1.78E+08	3.04E+05	3.04E+05	0	20023.14	3.56E+07	0	1.44E+05	0	R ϵ 2 costos	3.67E+05	1.65E+08	1.65E+08	34.23	3696.49	3.84E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 3 amb	1.78E+08	3.17E+05	3.17E+05	6.93	28802.1	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 3 costos	3.67E+05	1.66E+08	1.66E+08	0	4750.46	3.98E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 4 amb	1.78E+08	3.29E+05	3.29E+05	0	24059.93	3.56E+07	0	1.44E+05	0	R ϵ 4 costos	3.67E+05	1.67E+08	1.67E+08	0	2305.65	4.12E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 5 amb	1.78E+08	3.42E+05	3.42E+05	12.67	28802.77	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 5 costos	3.67E+05	1.69E+08	1.69E+08	0	2914.9	-	-	-	-	
R ϵ 6 amb	1.78E+08	3.54E+05	3.54E+05	10.96	28800.87	3.56E+07	0	1.26E+05	0	R ϵ 6 costos	3.67E+05	1.70E+08	1.70E+08	0	2767.94	4.40E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 7 amb	1.78E+08	3.67E+05	3.67E+05	0.01	20426.3	3.56E+07	0	1.25E+05	0	R ϵ 7 costos	3.67E+05	1.72E+08	1.72E+08	0	2704.9	4.54E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 8 amb	1.62E+08	3.79E+05	3.79E+05	0	8588.64	3.56E+07	1.16E+07	1.26E+05	1.20E+05	R ϵ 8 costos	3.67E+05	1.73E+08	1.73E+08	0	2818.72	4.67E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 9 amb	1.62E+08	3.92E+05	3.92E+05	0.01	27001.06	3.56E+07	1.16E+07	1.26E+05	1.20E+05	R ϵ 9 costos	3.67E+05	1.74E+08	1.74E+08	0.01	4077.1	4.81E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 10 amb	1.62E+08	4.04E+05	4.04E+05	0	2503.87	3.56E+07	1.16E+07	1.26E+05	1.20E+05	R ϵ 10 costos	3.67E+05	1.76E+08	1.76E+08	3.78	28800.41	4.95E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 11 amb	1.62E+08	4.17E+05	4.17E+05	0	8630.43	3.56E+07	1.16E+07	1.26E+05	1.20E+05	R ϵ 11 costos	3.67E+05	1.77E+08	1.77E+08	0.01	7957.95	5.09E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	
R ϵ 12 amb	1.62E+08	4.30E+05	4.30E+05	6.44	6300.81	-	-	-	-	R ϵ 12 costos	2.79E+05	1.79E+08	1.79E+08	0	3247.67	3.63E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 13 amb	1.62E+08	4.42E+05	4.42E+05	0	7128.77	3.56E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	R ϵ 13 costos	2.79E+05	1.80E+08	1.80E+08	0	23007.29	3.77E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 14 amb	1.62E+08	4.55E+05	4.55E+05	0	2897.26	3.56E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	R ϵ 14 costos	2.79E+05	1.81E+08	1.81E+08	0	25874.52	3.91E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 15 amb	1.62E+08	4.67E+05	4.67E+05	0	4306.59	3.56E+07	1.16E+07	1.44E+05	1.20E+05	R ϵ 15 costos	2.82E+05	1.83E+08	1.83E+08	0	1853.58	4.03E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 16 amb	-	-	4.80E+05	8.19	1082.64	-	-	-	-	R ϵ 16 costos	2.79E+05	1.84E+08	1.84E+08	38.98	28586.93	4.18E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 17 amb	1.62E+08	4.92E+05	4.92E+05	0	2715.39	3.56E+07	1.16E+07	1.44E+05	1.20E+05	R ϵ 17 costos	2.79E+05	1.86E+08	1.86E+08	13.52	28807.49	4.32E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 18 amb	1.62E+08	5.05E+05	5.05E+05	0.41	28800.46	3.56E+07	1.16E+07	1.44E+05	1.20E+05	R ϵ 18 costos	2.79E+05	1.87E+08	1.87E+08	0.01	23100.05	4.46E+07	0	1.25E+05	0	
R ϵ 19 amb	1.62E+08	5.17E+05	5.17E+05	0	3060.56	3.56E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	R ϵ 19 costos	2.79E+05	1.88E+08	1.88E+08	0	26453.78	4.60E+07	0	1.25E+05	0	

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 13: Resultados de la frontera de Pareto 6 (F6)

	Minimizando costos										Minimizando impacto ambiental									
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)		
Minimizando costo	4.69E+07	6.64E+05	N.A.	0	7.46	0	2.26E+07	0	3.01E+05	4.25E+05	8.95E+07	N.A.	0.01	176.75	6.63E+07	0	1.49E+05	0		
R ϵ 1 amb	7.48E+07	4.37E+05	4.37E+05	0.25	28800.22	5.17E+07	0	1.49	0	R ϵ 1 costos	6.38E+05	4.90E+07	4.90E+07	0	104.14	2.13E+06	2.26E+07	0	3.01E+05	
R ϵ 2 amb	7.14E+07	4.49E+05	4.49E+05	0	20642.75	4.82E+07	0	1.62	0	R ϵ 2 costos	5.49E+05	5.12E+07	5.12E+07	0	71.43	4.84E+05	2.29E+07	0	2.76E+05	
R ϵ 3 amb	7.94E+07	4.61E+05	4.61E+05	27.24	28801.16	5.35E+07	2.82E+06	1.47	3.24E+04	R ϵ 3 costos	5.49E+05	5.33E+07	5.33E+07	0	107.02	2.61E+06	2.29E+07	0	2.76E+05	
R ϵ 4 amb	7.14E+07	4.73E+05	4.73E+05	0.01	2199															

	Minimizando costos								Minimizando impacto ambiental										
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	
Minimizando costo	8.25E+07	5.72E+05	N.A.	0	15.68	0	2.29E+07	0	2.76E+05	4.25E+05	1.18E+08	N.A.	0.01	180.67	6.63E+07	0	1.49E+05	0	
R ϵ 1 amb	1.06E+08	4.33E+05	4.33E+05	12.30	28847.69	5.42E+07	0	1.50E+05	0	R ϵ 1 costos	5.49E+05	8.43E+07	8.43E+07	0	1130.97	3.38E+05	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 2 amb	1.03E+08	4.40E+05	4.40E+05	11.23	28800.23	5.17E+07	0	1.50E+05	0	R ϵ 2 costos	5.49E+05	8.60E+07	8.60E+07	0	524.2	2.11E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 3 amb	9.99E+07	4.47E+05	4.47E+05	12.06	28801.39	4.82E+07	0	1.63E+05	0	R ϵ 3 costos	5.49E+05	8.78E+07	8.78E+07	0	893.93	3.89E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 4 amb	9.99E+07	4.55E+05	4.55E+05	0	24243.92	4.82E+07	0	1.62E+05	0	R ϵ 4 costos	5.49E+05	8.96E+07	8.96E+07	0	936.17	5.66E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 5 amb	-	4.62E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	5.49E+05	9.14E+07	9.14E+07	0	635.82	7.44E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 6 amb	-	4.69E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 6 costos	5.49E+05	9.31E+07	9.31E+07	0	734.49	9.21E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 7 amb	-	4.77E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 7 costos	5.49E+05	9.49E+07	9.49E+07	0	1018.04	1.10E+07	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 8 amb	-	4.84E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 8 costos	5.49E+05	9.67E+07	9.67E+07	0	4170.8	1.28E+07	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 9 amb	-	4.91E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 9 costos	5.49E+05	9.85E+07	9.85E+07	0.01	1516.59	1.45E+07	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 10 amb	-	4.99E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 10 costos	4.39E+05	1.00E+08	1.00E+08	0	1084.09	4.85E+07	0	1.62E+05	0
R ϵ 11 amb	-	5.06E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 11 costos	4.39E+05	1.02E+08	1.02E+08	0	1800.93	5.03E+07	0	1.62E+05	0
R ϵ 12 amb	-	5.13E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 12 costos	4.25E+05	1.04E+08	1.04E+08	0	1869.6	5.21E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 13 amb	-	5.21E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 13 costos	4.25E+05	1.06E+08	1.06E+08	0	2633.29	5.39E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 14 amb	-	5.28E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 14 costos	4.25E+05	1.07E+08	1.07E+08	0	2269.44	5.56E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 15 amb	-	5.35E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 15 costos	4.25E+05	1.09E+08	1.09E+08	0	2743.13	5.74E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 16 amb	-	5.43E+05	0	0	-	-	-	-	-	R ϵ 16 costos	4.25E+05	1.11E+08	1.11E+08	0.01	4041.48	5.92E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 17 amb	8.25E+07	5.50E+05	5.50E+05	0	3281.22	0	2.29E+07	0	2.76E+05	R ϵ 17 costos	4.25E+05	1.13E+08	1.13E+08	0	9298.95	6.10E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 18 amb	8.25E+07	5.57E+05	5.57E+05	0	495.71	0	2.29E+07	0	2.76E+05	R ϵ 18 costos	4.25E+05	1.14E+08	1.14E+08	0	2406.44	6.27E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 19 amb	8.25E+07	5.65E+05	5.65E+05	0	696.02	0	2.29E+07	0	2.76E+05	R ϵ 19 costos	4.25E+05	1.16E+08	1.16E+08	0.01	6701.4	6.45E+07	0	1.49E+05	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 15: Resultados de la frontera de Pareto 8 (F8)

	Minimizando costos								Minimizando impacto ambiental										
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	
Minimizando costo	2.41E+08	5.60E+05	N.A.	0	224.92	7.33E+07	1.16E+07	2.51E+05	1.20E+05	4.25E+05	3.20E+08	N.A.	0.01	191.74	6.63E+07	0	1.49E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	4.32E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	5.32E+05	2.45E+08	2.45E+08	0	1461.86	7.73E+07	1.16E+07	2.50E+05	1.20E+05
R ϵ 2 amb	-	-	4.39E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	4.62E+05	2.49E+08	2.49E+08	0	1011.92	4.01E+07	1.16E+07	1.31E+05	1.20E+05
R ϵ 3 amb	-	-	4.46E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 3 costos	4.57E+05	2.53E+08	2.53E+08	0	3109.93	4.69E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 4 amb	2.46E+08	4.83E+05	4.52E+05	0	18430.54	4.05E+07	1.16E+07	1.38E+05	1.20E+05	R ϵ 4 costos	4.57E+05	2.57E+08	2.57E+08	0	2307.09	5.09E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 5 amb	-	-	4.59E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	4.57E+05	2.61E+08	2.61E+08	0	2193.3	5.49E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 6 amb	-	-	4.66E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 6 costos	4.57E+05	2.65E+08	2.65E+08	0.01	3322.01	5.89E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 7 amb	-	-	4.72E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 7 costos	4.57E+05	2.69E+08	2.69E+08	0.01	20768.96	6.29E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 8 amb	2.41E+08	5.42E+05	4.79E+05	0	28533.37	7.33E+07	1.16E+07	2.50E+05	1.20E+05	R ϵ 8 costos	4.57E+05	2.73E+08	2.73E+08	3.65	2880.3	6.68E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 9 amb	2.41E+08	5.56E+05	4.86E+05	0	13579.85	7.33E+07	1.16E+07	2.51E+05	1.20E+05	R ϵ 9 costos	4.57E+05	2.77E+08	2.77E+08	1.96	2880.3	7.08E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 10 amb	2.41E+08	5.71E+05	4.93E+05	0.01	25313.05	7.33E+07	1.16E+07	2.50E+05	1.20E+05	R ϵ 10 costos	4.63E+05	2.81E+08	2.81E+08	13.08	2880.3	6.95E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 11 amb	-	-	4.99E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 11 costos	4.57E+05	2.85E+08	2.85E+08	13.61	2880.32	7.88E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 12 amb	2.41E+08	6.00E+05	5.06E+05	0.01	14417.27	7.33E+07	1.16E+07	2.50E+05	1.20E+05	R ϵ 12 costos	4.57E+05	2.89E+08	2.89E+08	12.01	2880.31	8.27E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 13 amb	2.41E+08	6.14E+05	5.13E+05	0	15695.04	7.33E+07	1.16E+07	2.51E+05	1.20E+05	R ϵ 13 costos	4.63E+05	2.93E+08	2.93E+08	17.12	2880.32	8.12E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 14 amb	2.41E+08	6.29E+05	5.20E+05	0.01	13357.53	7.33E+07	1.16E+07	2.69E+05	1.20E+05	R ϵ 14 costos	4.72E+05	2.97E+08	2.97E+08	17.13	2880.3	9.73E+07	0	2.55E+05	0
R ϵ 15 amb	2.41E+08	6.43E+05	5.26E+05	0	10228.92	7.33E+07	1.16E+07	2.52E+05	1.20E+05	R ϵ 15 costos	4.57E+05	3.01E+08	3.01E+08	16.18	28816.14	9.47E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 16 amb	2.41E+08	6.58E+05	5.33E+05	4.36	46800.27	7.33E+07	1.16E+07	2.50E+05	1.20E+05	R ϵ 16 costos	4.67E+05	3.05E+08	3.05E+08	18.83	28800.33	1.05E+08	0	2.52E+05	0
R ϵ 17 amb	2.41E+08	6.72E+05	5.40E+05	0.01	9575.82	7.33E+07	1.16E+07	2.50E+05	1.20E+05	R ϵ 17 costos	4.72E+05	3.09E+08	3.09E+08	16.52	28804.01	1.06E+08	0	2.50E+05	0
R ϵ 18 amb	2.41E+08	6.87E+05	5.47E+05	0.01	22728.64	7.33E+07	1.16E+07	2.50E+05	1.20E+05	R ϵ 18 costos	4.59E+05	3.13E+08	3.13E+08	18.15	28800.88	1.04E+08	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05
R ϵ 19 amb	2.41E+08	7.01E+05	5.53E+05	0	18583.08	7.33E+07	1.16E+07	2.50E+05	1.20E+05	R ϵ 19 costos	4.71E+05	3.17E+08	3.16E+08	20.70	28830.62	9.53E+07	1.16E+07	1.27E+05	1.20E+05

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 16: Resultados de la frontera de Pareto 9 (F9)

	Minimizando costos								Minimizando impacto ambiental										
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	
Minimizando costo	4.58E+07	6.64E+05	N.A.	0	11.54	0	2.26E+07	0	3.01E+05	4.25E+05	8.83E+07	N.A.	0.01	188.83	6.63E+07	0	1.49E+05	0	
R ϵ 1 amb	7.37E+07	4.37E+05	4.37E+05	0	19601.23	5.17E+07	0	1.49E+05	0	R ϵ 1 costos	6.38E+05	4.79E+07	4.79E+07	0	117.55	2.13E+06	2.26E+07	0	3.01E+05
R ϵ 2 amb	7.02E+07	4.49E+05	4.49E+05	0	18261.08	4.82E+07	0	1.62E+05	0	R ϵ 2 costos	5.49E+05	5.00E+07	5.00E+07	0	78.51	1.13E+06	2.29E+07	0	2.76E+05
R ϵ 3 amb	7.02E+07	4.61E+05	4.61E+05	0.01	27661.11	4.82E+07	0	1.63E+05	0	R ϵ 3 costos	5.49E+05	5.22E+07	5.22E+07	0	78.99	3.25E+06	2.29E+07	0	2.76E+05
R ϵ 4 amb	7.02E+07	4.73E+05	4.73E+05	0.01	28557.22	4.82E+07	0	1.62E+05	0	R ϵ 4 costos	5.49E+05	5.43E+07	5.43E+07	0	118.83	4.05E+05	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 5 amb	6.78E+07	4.83E+05	4.83E+05	0	20113.53	4.26E+07	2.82E+06	1.46E+05	5.44E+04	R ϵ 5 costos	5.49E+05	5.64E+07	5.64E+07	0	293.47	2.53E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 6 amb	7.83E+07	4.97E+05	4.97E+05	33.59	28803.51	4.9													

	Minimizando costos								Minimizando impacto ambiental										
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E^7)	Costo asociado clínker (E^7)	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E^5)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E^7)	Costo asociado clínker (E^7)	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E^5)	
Minimizando costo	8.07E+07	5.72E+05	N.A.	0	13.8	0	2.29E+07	0	2.76E+05	Minimizando impacto ambiental	4.25E+05	1.18E+08	N.A.	0.01	180.35	6.67E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 1 amb	-	-	4.33E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	5.49E+05	8.26E+07	8.26E+07	0	455.11	2.17E+05	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 2 amb	9.98E+07	4.40E+05	4.40E+05	9.59	28800.4	4.89E+07	0	1.62E+05	0	R ϵ 2 costos	5.49E+05	8.44E+07	8.44E+07	0	445.54	2.06E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 3 amb	9.98E+07	4.47E+05	4.47E+05	13.95	28800.28	4.89E+07	0	1.63E+05	0	R ϵ 3 costos	5.49E+05	8.62E+07	8.62E+07	0	960.75	3.90E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 4 amb	9.98E+07	4.55E+05	4.55E+05	13.92	28800.77	4.89E+07	0	1.63E+05	0	R ϵ 4 costos	5.49E+05	8.81E+07	8.81E+07	0	717.27	5.74E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 5 amb	-	-	4.62E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	5.49E+05	8.99E+07	8.99E+07	0	743.24	7.58E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 6 amb	9.98E+07	4.69E+05	4.69E+05	15.63	28800.62	4.89E+07	0	1.63E+05	0	R ϵ 6 costos	5.49E+05	9.18E+07	9.18E+07	0	666.37	9.42E+06	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 7 amb	-	-	4.77E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 7 costos	5.49E+05	9.36E+07	9.36E+07	0	780.98	1.13E+07	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 8 amb	-	-	4.84E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 8 costos	5.49E+05	9.54E+07	9.54E+07	0	864	1.31E+07	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 9 amb	1.11E+08	4.91E+05	4.91E+05	25.98	28804	5.58E+07	0	2.01E+05	0	R ϵ 9 costos	5.49E+05	9.73E+07	9.73E+07	0.01	1554.53	1.49E+07	2.57E+07	0	3.11E+05
R ϵ 10 amb	9.98E+07	4.99E+05	4.99E+05	17.44	28808.32	4.89E+07	0	1.87E+05	0	R ϵ 10 costos	4.71E+05	9.91E+07	9.91E+07	0	1569.75	3.67E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05
R ϵ 11 amb	9.93E+07	5.06E+05	5.06E+05	17.29	28802.86	3.67E+07	1.13E+07	1.25E+05	1.51E+05	R ϵ 11 costos	4.39E+05	1.01E+08	1.01E+08	0	1495.32	5.01E+07	0	1.62E+05	0
R ϵ 12 amb	9.93E+07	5.13E+05	5.13E+05	17.20	28800.31	3.67E+07	1.13E+07	1.25E+05	1.51E+05	R ϵ 12 costos	4.39E+05	1.03E+08	1.03E+08	0	1418.98	5.20E+07	0	1.62E+05	0
R ϵ 13 amb	-	-	5.21E+05	21.39	3027.57	-	-	-	-	R ϵ 13 costos	4.25E+05	1.05E+08	1.05E+08	0	2029.38	5.38E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 14 amb	-	-	5.28E+05	21.52	2187.14	-	-	-	-	R ϵ 14 costos	4.25E+05	1.06E+08	1.06E+08	0.01	3907.09	5.56E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 15 amb	9.98E+07	5.35E+05	5.35E+05	10.49	28800.22	3.67E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	R ϵ 15 costos	4.25E+05	1.08E+08	1.08E+08	0	1936.15	5.75E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 16 amb	9.98E+07	5.43E+05	5.43E+05	15.90	28800.26	3.67E+07	1.16E+07	1.25E+05	1.20E+05	R ϵ 16 costos	4.25E+05	1.10E+08	1.10E+08	0	2450.09	5.93E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 17 amb	8.07E+07	5.50E+05	5.50E+05	0	541.69	0	2.29E+07	0	2.76E+05	R ϵ 17 costos	4.25E+05	1.12E+08	1.12E+08	0.01	8710.47	6.12E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 18 amb	8.07E+07	5.57E+05	5.57E+05	0	550.72	0	2.29E+07	0	2.76E+05	R ϵ 18 costos	4.25E+05	1.14E+08	1.14E+08	0.01	7258.19	6.30E+07	0	1.49E+05	0
R ϵ 19 amb	8.07E+07	5.65E+05	5.65E+05	0	549.27	0	2.29E+07	0	2.76E+05	R ϵ 19 costos	-	-	1.16E+08	-	-	-	-	-	-

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 18: Resultados de la frontera de Pareto 11 (F11)

	Minimizando costos								Minimizando impacto ambiental										
	Costo (E^8)	Impacto Ambiental (E^5)	Restricción (E^5)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E^7)	Costo asociado clínker (E^7)	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E^5)	Impacto (E^5)	Costo (E^8)	Restricción (E^5)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E^7)	Costo asociado clínker (E^7)	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado clínker (op+trans) (E^5)	
Minimizando costo	2.38	5.97	N.A.	0	223	7.33	1.16	2.88	1.20	Minimizando impacto ambiental	4.25	3.19	N.A.	0.01	180.35	6.63	0	1.49	0
R ϵ 1 amb	-	-	4.34	-	-	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	5.32	2.42	2.42	0.01	1236.46	7.74	1.16	2.50	1.20
R ϵ 2 amb	-	-	4.43	-	-	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	4.62	2.46	2.46	0	1336.85	3.96	1.16	1.31	1.20
R ϵ 3 amb	2.45	4.69	4.51	0	25641.67	4.05	1.16	1.39	1.20	R ϵ 3 costos	4.57	2.50	2.50	0.01	1797.09	4.63	1.16	1.27	1.20
R ϵ 4 amb	2.45	4.83	4.60	0	16560.78	4.05	1.16	1.39	1.20	R ϵ 4 costos	4.57	2.55	2.55	0.01	2116.85	5.03	1.16	1.27	1.20
R ϵ 5 amb	-	-	4.68	10.69	-	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	4.57	2.59	2.59	0	2318.77	5.44	1.16	1.27	1.20
R ϵ 6 amb	-	-	4.77	16.59	-	-	-	-	-	R ϵ 6 costos	4.57	2.63	2.63	0.01	4068.58	5.85	1.16	1.27	1.20
R ϵ 7 amb	2.53	5.27	4.85	10.15	28820.46	4.91	1.16	1.65	1.20	R ϵ 7 costos	4.57	2.67	2.67	0.01	9853.26	6.25	1.16	1.27	1.20
R ϵ 8 amb	2.38	5.42	4.94	0	13979.99	7.33	1.16	2.50	1.20	R ϵ 8 costos	4.57	2.71	2.71	0.01	26422.43	6.66	1.16	1.27	1.20
R ϵ 9 amb	2.38	5.56	5.03	0	14139.06	7.33	1.16	2.52	1.20	R ϵ 9 costos	-	-	2.75	-	-	-	-	-	
R ϵ 10 amb	2.38	5.71	5.11	-	28800.22	7.33	1.16	2.51	1.20	R ϵ 10 costos	-	-	2.79	-	-	-	-	-	
R ϵ 11 amb	2.38	5.85	5.20	0.01	12330.61	7.33	1.16	2.88	1.20	R ϵ 11 costos	-	-	2.83	-	-	-	-	-	
R ϵ 12 amb	2.38	6.00	5.28	0	14438.32	7.33	1.16	2.88	1.20	R ϵ 12 costos	4.57	2.87	2.87	13.84	46800.31	8.28	1.16	1.27	1.20
R ϵ 13 amb	2.38	6.14	5.37	0.01	8680.91	7.33	1.16	2.51	1.20	R ϵ 13 costos	4.61	2.91	2.91	17.34	46800.32	8.34	1.16	1.27	1.20
R ϵ 14 amb	2.38	6.29	5.45	0.01	11374.32	7.33	1.16	2.51	1.20	R ϵ 14 costos	4.63	2.95	2.95	16.45	46800.32	8.55	1.16	1.27	1.26
R ϵ 15 amb	2.38	6.43	5.54	0.01	12733.12	7.33	1.16	2.51	1.20	R ϵ 15 costos	4.69	2.99	2.99	18.93	46800.52	8.53	1.16	1.27	1.23
R ϵ 16 amb	2.38	6.58	5.63	0.88	28801.77	7.33	1.16	2.51	1.20	R ϵ 16 costos	4.70	3.03	3.03	16.61	46800.66	1.00E+01	0	2.50	0
R ϵ 17 amb	2.38	6.72	5.71	0	11061.43	7.33	1.16	2.51	1.20	R ϵ 17 costos	4.31	3.07	3.07	6.38	46800.32	5.39	0	1.49	0
R ϵ 18 amb	2.38	6.87	5.80	0.89	28800.22	7.33	1.16	2.88	1.20	R ϵ 18 costos	4.25	3.11	3.11	6.84	46800.31	5.82	0	1.49	0
R ϵ 19 amb	2.38	7.01	5.88	0	16793.07	7.33	1.16	2.51	1.20	R ϵ 19 costos	4.62	3.15	3.15	15.69	46800.31	1.06E+01	1.16	1.27	1.26

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 19: Resultados de la frontera de Pareto 12 (F12)

	Minimizando costos					Minimizando impacto ambiental													
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	
Minimizando costo	6.76E+07	1.02E+06	N.A.	0	5.2	0	3.38E+07	0	4.54E+05	5.98E+05	1.50E+08	N.A.	0.01	944.64	1.15E+08	0	2.54E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	6.20E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	7.96E+05	7.18E+07	7.17E+07	0	1084.42	1.40E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 2 amb	-	-	6.41E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	7.96E+05	7.59E+07	7.59E+07	0	514.41	5.53E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 3 amb	-	-	6.62E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 3 costos	7.96E+05	8.00E+07	8.00E+07	0.01	4867.29	9.66E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 4 amb	9.77E+07	6.83E+05	6.83E+05	18.09	28800.18	4.85E+07	1.41E+07	1.40E+05	1.87E+05	R ϵ 4 costos	7.96E+05	8.41E+07	8.41E+07	0	9291.56	1.38E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 5 amb	9.54E+07	7.05E+05	7.05E+05	19.20	28800.71	4.61E+07	1.41E+07	1.33E+05	1.91E+05	R ϵ 5 costos	7.96E+05	8.83E+07	8.83E+07	0	599.45	1.79E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 6 amb	-	-	7.26E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 6 costos	7.97E+05	9.24E+07	9.23E+07	22.61	28835.47	2.12E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 7 amb	-	-	7.47E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 7 costos	6.76E+05	9.65E+07	9.65E+07	0	18134.7	4.75E+07	1.41E+07	1.33E+05	1.91E+05
R ϵ 8 amb	-	-	7.69E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 8 costos	6.56E+05	1.01E+08	1.01E+08	0.01	6461.03	5.47E+07	1.13E+07	1.60E+05	1.52E+05
R ϵ 9 amb	-	-	7.90E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 9 costos	6.26E+05	1.05E+08	1.05E+08	0.01	22138.04	7.28E+07	0	1.92E+05	0
R ϵ 10 amb	7.04E+07	8.11E+05	8.11E+05	0	547.58	0	3.42E+07	0	4.31E+05	R ϵ 10 costos	6.26E+05	1.09E+08	1.09E+08	6.57	28800.19	7.70E+07	0	1.92E+05	0
R ϵ 11 amb	6.97E+07	8.32E+05	8.32E+05	0	1293.53	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 11 costos	6.14E+05	1.13E+08	1.13E+08	4.83	28800.18	6.28E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.20E+05
R ϵ 12 amb	6.97E+07	8.54E+05	8.54E+05	0	189.67	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 12 costos	6.14E+05	1.17E+08	1.17E+08	4.50	28800.17	6.69E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.20E+05
R ϵ 13 amb	6.97E+07	8.75E+05	8.75E+05	0.01	1527.05	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 13 costos	6.14E+05	1.21E+08	1.21E+08	9.59	28800.17	7.10E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.20E+05
R ϵ 14 amb	6.97E+07	8.96E+05	8.96E+05	0.01	237.56	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 14 costos	5.98E+05	1.25E+08	1.25E+08	6.91	28800.17	9.03E+07	0	2.54E+05	0
R ϵ 15 amb	6.97E+07	9.17E+05	9.17E+05	0	206.97	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 15 costos	6.22E+05	1.30E+08	1.29E+08	11.46	28800.19	7.51E+07	1.16E+07	2.18E+05	1.20E+05
R ϵ 16 amb	6.97E+07	9.39E+05	9.39E+05	0.01	248.64	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 16 costos	6.26E+05	1.34E+08	1.34E+08	13.85	28800.27	1.02E+08	0	1.92E+05	0
R ϵ 17 amb	6.97E+07	9.60E+05	9.60E+05	0	429.27	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 17 costos	6.34E+05	1.38E+08	1.38E+08	15.54	28800.17	1.06E+08	0	1.92E+05	0
R ϵ 18 amb	6.97E+07	9.81E+05	9.81E+05	0	337.22	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 18 costos	6.20E+05	1.42E+08	1.42E+08	14.85	28800.12	1.04E+08	0	2.71E+05	0
R ϵ 19 amb	6.76E+07	1.00E+06	1.00E+06	0	196.7	0	3.38E+07	0	4.54E+05	R ϵ 19 costos	5.98E+05	1.46E+08	1.46E+08	8.83	28819.01	1.11E+08	0	2.54E+05	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 20: Resultados de la frontera de Pareto 13 (F13)

	Minimizando costos					Minimizando impacto ambiental													
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	
Minimizando costo	1.15E+08	8.37E+05	N.A.	0	21.08	0	3.42E+07	0	4.31E+05	5.98E+05	1.85E+08	N.A.	0.01	985.11	1.15E+08	0	2.54E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	6.10E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	7.96E+05	1.18E+08	1.18E+08	0.01	6545.04	3.48E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 2 amb	-	-	6.22E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	7.96E+05	1.22E+08	1.22E+08	0	6070.47	6.97E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 3 amb	1.42E+08	6.34E+05	6.34E+05	14.68	28800.19	6.10E+07	1.16E+07	1.76E+05	1.20E+05	R ϵ 3 costos	7.96E+05	1.25E+08	1.25E+08	0	3005.33	1.04E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 4 amb	-	-	6.46E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 4 costos	7.96E+05	1.29E+08	1.29E+08	0	1371.75	1.39E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 5 amb	1.35E+08	6.58E+05	6.58E+05	8.15	28800.16	4.43E+07	2.29E+07	1.28E+05	2.71E+05	R ϵ 5 costos	7.96E+05	1.32E+08	1.32E+08	0.01	3833.13	1.74E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 6 amb	1.35E+08	6.70E+05	6.70E+05	10.94	28800.18	4.43E+07	2.29E+07	1.27E+05	2.71E+05	R ϵ 6 costos	6.42E+05	1.36E+08	1.36E+08	0	5826.34	4.50E+07	2.29E+07	1.27E+05	2.71E+05
R ϵ 7 amb	1.35E+08	6.82E+05	6.82E+05	11.84	28800.17	4.43E+07	2.29E+07	1.27E+05	2.71E+05	R ϵ 7 costos	6.42E+05	1.39E+08	1.39E+08	0	3828.02	5.76E+07	1.16E+07	1.63E+05	1.20E+05
R ϵ 8 amb	1.35E+08	6.94E+05	6.94E+05	12.17	28800.17	4.43E+07	2.29E+07	1.27E+05	2.71E+05	R ϵ 8 costos	6.18E+05	1.43E+08	1.43E+08	0.01	7338.72	6.19E+07	1.16E+07	1.72E+05	1.20E+05
R ϵ 9 amb	1.35E+08	7.06E+05	7.06E+05	11.91	28800.17	4.43E+07	2.29E+07	1.27E+05	2.71E+05	R ϵ 9 costos	6.14E+05	1.46E+08	1.46E+08	0.01	6568.37	6.44E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.20E+05
R ϵ 10 amb	1.35E+08	7.18E+05	7.18E+05	12.05	28800.19	4.64E+07	1.41E+07	1.34E+05	1.91E+05	R ϵ 10 costos	6.14E+05	1.50E+08	1.50E+08	2.67	28800.18	6.79E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.20E+05
R ϵ 11 amb	1.35E+08	7.30E+05	7.30E+05	12.79	28800.17	4.64E+07	1.41E+07	1.54E+05	1.91E+05	R ϵ 11 costos	6.26E+05	1.53E+08	1.53E+08	8.70	28800.17	7.64E+07	0	1.92E+05	0
R ϵ 12 amb	1.35E+08	7.42E+05	7.42E+05	12.54	28800.38	4.43E+07	2.29E+07	1.27E+05	2.71E+05	R ϵ 12 costos	6.14E+05	1.57E+08	1.57E+08	9.20	28800.18	7.48E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.20E+05
R ϵ 13 amb	-	-	7.53E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 13 costos	5.98E+05	1.60E+08	1.60E+08	5.20	28800.18	9.05E+07	0	2.54E+05	0
R ϵ 14 amb	1.37E+08	7.65E+05	7.65E+05	14.91	28800.24	4.82E+07	1.41E+07	1.40E+05	1.87E+05	R ϵ 14 costos	6.40E+05	1.64E+08	1.64E+08	16.86	28800.74	7.60E+07	1.16E+07	2.18E+05	1.23E+05
R ϵ 15 amb	1.35E+08	7.77E+05	7.77E+05	13.40	28800.18	4.61E+07	1.41E+07	1.53E+05	1.91E+05	R ϵ 15 costos	5.98E+05	1.67E+08	1.67E+08	5.33	28800.17	9.75E+07	0	2.54E+05	0
R ϵ 16 amb	-	-	7.89E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 16 costos	6.35E+05	1.71E+08	1.71E+08	16.09	28825.61	9.00E+07	0	2.46E+05	0
R ϵ 17 amb	1.15E+08	8.01E+05	8.01E+05	0	471.39	0	3.42E+07	0	4.31E+05	R ϵ 17 costos	6.35E+05	1.74E+08	1.74E+08	14.05	28801.25	9.35E+07	0	2.46E+05	0
R ϵ 18 amb	1.15E+08	8.13E+05	8.13E+05	0	1577.46	0	3.42E+07	0	4.31E+05	R ϵ 18 costos	6.51E+05	1.78E+08	1.78E+08	19.02	28800.9	1.01E+08	2.90E+06	2.73E+05	3.08E+04
R ϵ 19 amb	1.15E+08	8.25E+05	8.25E+05	0	2171.95	0	3.42E+07	0	4.31E+05	R ϵ 19 costos	6.11E+05	1.81E+08	1.81E+08	10.20	28807.18	1.09E+08	0	3.28E+05	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 21: Resultados de la frontera de Pareto 14 (F14)

	Minimizando costos					Minimizando impacto ambiental													
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	
Minimizando costo	3.23E+08	6.71E+05	N.A.	0	1000.53	4.43E+07	2.29E+07	1.28E+05	2.71E+05	5.98E+05	4.30E+08	N.A.	0.01	944.88	1.15E+08	0	2.54E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	6.02E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	6.17E+05	3.28E+08	3.28E+08	0	3127.61	8.99E+07	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 2 amb	-	-	6.06E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	6.17E+05	3.33E+08	3.33E+08	0	9971.01	9.53E+07	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 3 amb	-	-	6.09E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 3 costos	6.17E+05	3.39E+08	3.39E+08	0	5350.3	1.01E+08	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 4 amb	-	-	6.13E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 4 costos	6.17E+05	3.44E+08	3.44E+08	5.10	28800.16	1.06E+08	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 5 amb	-	-	6.17E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	6.17E+05	3.50E+08	3.50E+08	0.0					

	Minimizando costos							Minimizando impacto ambiental											
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	
Minimizando costo	6.76E+07	1.02E+06	N.A.	0	4.66	0	3.38E+07	0	4.54E+05	5.98E+05	1.45E+08	N.A.	0.01	843.85	1.10E+08	0	2.54E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	6.20E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	7.96E+05	7.15E+07	7.15E+07	0	1546.44	1.16E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 2 amb	9.83E+07	6.41E+05	6.41E+05	12.67	28800.66	6.63E+07	0	1.92E+05	0	R ϵ 2 costos	7.96E+05	7.54E+07	7.54E+07	0	834.6	5.05E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 3 amb	9.87E+07	6.62E+05	6.62E+05	17.21	28800.17	5.14E+07	1.16E+07	1.55E+05	1.27E+05	R ϵ 3 costos	7.96E+05	7.93E+07	7.93E+07	0.01	2969.33	8.94E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 4 amb	9.53E+07	6.83E+05	6.83E+05	17.05	28800.17	4.94E+07	1.13E+07	1.82E+05	1.52E+05	R ϵ 4 costos	7.96E+05	8.32E+07	8.32E+07	0	1558.49	1.28E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 5 amb	-	-	7.05E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	7.96E+05	8.71E+07	8.71E+07	0	653.89	1.67E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 6 amb	9.39E+07	7.26E+05	7.26E+05	21.26	28800.17	4.20E+07	1.69E+07	1.27E+05	2.24E+05	R ϵ 6 costos	7.96E+05	9.10E+07	9.10E+07	0.01	1962.07	2.06E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 7 amb	9.27E+07	7.47E+05	7.47E+05	18.41	28800.17	4.38E+07	1.41E+07	1.33E+05	1.91E+05	R ϵ 7 costos	6.75E+05	9.48E+07	9.48E+07	0.01	7611.98	4.60E+07	1.41E+07	1.39E+05	1.87E+05
R ϵ 8 amb	-	-	7.69E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 8 costos	6.20E+05	9.87E+07	9.87E+07	0.01	7548.8	6.68E+07	0	1.92E+05	0
R ϵ 9 amb	-	-	7.90E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 9 costos	6.24E+05	1.03E+08	1.03E+08	0.01	11733.54	5.47E+07	1.16E+07	1.63E+05	1.20E+05
R ϵ 10 amb	7.04E+07	8.11E+05	8.11E+05	0	2612.31	0	3.42E+07	0	4.31E+05	R ϵ 10 costos	6.18E+05	1.07E+08	1.06E+08	5.12	28800.16	5.76E+07	1.16E+07	1.72E+05	1.20E+05
R ϵ 11 amb	6.97E+07	8.32E+05	8.32E+05	0	987.91	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 11 costos	6.14E+05	1.10E+08	1.10E+08	0.54	28800.18	6.01E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.20E+05
R ϵ 12 amb	6.97E+07	8.54E+05	8.54E+05	0.01	616.98	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 12 costos	6.14E+05	1.14E+08	1.14E+08	7.48	28803.42	6.40E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.20E+05
R ϵ 13 amb	6.97E+07	8.75E+05	8.75E+05	0.01	240.57	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 13 costos	6.14E+05	1.18E+08	1.18E+08	7.63	28800.18	6.79E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.20E+05
R ϵ 14 amb	6.97E+07	8.96E+05	8.96E+05	0.01	223.28	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 14 costos	6.07E+05	1.22E+08	1.22E+08	7.79	28800.17	8.76E+07	0	2.60E+05	0
R ϵ 15 amb	6.97E+07	9.17E+05	9.17E+05	0.01	636.97	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 15 costos	5.98E+05	1.26E+08	1.26E+08	9.31	28800.17	9.09E+07	0	2.54E+05	0
R ϵ 16 amb	6.97E+07	9.39E+05	9.39E+05	0.01	1724.74	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 16 costos	6.01E+05	1.30E+08	1.30E+08	8.93	28805.17	9.35E+07	0	2.54E+05	0
R ϵ 17 amb	6.97E+07	9.60E+05	9.60E+05	0.01	238.65	0	3.42E+07	0	4.37E+05	R ϵ 17 costos	5.98E+05	1.34E+08	1.34E+08	9.62	28800.18	9.87E+07	0	2.54E+05	0
R ϵ 18 amb	6.97E+07	9.81E+05	9.81E+05	0.01	375.93	0	3.42E+07	0	4.36E+05	R ϵ 18 costos	6.20E+05	1.38E+08	1.38E+08	12.39	28815.61	8.73E+07	1.16E+07	1.70E+05	1.27E+05
R ϵ 19 amb	6.76E+07	1.00E+06	1.00E+06	0	198.59	0	3.38E+07	0	4.54E+05	R ϵ 19 costos	5.98E+05	1.41E+08	1.41E+08	9.777	28800.19	1.06E+08	0	2.54E+05	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 23: Resultados de la frontera de Pareto 16 (F16)

	Minimizando costos							Minimizando impacto ambiental											
	Costo (E^8)	Impacto Ambiental (E^5)	Restricción (E^5)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno (E^7)	Costo asociado cliniker (E^7)	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado cliniker (op+trans) (E^5)	Impacto (E^5)	Costo (E^8)	Restricción (E^5)	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp) (E^5)	Impacto asociado cliniker (op+trans) (E^5)	
Minimizando costo	1.15	8.37	N.A.	0	28.16	0	3.42	0	4.31	5.98	1.80	N.A.	0.01	922.76	1.10E+08	0	2.54	0	
R ϵ 1 amb	-	-	6.10	-	-	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	-	1.18E+08	-	-	-	-	-	-	-
R ϵ 2 amb	-	-	6.22	-	-	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	7.96	1.21	1.21E+08	0	3006.33	6.50E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 3 amb	-	-	6.34	-	-	-	-	-	-	R ϵ 3 costos	7.96	1.25	1.25E+08	0	1659.92	9.75E+06	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 4 amb	-	-	6.46	-	-	-	-	-	-	R ϵ 4 costos	7.96	1.28	1.28E+08	0	5771.83	1.30E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 5 amb	1.33	6.58	6.58	10.85	46800.17	4.20	2.29	1.28	2.71	R ϵ 5 costos	7.96	1.31	1.31E+08	0.01	9531.59	1.63E+07	3.42E+07	0	4.31E+05
R ϵ 6 amb	-	-	6.70	-	-	-	-	-	-	R ϵ 6 costos	6.42	1.34	1.34E+08	0	1466.82	4.36E+07	2.29E+07	1.27	2.71E+05
R ϵ 7 amb	-	-	6.82	-	-	-	-	-	-	R ϵ 7 costos	6.24	1.38	1.38E+08	0.01	5446.02	5.59E+07	1.16E+07	1.63	1.20E+05
R ϵ 8 amb	1.33	6.94	6.94	9.57	46800.17	4.20	2.29	1.27	2.71	R ϵ 8 costos	6.14	1.41	1.41E+08	0.01	4860.07	5.90E+07	1.16E+07	1.70	1.20E+05
R ϵ 9 amb	-	-	7.06	-	-	-	-	-	-	R ϵ 9 costos	6.14	1.44	1.44E+08	0.01	4698.93	6.23E+07	1.16E+07	1.70	1.20E+05
R ϵ 10 amb	-	-	7.18	-	-	-	-	-	-	R ϵ 10 costos	6.14	1.47	1.47E+08	3.82	28800.21	6.55E+07	1.16E+07	1.70	1.20E+05
R ϵ 11 amb	-	-	7.30	-	-	-	-	-	-	R ϵ 11 costos	6.14	1.51	1.51E+08	7.25	28800.19	6.88E+07	1.16E+07	1.70	1.20E+05
R ϵ 12 amb	-	-	7.42	-	-	-	-	-	-	R ϵ 12 costos	6.22	1.54	1.54E+08	11.46	28800.17	7.16E+07	1.16E+07	1.71	1.27E+05
R ϵ 13 amb	1.32	7.53	7.53	11.01	46800.17	4.38	1.41	1.34	1.91	R ϵ 13 costos	7.06	1.57	1.57E+08	24.13	28800.12	6.42E+07	5.64E+06	2.94	7.62E+04
R ϵ 14 amb	-	-	7.65	-	-	-	-	-	-	R ϵ 14 costos	5.98	1.60	1.60E+08	6.09	28800.17	9.97E+07	0	2.54	0
R ϵ 15 amb	1.32	7.77	7.77	11.62	46800.17	4.38	1.41	1.53	1.91	R ϵ 15 costos	5.99	1.64	1.64E+08	9.28	28800.19	9.34E+07	0	2.54	0
R ϵ 16 amb	1.34	7.89	7.89	12.85	46800.16	4.38	1.44	1.53	1.74	R ϵ 16 costos	5.98	1.67	1.67E+08	6.66	28800.18	9.72E+07	0	2.54	0
R ϵ 17 amb	1.15	8.01	8.01	0	720.09	0	3.42	0	4.31	R ϵ 17 costos	6.60	1.70	1.70E+08	18.51	28817.64	9.33E+07	0	2.82	0
R ϵ 18 amb	1.15	8.13	8.13	0	1298.85	0	3.42	0	4.31	R ϵ 18 costos	5.99	1.73	1.74E+08	12.98	28822.36	1.04E+08	0	2.54	0
R ϵ 19 amb	1.15	8.25	8.25	0	755.59	0	3.42	0	4.31	R ϵ 19 costos	6.47	1.77	1.77E+08	17.49	28820.23	9.49E+07	0	2.56	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 24: Resultados de la frontera de Pareto 17 (F17)

	Minimizando costos							Minimizando impacto ambiental											
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	
Minimizando costo	3.20E+08	6.71E+05	N.A.	0	849.21	4.20E+07	2.29E+07	1.28E+05	2.71E+05	5.98E+05	4.26E+08	N.A.	0.01	897.43	1.10E+08	0	2.54E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	6.02E+05	19.76	16314	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	6.17E+05	3.26E+08	3.26E+08	0	3642.03	8.74E+07	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 2 amb	-	-	6.06E+05	20.89	12126.03	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	6.17E+05	3.31E+08	3.31E+08	0	9385.9	9.27E+07	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 3 amb	-	-	6.09E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 3 costos	6.17E+05	3.36E+08	3.36E+08	0	15435.59	9.80E+07	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 4 amb	-	-	6.13E+05	-	-	-	-	-	-	R ϵ 4 costos	6.17E+05	3.41E+08	3.41E+08	0.01	19146.51	1.03E+08	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 5 amb	-	-	6.17E+05	0	2940.54	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	6.17E+05	3.47E+08	3.47E+08	11.25	28800.28	1.09E+08	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 6 amb	3.22E+08	6.20E+05	6.20E+05	0	7258.79	8.40E+07	1.16E+07	2.55E+05	1.20E+05	R ϵ 6 costos	6.17E+05	3.52E+08	3.52E+08	10.79	28800.17	1.14E+08	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05
R ϵ 7 amb	3.22E+08	6.24E+05	6.24E+05	0	7688.98	8.40E+07	1.16E+07	2.54E+05	1.20E+05	R ϵ 7 costos	6.22E+05	3.57E+08	3.57E+08	16.83	28834.53</				

	Minimizando costos										Minimizando impacto ambiental								
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	
Minimizando costo	1.66E+08	2.11E+06	N.A.	0.01	394.6	0	8.54E+07	0	1.08E+06	1.08E+06	3.22E+08	N.A.	0.01	688.52	2.37E+08	0	6.01E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	1.13E+06	0	28814.65	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	1.93E+06	1.74E+08	1.74E+08	0.01	434.88	3.22E+06	8.54E+07	0	1.17E+06
R ϵ 2 amb	-	-	1.18E+06	0	28800.05	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	1.93E+06	1.82E+08	1.82E+08	0.01	19603.9	1.10E+07	8.54E+07	0	1.17E+06
R ϵ 3 amb	-	-	1.23E+06	0	28800.02	-	-	-	-	R ϵ 3 costos	1.73E+06	1.90E+08	1.90E+08	0.01	3772	4.24E+07	6.53E+07	1.50E+05	8.36E+05
R ϵ 4 amb	-	-	1.28E+06	0	28800.05	-	-	-	-	R ϵ 4 costos	1.63E+06	1.97E+08	1.97E+08	0.01	21531.15	4.83E+07	6.26E+07	1.67E+05	8.53E+05
R ϵ 5 amb	-	-	1.34E+06	0	28823.22	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	1.64E+06	2.05E+08	2.05E+08	13.45	28800.44	7.18E+07	5.12E+07	1.95E+05	8.20E+05
R ϵ 6 amb	-	-	1.39E+06	0	28800.04	-	-	-	-	R ϵ 6 costos	1.31E+06	2.13E+08	2.13E+08	0.01	12913.47	9.89E+07	3.42E+07	2.69E+05	4.27E+05
R ϵ 7 amb	2.08E+08	1.44E+06	1.44E+06	8.55	28800.43	8.09E+07	4.55E+07	2.23E+05	5.69E+05	R ϵ 7 costos	1.26E+06	2.21E+08	2.21E+08	0.01	6871.65	1.09E+08	2.86E+07	3.01E+05	9.41E+05
R ϵ 8 amb	-	-	1.49E+06	0	28921.31	-	-	-	-	R ϵ 8 costos	1.30E+06	2.28E+08	2.28E+08	12.79	28800.89	1.19E+08	2.87E+07	2.92E+05	3.58E+05
R ϵ 9 amb	-	-	1.54E+06	-	-	-	-	-	-	R ϵ 9 costos	1.29E+06	2.36E+08	2.36E+08	13.88	28800.49	1.22E+08	2.86E+07	4.65E+05	3.5E+05
R ϵ 10 amb	-	-	1.59E+06	-	-	-	-	-	-	R ϵ 10 costos	1.23E+06	2.44E+08	2.44E+08	14.54	28822.29	1.48E+08	1.16E+07	5.20E+05	1.20E+05
R ϵ 11 amb	-	-	1.65E+06	-	-	-	-	-	-	R ϵ 11 costos	1.20E+06	2.52E+08	2.52E+08	13.67	28865.04	1.55E+08	1.16E+07	5.88E+05	1.20E+05
R ϵ 12 amb	2.11E+08	1.70E+06	1.70E+06	16.76	28872.15	9.23E+07	3.73E+07	5.45E+05	4.49E+05	R ϵ 12 costos	-	-	2.60E+08	70.74	451.06	-	-	-	-
R ϵ 13 amb	2.15E+08	1.75E+06	1.75E+06	20.41	28800.44	1.05E+08	3.13E+07	2.83E+05	5.70E+05	R ϵ 13 costos	1.12E+06	2.67E+08	2.67E+08	8.93	28858.81	1.67E+08	1.45E+07	4.69E+05	1.58E+05
R ϵ 14 amb	1.87E+08	1.80E+06	1.80E+06	7.60	28800.41	3.67E+07	6.81E+07	1.25E+05	8.92E+05	R ϵ 14 costos	1.12E+06	2.75E+08	2.75E+08	9.01	28824.41	1.78E+08	1.16E+07	4.91E+05	1.28E+05
R ϵ 15 amb	1.95E+08	1.85E+06	1.85E+06	15.07	28847.24	4.61E+07	6.81E+07	1.82E+05	8.94E+05	R ϵ 15 costos	1.11E+06	2.83E+08	2.83E+08	7.57	28816.31	1.84E+08	1.45E+07	4.64E+05	1.50E+05
R ϵ 16 amb	-	-	1.90E+06	21.04	2046.95	-	-	-	-	R ϵ 16 costos	1.09E+06	2.91E+08	2.91E+08	7.18	28818.26	2.06E+08	0	6.07E+05	0
R ϵ 17 amb	1.69E+08	1.96E+06	1.96E+06	0.01	1488.83	0	8.54E+07	0	1.18E+06	R ϵ 17 costos	1.09E+06	2.98E+08	2.98E+08	6.76	28848.23	2.14E+08	0	6.02E+05	0
R ϵ 18 amb	1.69E+08	2.01E+06	2.01E+06	0.01	1326.29	0	8.54E+07	0	1.18E+06	R ϵ 18 costos	-	-	3.06E+08	20.68	1842.58	-	-	-	-
R ϵ 19 amb	1.66E+08	2.06E+06	2.06E+06	0.01	875.72	0	8.54E+07	0	1.08E+06	R ϵ 19 costos	1.11E+06	3.14E+08	3.14E+08	8.63	28817.07	2.29E+08	0	5.97E+05	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 26: Resultados de la frontera de Pareto 19 (F19)

	Minimizando costos										Minimizando impacto ambiental								
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	
Minimizando costo	2.71E+08	1.62E+06	N.A.	0	808.84	8.12E+07	4.27E+07	4.83E+05	5.97E+05	1.08E+06	3.67E+08	N.A.	0.01	653.11	2.37E+08	0	6.01E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	1.10E+06	0	28800.06	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	1.32E+06	2.76E+08	2.76E+08	0	4124.28	8.44E+07	4.27E+07	2.30E+05	5.97E+05
R ϵ 2 amb	-	-	1.13E+06	0	28800.24	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	-	2.80E+08	-	-	-	-	-	-	-
R ϵ 3 amb	-	-	1.16E+06	0	28800.12	-	-	-	-	R ϵ 3 costos	1.16E+06	2.85E+08	2.85E+08	0.01	19305.37	1.24E+08	2.58E+07	3.78E+05	3.03E+05
R ϵ 4 amb	-	-	1.19E+06	0	28865.09	-	-	-	-	R ϵ 4 costos	1.15E+06	2.90E+08	2.90E+08	0.01	22996.34	1.30E+08	2.58E+07	3.71E+05	3.03E+05
R ϵ 5 amb	-	-	1.21E+06	0	28800.11	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	1.15E+06	2.95E+08	2.95E+08	3.93	28800.41	1.35E+08	2.30E+07	4.05E+05	2.65E+05
R ϵ 6 amb	-	-	1.24E+06	0	28914.71	-	-	-	-	R ϵ 6 costos	1.10E+06	3.00E+08	3.00E+08	0.01	21616.94	1.56E+08	1.45E+07	4.73E+05	1.50E+05
R ϵ 7 amb	-	-	1.27E+06	0	28800.01	-	-	-	-	R ϵ 7 costos	1.10E+06	3.04E+08	3.04E+08	3.61	28801.87	1.61E+08	1.45E+07	4.71E+05	1.50E+05
R ϵ 8 amb	-	-	1.30E+06	0	28910.69	-	-	-	-	R ϵ 8 costos	-	3.09E+08	0	28800.04	-	-	0	0	0
R ϵ 9 amb	2.82E+08	1.32E+06	1.32E+06	3.75	28812.47	9.59E+07	3.71E+07	3.34E+05	4.87E+05	R ϵ 9 costos	1.09E+06	3.14E+08	3.14E+08	4.12	28800.97	1.72E+08	1.16E+07	4.82E+05	1.20E+05
R ϵ 10 amb	-	-	1.35E+06	0	28800.07	-	-	-	-	R ϵ 10 costos	1.10E+06	3.19E+08	3.19E+08	6.65	28825.88	1.75E+08	1.45E+07	4.72E+05	1.50E+05
R ϵ 11 amb	-	-	1.38E+06	0	28800.11	-	-	-	-	R ϵ 11 costos	1.11E+06	3.24E+08	3.24E+08	6.05	28829	1.79E+08	1.45E+07	4.75E+05	1.55E+05
R ϵ 12 amb	-	-	1.40E+06	0	28800.09	-	-	-	-	R ϵ 12 costos	-	-	3.28E+08	0	28800.23	-	-	-	-
R ϵ 13 amb	-	-	1.43E+06	6.72	6589.85	-	-	-	-	R ϵ 13 costos	1.11E+06	3.33E+08	3.33E+08	8.09	28800.51	1.88E+08	1.45E+07	4.70E+05	1.62E+05
R ϵ 14 amb	2.73E+08	1.46E+06	1.46E+06	0	28144.79	8.37E+07	4.27E+07	2.30E+05	5.97E+05	R ϵ 14 costos	-	3.38E+08	0	28898.14	-	-	-	-	
R ϵ 15 amb	2.89E+08	1.49E+06	1.49E+06	7.91	28800.57	9.00E+07	4.29E+07	3.42E+05	5.47E+05	R ϵ 15 costos	1.08E+06	3.43E+08	3.43E+08	4.10	28805.45	2.14E+08	0	6.02E+05	0
R ϵ 16 amb	2.84E+08	1.51E+06	1.51E+06	7.31	28820.09	9.48E+07	3.71E+07	2.58E+05	4.89E+05	R ϵ 16 costos	1.11E+06	3.47E+08	3.47E+08	7.33	28853.07	2.02E+08	1.16E+07	4.97E+05	1.28E+05
R ϵ 17 amb	-	-	1.54E+06	-	-	-	-	-	-	R ϵ 17 costos	-	-	3.52E+08	0	28817.35	-	-	-	0
R ϵ 18 amb	-	-	1.57E+06	-	-	-	-	-	-	R ϵ 18 costos	-	-	3.57E+08	0	28800.04	-	-	-	0
R ϵ 19 amb	2.79E+08	1.60E+06	1.60E+06	5.25	28800.75	6.35E+07	5.70E+07	2.98E+05	7.95E+05	R ϵ 19 costos	1.09E+06	3.62E+08	3.62E+08	5.90	28813.87	2.30E+08	0	6.07E+05	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 27: Resultados de la frontera de Pareto 20 (F20)

	Minimizando costos										Minimizando impacto ambiental								
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado cliniker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado cliniker (op+trans)	
Minimizando costo	6.08E+08	1.39E+06	N.A.	0.01	1512.23	1.52E+08	1.45E+07	7.14E+05	1.50E+05	1.08E+06	6.84E+08	N.A.	0.01	651.71	2.37E+08	0	6.01E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	1.09E+06	0	28800.05	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	1.10E+06	6.11E+08	6.11E+08	0	3045.96	1.55E+08	1.45E+07	4.73E+05	1.50E+05
R ϵ 2 amb	6.10E+08	1.11E+06	1.11E+06	0	13118.41	1.54E+08	1.45E+07	4.75E+05	1.50E+05	R ϵ 2 costos	1.10E+06	6.15E+08	6.15E+08	0	2891.86	1.59E+08	1.45E+07	4.73E+05	1.50E+05
R ϵ 3 amb	6.10E+08	1.12E+06	1.12E+06	0.01	3090.95	1.54E+08	1.45E+07	4.74E+05	1.50E+05	R ϵ 3 costos	1.10E+06	6.19E+08	6.19E+08	0.01	5107.23	1.63E+08	1.45E+07	4.70E+05	1.50E+05
R ϵ 4 amb	-	-	1.14E+06	0	28839.42	-	-	-	-	R ϵ 4 costos	1.10E+06	6.23E+08	6.23E+08	0.01	3945.11	1.66E+08	1.45E+07	4.70E+05	1.50E+05
R ϵ 5 amb	6.10E+08	1.16E+06	1.16E+06	0.01	2096.88	1.54E+08	1.45E+07	4.75E+05	1.50E+05	R ϵ 5 costos	1.10E+06	6.27E+08	6.27E+08	0.01	15817.19	1.70E+08	1.45E+07	4.70E+05	1.50E+05
R ϵ 6 amb	6.10E+08	1.17E+06	1.17E+06	0.01	2424.95	1.54E+08	1.45E+07	4.93E+05	1.50E+05	R ϵ 6 costos	1.10E+06	6.31E+08	6.31E+08	0.36	28800.41	1.74E+08	1.45E+07	4.70E+05	1.50E+05
R ϵ 7 amb	6.10E+08	1.19E+06																	

	Minimizando costos					Minimizando impacto ambiental													
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	
Minimizando costo	1.63E+08	2.11E+06	N.A.	0.01	75.56	0	8.54E+07	0	1.08E+06	1.08E+06	3.09E+08	N.A.	0	176.03	2.29E+08	0	6.01E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	1.13E+06	0	28800.05	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	1.93E+06	1.71E+08	1.71E+08	0	336.97	3.62E+06	8.54E+07	0	1.17E+06
R ϵ 2 amb	-	-	1.18E+06	0	28800.23	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	-	-	1.78E+08	-	-	-	-	-	-
R ϵ 3 amb	-	-	1.23E+06	0	28800.02	-	-	-	-	R ϵ 3 costos	1.73E+06	1.85E+08	1.85E+08	0	4315.28	4.13E+07	6.53E+07	1.50E+05	8.36E+05
R ϵ 4 amb	-	-	1.28E+06	0	28800.04	-	-	-	-	R ϵ 4 costos	1.63E+06	1.92E+08	1.92E+08	2.61	28800.39	5.32E+07	5.97E+07	1.60E+05	7.82E+05
R ϵ 5 amb	-	-	1.34E+06	0	28906.08	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	1.39E+06	2.00E+08	2.00E+08	0.01	14988.59	7.65E+07	4.55E+07	2.17E+05	5.69E+05
R ϵ 6 amb	-	-	1.39E+06	0	28800.03	-	-	-	-	R ϵ 6 costos	-	-	2.07E+08	-	-	-	-	-	-
R ϵ 7 amb	-	-	1.44E+06	0	28800.04	-	-	-	-	R ϵ 7 costos	1.31E+06	2.14E+08	2.14E+08	11.14	28802.18	9.56E+07	3.71E+07	3.20E+05	4.91E+05
R ϵ 8 amb	2.03E+08	1.49E+06	1.49E+06	11.14	28818.85	7.65E+07	4.84E+07	2.28E+05	6.16E+05	R ϵ 8 costos	1.36E+06	2.22E+08	2.22E+08	19.30	28838.36	1.33E+08	1.45E+07	3.88E+05	1.50E+05
R ϵ 9 amb	-	-	1.54E+06	0	28904.14	-	-	-	-	R ϵ 9 costos	1.20E+06	2.29E+08	2.29E+08	9.17	28821.27	1.20E+08	2.86E+07	3.50E+05	3.69E+05
R ϵ 10 amb	2.01E+08	1.59E+06	1.59E+06	12.12	28805.97	7.44E+07	4.83E+07	2.15E+05	7.34E+05	R ϵ 10 costos	1.31E+06	2.36E+08	2.36E+08	21.17	28827.54	1.45E+08	1.16E+07	5.29E+05	1.20E+05
R ϵ 11 amb	1.97E+08	1.65E+06	1.65E+06	11.83	28812.42	6.10E+07	5.42E+07	1.77E+05	7.25E+05	R ϵ 11 costos	1.21E+06	2.44E+08	2.44E+08	15.04	28817.07	1.51E+08	1.16E+07	5.37E+05	1.20E+05
R ϵ 12 amb	2.09E+08	1.70E+06	1.70E+06	18.31	28800.45	1.05E+08	2.87E+07	2.92E+05	4.63E+05	R ϵ 12 costos	-	-	2.51E+08	48.10	429.21	-	-	-	-
R ϵ 13 amb	1.91E+08	1.75E+06	1.75E+06	11.47	28803.49	4.96E+07	6.24E+07	1.99E+05	7.98E+05	R ϵ 13 costos	-	-	2.58E+08	47.80	515.31	-	-	-	-
R ϵ 14 amb	1.92E+08	1.80E+06	1.80E+06	18.42	28828.81	6.15E+07	5.41E+07	1.78E+05	7.01E+05	R ϵ 14 costos	1.09E+06	2.65E+08	2.65E+08	6.12	28812.67	1.73E+08	1.16E+07	4.85E+05	1.20E+05
R ϵ 15 amb	-	-	1.85E+06	0	-	-	-	-	-	R ϵ 15 costos	1.22E+06	2.73E+08	2.73E+08	16.70	28829.23	1.89E+08	0	7.19E+05	0
R ϵ 16 amb	-	-	1.90E+06	20.44	1630.17	-	-	-	-	R ϵ 16 costos	1.10E+06	2.80E+08	2.80E+08	7.61	28835.22	1.87E+08	1.16E+07	4.87E+05	1.28E+05
R ϵ 17 amb	-	-	1.96E+06	23.38	1608.93	-	-	-	-	R ϵ 17 costos	1.19E+06	2.87E+08	2.87E+08	14.42	28882.58	2.05E+08	0	6.90E+05	0
R ϵ 18 amb	1.65E+08	2.01E+06	2.01E+06	0.01	1248.68	0	8.54E+07	0	1.18E+06	R ϵ 18 costos	1.12E+06	2.95E+08	2.95E+08	9.19	28803.46	1.51E+08	8.70E+06	5.29E+05	9.02E+04
R ϵ 19 amb	1.63E+08	2.06E+06	2.06E+06	0	782	0	8.54E+07	0	1.08E+06	R ϵ 19 costos	1.14E+06	3.02E+08	3.02E+08	10.63	28811.02	2.16E+08	0	6.50E+05	0

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 29: Resultados de la frontera de Pareto 22 (F22)

	Minimizando costos					Minimizando impacto ambiental													
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	
Minimizando costo	2.63E+08	1.62E+06	N.A.	0	1599.62	7.75E+07	4.27E+07	4.83E+05	5.97E+05	1.08E+06	3.54E+08	N.A.	0.01	687.22	2.29E+08	0	6.01E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	1.10E+06	0	28817.41	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	1.32E+06	2.68E+08	2.68E+08	0	5419.66	8.08E+07	4.27E+07	2.30E+05	5.97E+05
R ϵ 2 amb	-	-	1.13E+06	0	28819.35	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	1.20E+06	2.72E+08	2.72E+08	0.01	23848.5	1.11E+08	3.14E+07	3.43E+05	3.77E+05
R ϵ 3 amb	-	-	1.16E+06	0	28800	-	-	-	-	R ϵ 3 costos	-	-	2.77E+08	0	28967.55	-	0	0	0
R ϵ 4 amb	-	-	1.19E+06	0	28800.09	-	-	-	-	R ϵ 4 costos	1.15E+06	2.81E+08	2.81E+08	0.01	21737.8	1.27E+08	2.30E+07	4.05E+05	2.65E+05
R ϵ 5 amb	-	-	1.21E+06	0	28800.08	-	-	-	-	R ϵ 5 costos	1.18E+06	2.86E+08	2.86E+08	8.91	28805.91	1.29E+08	2.58E+07	3.96E+05	3.03E+05
R ϵ 6 amb	-	-	1.24E+06	0	28804	-	-	-	-	R ϵ 6 costos	1.10E+06	2.90E+08	2.90E+08	1.31	28800.46	1.53E+08	1.16E+07	4.93E+05	1.20E+05
R ϵ 7 amb	-	-	1.27E+06	0	28800.04	-	-	-	-	R ϵ 7 costos	1.23E+06	2.95E+08	2.95E+08	15.35	28810.51	1.30E+08	3.14E+07	3.45E+05	3.98E+05
R ϵ 8 amb	-	-	1.30E+06	0	28800.02	-	-	-	-	R ϵ 8 costos	-	-	2.99E+08	0	28800.02	-	-	-	-
R ϵ 9 amb	-	-	1.32E+06	0	28800.08	-	-	-	-	R ϵ 9 costos	1.09E+06	3.04E+08	3.04E+08	4.32	28800.42	1.66E+08	1.16E+07	4.82E+05	1.20E+05
R ϵ 10 amb	2.70E+08	1.35E+06	1.35E+06	3.92	28801.33	8.65E+07	3.99E+07	2.79E+05	5.42E+05	R ϵ 10 costos	1.09E+06	3.09E+08	3.09E+08	5.26	28814.03	1.69E+08	1.16E+07	4.83E+05	1.28E+05
R ϵ 11 amb	2.72E+08	1.38E+06	1.38E+06	5.21	28805.92	9.10E+07	3.71E+07	2.58E+05	4.58E+05	R ϵ 11 costos	1.09E+06	3.13E+08	3.13E+08	4.94	28827.52	1.74E+08	1.16E+07	4.82E+05	1.28E+05
R ϵ 12 amb	-	-	1.40E+06	-	-	-	-	-	-	R ϵ 12 costos	-	-	3.18E+08	0	28800.02	-	-	-	-
R ϵ 13 amb	-	-	1.43E+06	-	-	-	-	-	-	R ϵ 13 costos	1.09E+06	3.22E+08	3.22E+08	6.38	28826.59	1.83E+08	1.16E+07	4.82E+05	1.28E+05
R ϵ 14 amb	3.34E+08	1.46E+06	1.46E+06	23.09	28906.31	1.66E+08	1.45E+07	5.84E+05	1.50E+05	R ϵ 14 costos	-	-	3.27E+08	0	28825.01	-	-	-	-
R ϵ 15 amb	3.62E+08	1.49E+06	1.49E+06	28.54	28800.58	1.95E+08	1.45E+07	6.56E+05	1.50E+05	R ϵ 15 costos	1.09E+06	3.31E+08	3.31E+08	5.82	28827.42	1.93E+08	1.16E+07	4.82E+05	1.20E+05
R ϵ 16 amb	2.87E+08	1.51E+06	1.51E+06	10.13	28832	9.60E+07	3.43E+07	3.57E+05	4.13E+05	R ϵ 16 costos	1.09E+06	3.36E+08	3.36E+08	5.66	28830.79	1.97E+08	1.16E+07	4.82E+05	1.28E+05
R ϵ 17 amb	3.13E+08	1.54E+06	1.54E+06	17.91	28850.89	1.37E+08	3.14E+07	3.80E+05	3.79E+05	R ϵ 17 costos	1.13E+06	3.40E+08	3.40E+08	10.17	28862.88	1.99E+08	8.70E+06	5.54E+05	9.02E+04
R ϵ 18 amb	3.16E+08	1.57E+06	1.57E+06	19.85	28802.14	1.37E+08	1.69E+07	4.04E+05	2.27E+05	R ϵ 18 costos	1.09E+06	3.45E+08	3.45E+08	5.83	28826.2	2.05E+08	1.16E+07	4.83E+05	1.20E+05
R ϵ 19 amb	2.63E+08	1.60E+06	1.60E+06	0	19401.44	7.75E+07	4.27E+07	4.83E+05	5.97E+05	R ϵ 19 costos	1.09E+06	3.50E+08	3.50E+08	7.00	28843.33	2.10E+08	1.16E+07	4.83E+05	1.28E+05

- No se obtuvo resultados de este experimento debido a que el experimento terminó por falta de memoria

Tabla 30: Resultados de la frontera de Pareto 23 (F23)

	Minimizando costos					Minimizando impacto ambiental													
	Costo	Impacto Ambiental	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	Impacto	Costo	Restricción ϵ	Gap %	Tiempo (segundos)	Costo asociado horno	Costo asociado clínker	Impacto asociado horno (op+transp)	Impacto asociado clínker (op+trans)	
Minimizando costo	5.98E+08	1.39E+06	N.A.	0.01	1371.32	1.46E+08	1.45E+07	7.13E+05	1.50E+05	1.08E+06	6.72E+08	N.A.	0.01	735.84	2.29E+08	0	6.01E+05	0	
R ϵ 1 amb	-	-	1.09E+06	0	28800.22	-	-	-	-	R ϵ 1 costos	1.10E+06	6.01E+08	6.01E+08	0	3633.43	1.49E+08	1.45E+07	4.73E+05	1.50E+05
R ϵ 2 amb	-	-	1.11E+06	0	28800.06	-	-	-	-	R ϵ 2 costos	1.10E+06	6.05E+08	6.05E+08	0	4225.69	1.53E+08	1.45E+07	4.70E+05	1.50E+05
R ϵ 3 amb	6.00E+08	1.12E+06	1.12E+06	0	16945.15	1.48E+08	1.45E+07	4.75E+05	1.50E+05	R ϵ 3 costos	1.10E+06	6.09E+08	6.09E+08	0.01	5005.74	1.57E+08	1.45E+07	4.70E+05	1.50E+05
R ϵ 4 amb	6.00E+08	1.14E+06	1.14E+06	0	3004.39	1.48E+08	1.45E+07	4.74E+05	1.50E+05	R ϵ 4 costos	1.10E+06	6.12E+08	6.12E+08	0.01	5090.18	1.60E+08	1.45E+07	4.70E+05	1.50E+05
R ϵ 5 amb	6.00E+08	1.16E+06	1.16E+06	0	14802.02	1.48E+08	1.45E+07	4.73E+05	1.50E+05	R ϵ 5 costos	1.10E+06	6.16E+08	6.16E+08	0.01	5179.49	1.64E+08	1.45E+07	4.70E+05	1.50E+05
R ϵ 6 amb	6.00E+08	1.17E+06	1.17E+06	0.01	1803.29	1.48E+08	1.45E+07	4.92E+05											

Bibliografía

- [1] C. A. Hendriks, E. Worrell, D. De Jager, K. Blok, y P. Riemer, “Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry,” in *Proceedings of the fourth international conference on greenhouse gas control technologies*, 1998, pp. 939–944.
- [2] K. Humphreys y M. Mahasenan, *Toward a Sustainable Cement Industry: Climate Change. Substudy 8*. World Business Council for Sustainable Development, 2002.
- [3] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, y A. Jullien, “Environmental impact of cement production: detail of the different processes and cement plant variability evaluation,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 5, pp. 478–485, Mar. 2010.
- [4] J. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, y E. Gartner, “Sustainable development and climate change initiatives,” *Cement and concrete research*, vol. 38, no. 2, pp. 115–127, Feb. 2008.
- [5] I. WBCSD, “Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050,” *World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency*, 2009.
- [6] V. Hoenig, H. Hoppe, y B. Emberger, “Carbon capture technology-options and potentials for the cement industry,” *Tannenstrasse: European Cement Research Academy*, p. 96, 2007.
- [7] J. Deja, A. Uliasz-Bochenczyk, y E. Mokrzycki, “CO₂ emissions from Polish cement industry,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 4, no. 4, pp. 583–588, Jul. 2010.
- [8] A. Hasanbeigi, C. Menke, y L. Price, “The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 18, no. 15, pp. 1509–1518, Nov. 2010.
- [9] I. P. on Climate Change. Working Group 3, B. Metz, O. Davidson, P. Bosch, R. Dave, y L. Meyer, *Climate Change 2007: Mitigation: Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Summary for Policymakers and Technical Summary*. Cambridge University Press, 2007.
- [10] R. Nobis, “Burning technology,” in *Proceedings of the 6th International VDZ Congress*, 2009, pp. 52–71.
- [11] A. Weber, C. J. Friedrich *et al.*, “Alfred Weber’s theory of the location of industries,” 1929.
- [12] T. S. Hale y C. R. Moberg, “Location science research: a review,” *Annals of Operations Research*, vol. 123, no. 1-4, pp. 21–35, 2003.
- [13] S. H. Owen y M. S. Daskin, “Strategic facility location: A review,” *European Journal of Operational Research*, vol. 111, no. 3, pp. 423–447, 1998.
- [14] J. Yao y A. T. Murray, “Serving regional demand in facility location,” *Papers in Regional Science*, vol. 93, no. 3, pp. 643–662, 2014.
- [15] A. A. Kuehn y M. J. Hamburger, “A heuristic program for locating warehouses,” *Management science*, vol. 9, no. 4, pp. 643–666, 1963.

- [16] C. H. Aikens, “Facility location models for distribution planning,” *European Journal of Operational Research*, vol. 22, no. 3, pp. 263–279, 1985.
- [17] A. M. Geoffrion y G. W. Graves, “Multicommodity distribution system design by benders decomposition,” *Management science*, vol. 20, no. 5, pp. 822–844, 1974.
- [18] C. S. Revelle y G. Laporte, “The plant location problem: new models and research prospects,” *Operations Research*, vol. 44, no. 6, pp. 864–874, 1996.
- [19] R. Z. Farahani, M. SteadieSeifi, y N. Asgari, “Multiple criteria facility location problems: A survey,” *Applied Mathematical Modelling*, vol. 34, no. 7, pp. 1689–1709, 2010.
- [20] J. Brimberg y C. ReVelle, “A bi-objective plant location problem: cost vs. demand served,” *Location Science*, vol. 6, no. 1, pp. 121–135, 1998.
- [21] E. H. Sabri y B. M. Beamon, “A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design,” *Omega*, vol. 28, no. 5, pp. 581–598, 2000.
- [22] J. G. Villegas, F. Palacios, y A. L. Medaglia, “Solution methods for the bi-objective (cost-coverage) unconstrained facility location problem with an illustrative example,” *Annals of Operations Research*, vol. 147, no. 1, pp. 109–141, 2006.
- [23] R. Bhattacharya y S. Bandyopadhyay, “Solving conflicting bi-objective facility location problem by NSGA II evolutionary algorithm,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 1-4, pp. 397–414, 2010.
- [24] B. L. Shankar, S. Basavarajappa, R. S. Kadadevaramath, y J. C. Chen, “A bi-objective optimization of supply chain design and distribution operations using non-dominated sorting algorithm: A case study,” *Expert Systems with Applications*, vol. 40, no. 14, pp. 5730–5739, 2013.
- [25] E. E. Agency, “Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2009,” *EEA REPORT 9/2009*, 2009.
- [26] S. K. Srivastava, “Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review,” *International journal of management reviews*, vol. 9, no. 1, pp. 53–80, 2007.
- [27] M. Eskandarpour, P. Dejax, J. Miemczyk, y O. Péton, “Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review,” *Omega*, vol. 54, pp. 11–32, 2015.
- [28] I. Harris, C. L. Mumford, y M. M. Naim, “A hybrid multi-objective approach to capacitated facility location with flexible store allocation for green logistics modeling,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 66, pp. 1–22, 2014.
- [29] A. Diabat y D. Simchi-Levi, “A carbon-capped supply chain network problem,” in *Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IEEM 2009. IEEE International Conference on*. Hong Kong, Hong Kong: IEEE, dic 2009, pp. 523–527.
- [30] F. Wang, X. Lai, y N. Shi, “A multi-objective optimization for green supply chain network design,” *Decision Support Systems*, vol. 51, no. 2, pp. 262–269, 2011.

- [31] A. D. Bojarski, J. M. Laínez, A. Espuña, y L. Puigjaner, “Incorporating environmental impacts and regulations in a holistic supply chains modeling: An LCA approach,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 33, no. 10, pp. 1747–1759, 2009.
- [32] A. Hugo y E. Pistikopoulos, “Environmentally conscious long-range planning and design of supply chain networks,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, no. 15, pp. 1471–1491, 2005.
- [33] A. Ramudhin, A. Chaabane, M. Kharoune, y M. Paquet, “Carbon market sensitive green supply chain network design,” in *Industrial Engineering and Engineering Management, 2008. IEEM 2008. IEEE International Conference on*. Singapore, Singapore: IEEE, dic 2008, pp. 1093–1097.
- [34] G. Guillén-Gosálbez e I. Grossmann, “Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty,” *AIChE Journal*, vol. 55, no. 1, pp. 99–121, 2009.
- [35] —, “A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment model,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 42–58, 2010.
- [36] S. Treitl y W. Jammerneegg, “Facility location decisions with environmental considerations: a case study from the petrochemical industry,” *Journal of Business Economics*, vol. 84, no. 5, pp. 639–664, 2014.
- [37] T. Pinto-Varela, A. P. F. Barbosa-Póvoa, y A. Q. Novais, “Bi-objective optimization approach to the design and planning of supply chains: economic versus environmental performances,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 35, no. 8, pp. 1454–1468, 2011.
- [38] C. J. Corbett, F. J. Debets, y L. N. Van Wassenhove, “Decentralization of responsibility for site decontamination projects: A budget allocation approach,” *European Journal of Operational Research*, vol. 86, no. 1, pp. 103–119, 1995.
- [39] J. Q. F. Neto, G. Walther, J. Bloemhof, J. Van Nunen, y T. Spengler, “A methodology for assessing eco-efficiency in logistics networks,” *European Journal of Operational Research*, vol. 193, no. 3, pp. 670–682, 2009.
- [40] S. Elhedhli y R. Merrick, “Green supply chain network design to reduce carbon emissions,” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 17, no. 5, pp. 370–379, 2012.
- [41] M. Mirhadi Fard, C. J. Kibert, y A. R. Chini, “Decision-making for sustainable location of a cement plant in the state of Florida,” *International Journal of Sustainable Engineering*, pp. 1–17, 2015.
- [42] C. Miret, P. Chazara, L. Montastruc, S. Negny, y S. Domenech, “Design of bioethanol green supply chain: Comparison between first and second generation biomass concerning economic, environmental and social criteria,” *Computers & Chemical Engineering*, vol. 85, pp. 16–35, 2016.
- [43] E. Gartner, “Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements,” *Cement and Concrete research*, vol. 34, no. 9, pp. 1489–1498, 2004.
- [44] S. Ogbeide, “Developing an optimization model for CO₂ reduction in cement production process,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 3, no. 1, pp. 85–88, 2010.

- [45] M. Naranjo, D. T. Brownlow, y A. Garza, “CO₂ capture and sequestration in the cement industry,” *Energy Procedia*, vol. 4, pp. 2716–2723, 2011.
- [46] J. A. Moya, N. Pardo, y A. Mercier, “The potential for improvements in energy efficiency and CO₂ emissions in the EU27 cement industry and the relationship with the capital budgeting decision criteria,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 11, pp. 1207–1215, 2011.
- [47] M. Ali, R. Saidur, y M. Hossain, “A review on emission analysis in cement industries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, pp. 2252–2261, 2011.
- [48] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, y H. Bolio, “Sustainable cement production—present and future,” *Cement and Concrete Research*, vol. 41, no. 7, pp. 642–650, 2011.
- [49] C. Valderrama, R. Granados, J. L. Cortina, C. M. Gasol, M. Guillem, y A. Josa, “Implementation of best available techniques in cement manufacturing: a life-cycle assessment study,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 25, pp. 60–67, 2012.
- [50] E. Benhelal, G. Zahedi, y H. Hashim, “A novel design for green and economical cement manufacturing,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 22, no. 1, pp. 60–66, 2012.
- [51] X. Liang y J. Li, “Assessing the value of retrofitting cement plants for carbon capture: A case study of a cement plant in Guangdong, China,” *Energy Conversion and Management*, vol. 64, pp. 454–465, 2012.
- [52] H. Mikulčića, M. Vujanovića, N. Markovskab, R. V. Filkoskic, M. Bana, y N. Duića, “CO₂ emission reduction in the cement industry,” *Chemical Engineering*, vol. 35, 2013.
- [53] I. Martinez-Zarzoso y F. D. Nowak-Lehmann, “Is distance a good proxy for transport costs? the case of competing transport modes,” *The Journal of International Trade & Economic Development*, vol. 16, no. 3, pp. 411–434, 2007.
- [54] H. Lindstad, B. E. Asbjørnslett, y A. H. Strømman, “The importance of economies of scale for reductions in greenhouse gas emissions from shipping,” *Energy policy*, vol. 46, pp. 386–398, 2012.
- [55] A. Montoya, M. C. Vélez-Gallego, y J. G. Villegas, “Multi-product capacitated facility location problem with general production and building costs,” *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking*. *in press*.
- [56] J. Li, P. Tharakan, D. Macdonald, y X. Liang, “Technological, economic and financial prospects of carbon dioxide capture in the cement industry,” *Energy Policy*, vol. 61, pp. 1377–1387, 2013.
- [57] E. Worrell, “Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making. an energy star guide for energy and plant managers,” *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2008.
- [58] H. G. Van Oss, “Background facts and issues concerning cement and cement data,” Tech. Rep., 2005.
- [59] C. S. Initiative, “Development of state-of-the-art techniques in cement manufacturing: Trying to look ahead (CSI/ECRA-technology papers),” *CSI/ECRA Technology paper*, Düsseldorf, Geneva, 2009.

- [60] F. Schorcht, I. Kourti, B. M. Scalet, S. Roudier, y S. L. Delgado, *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide: Industrial Emissions Directive 2010/75/EU:(Integrated Pollution Prevention and Control)*. Publications Office of the European Union, 2013.
- [61] N. Madloul, R. Saidur, M. Hossain, y N. Rahim, “A critical review on energy use and savings in the cement industries,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 2042–2060, 2011.
- [62] D.-W. Song y P. M. Panayides, *Maritime Logistics: Contemporary Issues*. Emerald Group Publishing, 2012.