UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

FACULTAD DE INGENIERÍA

Determinación de la ubicación, distribución y diseño de plantas de trituración de envases para la obtención de arena de vidrio.

Federica Espasandín
María Clara Ruibal
Graciana Zecchi

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero de Producción.

Tutor

Adrián Ferrari

Tribunal

Javier Alsó
Emiliano García
Pedro Piñeyro

Montevideo, Uruguay, Julio de 2025

Resumen ejecutivo

En este proyecto se aborda la temática de retorno de los envases no retornables, centrándose en la búsqueda de una alternativa para el retorno y posterior reciclado de los envases de vidrio, que hoy en día en Uruguay son enviados a vertedero.

Se tomó como caso de estudio la expansión a nivel país de una alternativa de reciclaje ya existente en Uruguay, la cual consiste en triturar los envases hasta transformarlos en arena que puede sustituir a la arena natural en materiales de construcción como el hormigón y el asfalto.

Para el desarrollo de la expansión se hizo foco en la optimización de la red logística que permita recolectar los envases residuales de vidrio de todo el país, procesarlos, y distribuir la arena de vidrio entre los clientes. Con el objetivo de determinar dicha red, se elaboró un modelo matemático de programación lineal en GLPK, el cual tiene como resultado la ubicación de las plantas, sus capacidades, y sus conexiones con proveedores y clientes, que permiten una minimización de los costos de transporte.

Luego, se realizó un análisis del proceso de trituración, identificando las diferentes etapas y equipos involucrados. Se llevó a cabo un estudio de mercado para seleccionar la maquinaria necesaria que permita procesar todo el material recibido, obteniendo así un diseño a gran escala de la planta y un estimado de la inversión en equipamiento.

Por último se evaluó la rentabilidad del proyecto mediante un análisis financiero, en el cual se estudiaron sus egresos, beneficios e inversión inicial. Gracias al cálculo de los indicadores financieros seleccionados, se concluyó que en las condiciones actuales el proyecto no es rentable. Para determinar los cambios necesarios que permitan generar ganancias, se realizó un análisis de sensibilidad de dichos indicadores, el cual evidenció que tales modificaciones requerirían ser de una magnitud considerable.

Estos resultados, sumados al ejemplo de países más avanzados en el tema, permiten observar que una correcta implementación de la alternativa presentada debe venir acompañada por apoyos e incentivos del gobierno y de la sociedad.

Palabras clave : optimización, envases de vidrio, arena de vidrio, red logística, programación lineal, retornabilidad, proceso de trituración.

Agradecimientos

En primer lugar, queremos agradecer a nuestro tutor, Adrián Ferrari, quien nos guió a lo largo del proyecto, compartiendo su conocimiento y experiencia. También agradecemos a Ana Paula Demaría, fundadora de Arenas de Vidrio, por brindarnos su tiempo y experiencia en el rubro. Asimismo, agradecemos a los responsables de las empresas que compartieron información y opiniones sobre la situación actual del país: Plan Vale, Grinor, Bitafal, Urugestión, Cementos Artigas y Ecogestión.

Por último, queremos agradecer a nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional en esta etapa.

Índice

Resumen ejecutivo **2**
Agradecimientos **3**
1. Introducción **9**
2. Marco teórico **11**
2.1 Manejo de envases en el contexto global 12
2.2 Manejo de envases en Uruguay 13
2.3 Alternativas de reciclaje de vidrio y multilaminado en países de referencia 15
2.3.1 Vidrio 15
2.3.2 Multilaminado 19
2.4 Alternativas de reciclaje de multilaminado y vidrio en Uruguay 20
2.4.1 Multilaminado 21
2.4.2 Vidrio 21
3. Problemática **25**
4. Ubicación **27**
4.1 Modelo matemático 27
4.1.1 Formulación modelo matemático 27
4.1.2 Construcción del modelo 31
4.1.3 Validación del modelo 31
4.2 Relevamiento y generación de datos 39
4.2.1 Vidrio generado 39
4.2.2 Demanda de los clientes 40
4.2.3 Distancias 44
4.2.4 Costos de transporte 44
4.2.5 Conectividad y estado de rutas 45
4.3 Resolución del modelo 46
4.4 Análisis de Sensibilidad 51
4.4.1 Variación del costo de transporte 51
4.4.2 Variación de la demanda de los clientes 55
4.4.3 Variación de la cantidad de plantas a instalar 63
4.4.4 Variación de la cantidad de vidrio recolectado 67
4.4.5 Conclusiones análisis de sensibilidad 69
4.5 Distribución 70
4.5.1 Posibilidad de juntar clientes 73
5. Diseño de proceso y planta **77**
5.1 Proceso de trituración 77
5.2 Análisis de maquinaria 78
5.3 Diagrama de planta 83
6. Análisis financiero **85**
6.1 Inversión inicial 85

6.2 Depreciación 86
6.3 Egresos 87
6.4 Beneficios 89
6.5 Flujo de fondos 91
6.6 Análisis de sensibilidad 93
7. Conclusiones **97**
Referencias **100**
Anexo **106**

Lista de tablas

Tabla 1: Vidrio hueco vertido por departamento 40
Tabla 2: Consumo diario posible de arena de vidrio de los clientes 43
Tabla 3: Valores del factor Ti para todos los departamentos 46
Tabla 4: Resultados del modelo 51
Tabla 5: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al aumentar 10% su demanda 56
Tabla 6: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al disminuir 10% su demanda 57
Tabla 7: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al aumentar 10% la demanda del rubro asfalto 58
Tabla 8: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al disminuir 10% la demanda del rubro asfalto 59
Tabla 9: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al aumentar 10% la demanda del rubro baldosas 60
Tabla 10: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al disminuir 10% la demanda del rubro baldosas 61
Tabla 11: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al aumentar 10% la demanda del rubro hormigón 62
Tabla 12: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al disminuir 10% la demanda del rubro hormigón 63
Tabla 13: Entrega a clientes al instalar una única planta 64
Tabla 14: Entrega a clientes desde planta en Montevideo al instalar tres plantas 65
Tabla 15: Entrega a clientes desde planta en Canelones al instalar tres plantas 66
Tabla 16: Entrega a clientes desde planta en Montevideo al aumentar la cantidad de vidrio recolectado 68
Tabla 17: Entrega a clientes desde planta en Montevideo al disminuir la cantidad de vidrio recolectado 69
Tabla 18 : Entrega a clientes desde planta en Montevideo considerando camiones medianos y grandes. 72
Tabla 19: Distancias entre los clientes Baldosa 1, Baldosa 2, Hormigón 1, Asfalto 1 y Asfalto 4 74
Tabla 20: Cantidad de camiones medianos utilizados en el modelo original 74
Tabla 21: Cantidad de camiones medianos utilizados unificando clientes 75
Tabla 22: Inversión inicial en maquinaria 85
Tabla 23: Inversión inicial total 86
Tabla 24: Cuotas de depreciación por activo 87
Tabla 25: Costos operativos anuales totales 88
Tabla 26: Cálculo de los beneficios anuales obtenidos 89
Tabla 27: Beneficio por valor de desecho 90
Tabla 29: Cálculo de VAN y TIR 93
Tabla 30: Variación del precio de venta de la arena de vidrio 94
Tabla 31: Variación de los costos operativos 94
Tabla 32: Variación inversión inicial 95

Tabla 33: Distancias entre departamentos en km 106
Tabla 34: Distancias entre clientes y departamentos 108
Tabla 35: Egresos fijos gravados por impuestos por año 109
Tabla 36: Gastos no desembolsables por año 109

Lista de figuras

Figura 1: Conexiones entre proveedores y plantas obtenidos a partir del primer caso límite 33
Figura 2: Conexiones entre plantas y clientes obtenidos a partir del primer caso límite 34
Figura 3: Conexiones entre proveedores y plantas obtenidas a partir del tercer caso límite 36
Figura 4: Conexiones entre plantas y clientes obtenidas a partir del tercer caso límite 36
Figura 5: Conexiones entre proveedores, plantas y clientes obtenidas a partir del sexto caso límite 39
Figura 6: Distribución porcentual de los componentes de una mezcla asfáltica 42
Figura 7: Proveedores y clientes del problema matemático 44
Figura 8: Conexiones entre proveedores y planta de Montevideo 47
Figura 9: Conexiones entre proveedores y planta de Maldonado 48
Figura 10: Ubicación de las plantas y los potenciales clientes 48
Figura 11: Conexión entre la planta de Maldonado y su cliente Hormigón 3 49
Figura 12: Conexión entre la planta de Montevideo y sus clientes 50
Figura 13: Conexión entre la planta de Tacuarembó, sus proveedores y sus clientes. 53
Figura 14: Conexión entre la planta de Canelones y sus clientes 67
Figura 15: Diagrama de flujo del proceso de trituración 77
Figura 16 : Ejemplo de montacargas. [34] 79
Figura 17: Ejemplo de tolva [41] 80
Figura 18: Ejemplo de cinta transportadora [44] 81
Figura 19: Ejemplo de molino triturador [48] 82
Figura 20: Ejemplo de tamiz [52] 83
Figura 21: Diagrama de planta 84

1. Introducción

El presente trabajo comenzó con el tema de “Diseño de producto”, un campo bastante amplio al que se decidió darle un enfoque específico: el diseño de envases. A partir de allí, la investigación se centró en la retornabilidad de los diferentes tipos de envases. Actualmente, existen envases considerados retornables, que se reutilizan tras un proceso de devolución y lavado. Sin embargo, una gran proporción corresponde a envases de un solo uso, que simplemente se consumen y descartan. Fue al indagar sobre esta problemática que surgió la primera gran pregunta: ¿qué ocurre con estos envases en Uruguay?

En el avance de la investigación sobre la gestión de los envases descartables, se identificó el Plan Vale (Plan de Valorización de los Envases y Materiales de Envasado), aprobado en 2022 por el Ministerio de Ambiente como reemplazo del anterior Plan de Gestión de Envases, que no alcanzó los resultados esperados. Este nuevo plan busca recuperar y revalorizar los envases de un solo uso generados en el país, los cuales pueden ser de distintos materiales como vidrio, plástico, papel y cartón, aluminio o multilaminado. Al tratarse de un plan en etapa de implementación, aún persisten varias incógnitas. En reuniones mantenidas con representantes del mismo se constató, por ejemplo, que no existe todavía una salida definida para los envases de vidrio ni de multilaminado, lo que implica que aún no se conoce cómo se revalorizarán estos materiales.

Frente a este escenario, la investigación continuó en busca de alternativas de valorización, centrándose particularmente en el vidrio, dado que en el caso del multilaminado no se encontraron opciones viables ni suficiente información. El vidrio, en cambio, presenta diversas posibilidades de aprovechamiento: actualmente en Uruguay se generan unas 17 mil toneladas anuales de vidrio hueco que terminan en vertedero, y una alternativa concreta es su trituración para obtener polvo de vidrio, material que puede utilizarse como sustituto de la arena natural en la producción de cemento, asfalto y hormigón. En el país existe ya una empresa que realiza este proceso, aunque con limitaciones que le impiden absorber todo el volumen que se pretende recuperar a través del Plan Vale. En este contexto, el propósito del presente proyecto es ampliar esta alternativa, diseñando una red nacional de plantas de triturado de vidrio que permita llevar la solución a escala país, abordando su ubicación, distribución y diseño.

Para ello, en primer lugar, se desarrolló un modelo matemático de optimización lineal destinado a determinar las ubicaciones óptimas de las plantas y la distribución de flujos entre proveedores, plantas y clientes, minimizando los costos de transporte. El modelo obtenido resultó robusto y consistente, y posteriormente fue sometido a un análisis de sensibilidad que permitió comprobar la estabilidad de sus soluciones frente a variaciones en distintos parámetros, concluyendo que solo cambios extremos alteran de manera significativa los resultados.

En segundo lugar, se llevó a cabo un estudio sobre la distribución logística, considerando posibles alternativas de mejora en el transporte.

Luego, se trabajó en el diseño del proceso y de la planta, elaborando un diagrama de flujo, identificando la maquinaria necesaria y evaluando costos y capacidades de producción.

Finalmente, se realizó un análisis financiero a diez años de horizonte, que incluyó el cálculo de indicadores (VAN y TIR) y un análisis de sensibilidad para evaluar la rentabilidad del proyecto y los escenarios que la condicionan.

El documento se organiza de la siguiente manera: la Sección 2 presenta el marco teórico y los principales conceptos; la Sección 3 define la problemática y cómo se fue delimitando. La Sección 4 describe el modelo matemático, los casos analizados, el estudio de sensibilidad y alternativas de mejora para la distribución. En la Sección 5 se detalla el proceso de trituración y el diseño de la planta. La Sección 6 aborda el análisis financiero y la rentabilidad del proyecto. Por último, en la Sección 7 se presentan las conclusiones y las posibles líneas de trabajo a futuro.

2. Marco teórico

El principal enfoque de este proyecto es el “Diseño de producto”, un concepto que no solo abarca el diseño inicial, sino también el final de su vida útil y los posibles destinos posteriores, tales como la remanufactura, recuperación, reciclado y reúso. Con el aumento de la población mundial y los patrones de consumo insostenibles, la utilización de materias primas supera lo que se puede extraer, planteando un problema urgente. Por ello, es crucial diseñar los ciclos de vida de los productos usando los recursos de manera óptima, buscando siempre posibilidades de reutilización y reciclaje.

De acuerdo con el trabajo de Bocken, de Pauw, Bakker y van der Grinten [1], el final del ciclo de vida de un producto se puede trabajar desde distintas perspectivas, según si se busca enlentecer, cerrar o limitar el ciclo.

El primer caso, busca disminuir la velocidad en la que el producto llega a su fin de uso, esto puede ser mediante el reuso del mismo o mediante la realización de mejoras, mantenimientos y remanufacturas para poder extender su vida útil. Aunque en este caso simplemente se posterga un problema, ya que no implica reciclaje ni eliminación del producto, es una práctica muy utilizada a nivel mundial, en ejemplos como envases retornables, alquiler de vehículos y reventa de ropa usada.

Es en el caso de cerrar el ciclo donde sí se habla del reciclaje, donde se define cuál es el destino final del producto. Aquí el abanico de opciones es aún mayor ya que se puede reciclar el producto entero, reciclar las partes funcionales o hasta recurrir a la incineración para la generación de energía.

Por último, otra oportunidad de mejora es la de restringir los recursos que se utilizan en la creación, uso y desecho del producto, para lograr tener el mismo resultado con menos materiales, procedimientos y/o energía. Esta estrategia se basa en el diseño de productos y procesos más eficientes y sostenibles. Implica consciencia del impacto ambiental desde la fase de diseño, utilizando materiales sostenibles y adoptando diseños modulares o desarmables que faciliten el mantenimiento, la sustitución y el posterior reciclaje de piezas.

Lo ideal es aplicar simultáneamente las tres variantes, ya que se complementan y esto disminuiría al mínimo el impacto ambiental. Sin embargo, la más beneficiosa por separado y a la que el mundo está apuntando es la de cerrar por completo el ciclo del producto, transformándose así de una economía lineal a una economía circular.

Como se puede constatar en el trabajo de Den Hollander, Bakker, & Hultink [2], la economía circular es un modelo económico y de producción que busca minimizar el desperdicio y hacer un uso eficiente de los recursos mediante la creación de un ciclo continuo de utilización, reutilización y reciclaje de materiales y productos. Este modelo pretende que el valor económico y medioambiental del material se preserve el mayor tiempo posible, ya sea manteniéndolos siempre en el sistema o volviéndolos a introducir para que sean reutilizados.

Según el artículo de Pokharel, & Mutha [3], la logística inversa es fundamental para este proceso de reintroducción de productos en el sistema. Se refiere al proceso de gestionar el flujo de productos, materiales o residuos desde el cliente final de regreso a la cadena de suministro para su revalorización o disposición adecuada. A diferencia de la logística tradicional, que se enfoca en el movimiento de bienes hacia el cliente, la logística inversa se concentra en el movimiento hacia atrás en la cadena de suministro, la recolección y devolución de los productos y su posterior tratamiento.

En este contexto, se decidió analizar oportunidades de mejora en la logística inversa de los envases que actualmente no son retornables en nuestro país. El consumo creciente de envases de un solo uso presenta un riesgo significativo para el medio ambiente. La acumulación de plásticos, vidrios y demás materiales no biodegradables en los océanos, suelos y fuentes de agua conlleva a su contaminación y contribuye al cambio climático. El objetivo es encontrar la manera de revalorizar estos productos para evitar que terminen en vertederos, promoviendo así una economía circular.

2.1 Manejo de envases en el contexto global

Para comenzar, se investigaron distintas alternativas de logística inversa en países de referencia, donde se observó que los países con mayor índice de reciclaje emplean el Sistema de Depósito y Reembolso (SDR). Como se puede observar en el informe realizado por la consultora G-advisory en 2018 [4], este sistema implica que los consumidores paguen un pequeño importe por los envases de bebidas de un solo uso, como botellas de plástico y latas, el cual se les devuelve al llevar los envases a un punto de recolección. El SDR mejora la capacidad de recolección de los envases, que luego son reciclados, evitando que terminen en los vertederos. Además, como se destaca en el artículo de investigación publicado por la Yıldız Technical University de Estambul, el SDR permite la recolección de envases de manera separada de otros residuos, preservando así su valor económico al evitar la contaminación entre materiales [5].

Existen dos métodos principales para la recolección: manual, realizada por el personal de las tiendas, y automática, a través de máquinas de vending inverso (RVM) ubicadas en los comercios. El depósito otorgado a los consumidores puede ser en efectivo o en forma de un voucher canjeable en tiendas.

Los principales actores del sistema SDR son: los productores de envases, que suelen financiar el sistema para alcanzar los objetivos de reciclaje establecidos por los gobiernos; las tiendas, que actúan como puntos de recolección; y el operador del SDR, que puede ser una organización sin fines de lucro o una entidad gubernamental encargada de gestionar y controlar el sistema.

Como se puede constatar en el artículo realizado por TOMRA en el 2020 [6], en Noruega, este sistema fue implementado en 1970, permitiendo recolectar envases de plástico y metal para todo tipo de bebidas. En 2021, el depósito por un envase de 0,5 litros o menos era de aproximadamente 0,20 €, y para envases de más de 0,5 litros era de aproximadamente 0,30 €,

lo que incentivaba a los consumidores a devolver sus envases. Además, los productores de bebidas en envases de un solo uso deben pagar un impuesto básico y un impuesto ambiental variable, que se reduce a medida que aumentan las tasas de devolución. Las empresas con una tasa de devolución del 95% o más están exentas del impuesto medioambiental, lo que crea un incentivo financiero convincente para que los productores participen activamente en el SDR.

En el artículo “Sistemas de canje prácticos para los consumidores” realizado por TOMRA [7] se destaca que la proporción de puntos de devolución por habitante es un aspecto clave a tener en cuenta al implementar este sistema; una proporción de 1 punto de devolución por cada 355 a 1100 personas parece ser una solución eficaz. En 2021, la tasa de retorno de envases en Noruega fue del 92%, utilizando una relación de 1:355. La tasa de retorno en Lituania también fue del 92%, con una relación de 1:1117, mientras que en California fue del 62%, con una relación de 1:32411. El país con mayor éxito fue Alemania con una tasa de retorno de 98% utilizando una relación de 1: 638.

También se constata que es muy eficaz ubicar los puntos de retorno en comercios minoristas, como supermercados o centros comerciales. Esto facilita la devolución a los consumidores, que ya visitan estos comercios a diario, eliminando traslados innecesarios hacia puntos de retorno específicos. Además, se puede aprovechar la infraestructura y las redes logísticas ya existentes en estos comercios. Finalmente, el minorista se beneficia, ya que mejora su imagen y atrae más personas a su negocio.

Asimismo, se percibe que cuanto más cerca del punto de recogida se produzca la compactación de los envases, más combustible, carbono y dinero se ahorrará. Es por ello que Noruega y Suecia incentivan el uso de las máquinas de vending inverso que pueden compactar los envases pagando una cantidad más elevada a los minoristas que utilizan dicha tecnología.

Siguiendo con la investigación, se observó que los países con mayor tasa de reciclaje, han impuesto a sus industrias y distribuidores de envases leyes que los obligan a hacerse cargo de sus productos hasta el final de su vida. Según el artículo “Improving urban household solid waste management in developing countries based on the German experience” [8], en Alemania, en 1991 se introdujo el “Packaging Ordinance”, que obliga a todas las industrias y distribuidores de envases a hacerse cargo de sus residuos, siguiendo y financiando integralmente un sistema que asegure el reciclado de los mismos. Además, se implementaron campañas educativas masivas, lo que contribuyó a que Alemania fuera nombrada "world champion recycling country” en 2017.

2.2 Manejo de envases en Uruguay

Una vez obtenida una visión de cómo gestionan los países más desarrollados sus envases de un solo uso, se investigó la situación actual en Uruguay. Se descubrió que el primer plan para abordar el problema de los envases no retornables fue el Plan de Gestión de Envases (PGE), creado en 2007 de forma voluntaria por las empresas socias de la Cámara de Industrias del Uruguay. Además, se observó que ese mismo año, en Uruguay se estableció el Decreto 260/2007 [9], que obliga a los propietarios de marca e importadores de productos envasados a

responsabilizarse por la gestión pos-consumo de los envases de los productos. Para cumplir con esa obligación, deben contar o adherir a un plan de gestión de residuos de envases aprobado por el Ministerio de Ambiente (MA). Sin embargo, según el MA de Uruguay, después de 16 años, el PGE logró una tasa de recuperación de sólo el 4% de los envases [10]. En respuesta a esta situación, se creó el Plan para la Valoración de los Envases y Materiales de Envasado (Plan Vale) [11] impulsado por la Cámara de Industrias y con 2.500 empresas adheridas, el cual fue aprobado en agosto de 2022 por el Ministerio de Ambiente.

El Plan Vale tiene como objetivo recuperar los residuos reciclables del país, esencialmente aluminio, material celulósico, multilaminado, plásticos (PEAD, PEBD, PET, Poliestireno, PP, PVC) y vidrio. Esta recuperación se realizará mediante dos sistemas complementarios: el Sistema de Recuperación Selectiva y el Sistema de Depósito Reembolso.

El primer sistema consiste en dedicar diferentes espacios a la recepción de materiales reciclables como cartón, papel, plástico y aluminio. La recuperación se puede realizar mediante servicios puerta a puerta, ecopuntos, ecocentros, contenedores en comercios, bolsones o contenedores en hogares o centros de recepción. Luego de recuperar los materiales reciclables estos son clasificados y acondicionados en plantas de clasificación.

El segundo sistema pretende recuperar los envases de un solo uso de plástico PET, aluminio, vidrio y multilaminado. A estos envases se les asigna un valor monetario que el cliente paga al momento de la compra y recibe de vuelta una vez que devuelve el envase. Como ya se mencionó, este incentivo económico ha demostrado lograr altas tasas de recuperación en los países que ya utilizan el sistema.

Actualmente, se está preparando el SDR para su pronta implementación, con planes de instalar más de 5.000 puntos de recolección en todo el país. La ubicación de estos puntos ha sido cuidadosamente estudiada para maximizar la recuperación de envases, y se planea instalarlos en comercios minoristas como supermercados, centros comerciales y almacenes, facilitando el acceso a toda la población. Se utilizarán dos métodos de recolección, manual, donde el personal del comercio recibe el envase y lo clasifica, y automático, utilizando máquinas especializadas que reciben y clasifican los envases. El método usado dependerá del tamaño y de la capacidad del comercio.

Luego de ser recuperados en los comercios, los envases serán transportados a centros de consolidación, donde se clasificarán y se entregarán a distintas empresas y entidades encargadas de su revalorización.

Se cree que la implementación del sistema SDR en Uruguay traerá grandes beneficios, tales como: la disminución de basura en las calles, el apoyo a los comercios mediante una compensación por envase recogido, creación de nuevos puestos de trabajo y sobre todo, la mejora en la cantidad y calidad de los envases recuperados, ya que sólo se aceptarán aquellos en buenas condiciones.

Al descubrir que actualmente se está buscando implementar un plan para la logística inversa de envases no retornables en Uruguay, se consideró que sería una excelente oportunidad colaborar con ellos y ofrecer ayuda para resolver cualquier problema que puedan enfrentar.

Mediante comunicación con el equipo del Plan Vale, se informó que tienen soluciones para el reciclaje de plástico y del aluminio recuperados por el sistema SDR, pero enfrentan desafíos con el vidrio y el multilaminado. Actualmente, existen varias empresas que reciclan plástico en Uruguay y pueden hacerse cargo de transformar la totalidad de los envases de plástico que planea recuperar el Plan Vale. Estas empresas le dan un nuevo valor a los envases de plástico, transformándolos en diversos productos, como palets, placas, postes, piques, cajas, o hasta nuevos envases. En cuanto al aluminio, el mismo se puede fundir para crear nuevos productos. Existe una empresa nacional de referencia, la cual recolecta envases de aluminio (latas), los clasifica, limpia y prensa creando bloques que se funden para crear láminas del material. Estas láminas pasan a ser la materia prima de nuevos productos como cables, chapas e incluso nuevas latas.

Sin embargo, aún no se ha encontrado una solución factible para tratar todo el vidrio y multilaminado que el Plan Vale planea recuperar. Aunque se podría considerar la exportación de este material a otros países, el equipo indicó que se prefiere encontrar soluciones nacionales, para consolidar el ciclo dentro de Uruguay, dejando la exportación como última opción.

Por lo tanto, se decidió investigar alternativas para la revalorización de los envases de vidrio y multilaminado recuperados por el Plan Vale.

2.3 Alternativas de reciclaje de vidrio y multilaminado en países de referencia

2.3.1 Vidrio

Primero se investigó sobre el vidrio y sus alternativas de reciclaje en países de referencia. El vidrio es un material sólido y amorfo que permite el paso de la luz debido a su transparencia, mientras que su impermeabilidad impide el paso de líquidos y gases, lo que lo hace ideal para ventanas y envases. Además, el vidrio es extremadamente duradero, resistente a la mayoría de los químicos y no se oxida. Una de sus características más destacadas es que puede reciclarse en su totalidad e indefinidamente sin perder calidad ni pureza.

El vidrio está formado principalmente por los siguientes componentes:

- **Vitrificantes**: Son esenciales para la formación de la estructura vítrea del vidrio. Principalmente consisten en arena de silicio, que representa el 75% de su composición y contiene cuarzo (SiO_2) como ingrediente fundamental. Estos vitrificantes se funden a altas temperaturas durante el proceso de fabricación del vidrio, creando la estructura sólida y transparente del mismo.

- **Fundentes**: Facilitan la formación del vidrio al reducir su temperatura de fusión. El óxido de sodio es el fundente más crucial, ya que se emplea en prácticamente todos los tipos de vidrio. Los fundentes también pueden influir en las propiedades finales del vidrio, como su durabilidad y transparencia. Otros fundentes, como el carbonato de potasio, pueden usarse en combinación con el óxido de sodio para ajustar las propiedades específicas del vidrio.
- **Estabilizantes y otros aditivos**: Los estabilizantes como el óxido de calcio y el óxido de aluminio se añaden al vidrio para mejorar su resistencia y durabilidad. También se pueden usar colorantes como óxidos metálicos para darle diversos colores al vidrio u opacificantes, para hacer el vidrio opaco o semi translúcido.

Para obtener información sobre el vidrio y sus materias primas principales, se utilizó el “Análisis de Capacidades para el reciclado del vidrio en Uruguay” [12] elaborado en octubre de 2022, por una organización sin fines de lucro uruguaya.

Según este análisis, a nivel mundial, los principales productores de los vitrificantes son España, Italia, Japón y Sudáfrica, y en América Latina es Brasil, especialmente el estado de Minas Gerais. Se ha constatado que el consumo de arena de silicio va en aumento, por lo que la cadena de suministro del vidrio podría enfrentar presiones en el futuro.

En cuanto a los fundentes, el principal productor de óxido de sodio es Estados Unidos, que posee el yacimiento natural más grande de carbonato de sodio. Sin embargo, este compuesto también puede producirse mediante el método Solvay, que implica la reacción del cloruro sódico con bicarbonato amónico para obtener bicarbonato sódico, el cual se somete a descarbonatación para producir carbonato de sodio.

Se explica además que actualmente se está experimentando una escasez de soda Solvay (carbonato de sodio). Este material es crucial no sólo para la fabricación de vidrio, sino también para la producción de litio, un componente clave para la movilidad eléctrica. Argentina, Bolivia y Chile, conocidos como el “Triángulo del Litio”, son las principales regiones dedicadas a la explotación del material. Con la creciente tendencia hacia la electromovilidad, se prevé que la demanda de soda Solvay aumente, exacerbando la escasez de este material y elevando sus costos.

En este contexto, el artículo afirma que será crucial en el futuro próximo considerar alternativas a los materiales vírgenes, reduciendo la dependencia de materias primas no renovables. Se deberá fomentar la innovación en el reciclaje del vidrio, impulsando una economía más circular y resiliente a largo plazo. Para enfrentar esta situación, se han identificado varias opciones para revalorizar los envases de vidrio: moler finamente los envases para utilizar el polvo de vidrio como aditivo para materiales de construcción o filtrado de agua, limpiar y reutilizar los envases, y fundir los envases para darles una nueva forma.

2.3.1.1 Cemento

Se encontraron numerosos estudios y análisis sobre la utilización del vidrio finamente molido como aditivo para el cemento Portland; uno de ellos es el realizado por Lessard, Habert, Tagnit-Hamou, y Amor [13]. Además, se observó que a nivel mundial ya existen muchas empresas que fabrican y comercializan este producto. El cemento Portland es el tipo de cemento más comúnmente utilizado en la construcción y constituye la base de muchos tipos de hormigón y mortero. Es un aglutinante hidráulico cuyos componentes principales son los siguientes: clinker, sulfato de calcio (yeso), relleno de piedra caliza y otras adiciones menores.

El clinker es un componente principal del cemento, obtenido al calentar una mezcla de piedra caliza y arcilla a altas temperaturas (~1.450°C). Proporciona las propiedades hidráulicas del cemento, es decir, su capacidad para endurecerse y adquirir resistencia en presencia de agua.

Durante la fabricación de clinker se genera alrededor del 60% de las emisiones directas de CO_2 de la industria del cemento. Por lo tanto, sustituir parte de este es una estrategia clave para disminuir las emisiones de carbono en la producción de cemento. El clinker suele ser sustituido por relleno de piedra caliza, escorias de alto horno, puzolanas o cenizas volantes. Sin embargo, cada vez más se está considerando y utilizando el polvo de vidrio como posible sustituto. Este aditivo permite reciclar el vidrio de envases posconsumo, que de otro modo terminarían como desechos, contribuyendo así a la sostenibilidad y reducción de la huella de carbono.

2.3.1.2 Hormigón

Se han encontrado estudios y casos de éxito de empresas que utilizan arena de vidrio para fabricar hormigón. El hormigón es una mezcla de cemento, agregados (arena y grava), agua y, en muchos casos, aditivos que mejoran sus propiedades. El polvo de vidrio reciclado puede sustituir parcial o completamente la arena natural en la mezcla. Un ejemplo destacado es una empresa de Nueva York, Estados Unidos, que se especializa en la producción de puzolana a partir de vidrio reciclado [14]. Aunque la puzolana, un material de origen volcánico, no tiene propiedades cementantes por sí sola, al mezclarse con hidróxido de calcio y agua, reacciona químicamente para formar compuestos con propiedades cementantes. Esta empresa utiliza vidrio finamente molido como puzolana artificial para reemplazar parte del cemento en la fabricación de hormigón. Lo cual no solo contribuye a la reducción del impacto ambiental al reutilizar residuos de vidrio, sino que también mejora la durabilidad y resistencia del hormigón, disminuye su permeabilidad, y reduce la emisión de CO_2 al minimizar la cantidad de cemento Portland necesario. Además, esta práctica fomenta un enfoque más circular en la gestión de materiales, promoviendo la sostenibilidad en la industria de la construcción.

2.3.1.3 Asfalto

Luego, se encontraron varios estudios sobre la utilización de vidrio molido como agregado de mezclas asfálticas. La mezcla asfáltica es un material viscoso utilizado mayormente para construir carreteras, pavimentos e impermeabilización de techos. Sus principales componentes son los siguientes.

- **Asfalto:** Mezcla de hidrocarburos y otros componentes.
- **Agregado fino:** Suele utilizarse para rellenar los espacios entre las gravas del agregado grueso y mejorar la compactación. Además, los agregados finos mejoran la resistencia al deslizamiento de las superficies. Se utiliza principalmente arena.
- **Agregado grueso:** Suele ser grava o piedra triturada, se utiliza para proporcionar estructura y resistencia a la mezcla.

Se encontraron varios estudios que realizan pruebas experimentales, donde se reemplaza un porcentaje del agregado fino por polvo de vidrio. Un ejemplo de esto es la tesis de maestría en ingeniería civil “Influencia del vidrio molido como agregado fino en las propiedades de la mezcla de asfalto” [15] realizada en la Universidad Peruana Los Andes en 2022. Se sustituyó parcialmente el agregado fino por arena de vidrio en 2%, 5%, 8% y 12%. Se evaluaron propiedades físicas del material, como la cantidad de vacíos con aire, el peso específico, los vacíos de material agregado compactados y vacíos llenos de cemento asfáltico. Además, se evaluaron las propiedades mecánicas de la mezcla, como la estabilidad, el flujo y el índice de rigidez. Los resultados indicaron que la mezcla con un 5% de arena de vidrio presentó el mejor desempeño, cumpliendo con las especificaciones técnicas del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) de Perú para la construcción. En conclusión, se determinó que es viable sustituir un 5 % del agregado fino por arena de vidrio sin comprometer la calidad de la mezcla.

En el estudio "Use of Waste Crushed Glass for the Production of Hot-Mix Asphalt" [16], realizado para la Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies en 2016 se desarrolló una mezcla asfáltica sustituyendo en un 15% el agregado fino por arena de vidrio. Posteriormente, se realizaron pruebas de resistencia, durabilidad, densidad y estabilidad. Los resultados mostraron una mezcla óptima que cumple con los estándares de diseño de Sudáfrica, lo que indica que podría ser una alternativa viable y sostenible para la construcción de carreteras.

Los estudios revisados sugieren que el sector del asfalto presenta un gran potencial para la reutilización de arena de vidrio. Este enfoque no solo permite una gestión más sostenible de los residuos de vidrio, sino que también ofrece la oportunidad de mejorar ciertas propiedades de la mezcla asfáltica, como la durabilidad y resistencia. Además, la incorporación de polvo de vidrio podría reducir la demanda de materiales vírgenes en la producción de asfalto, contribuyendo a la economía circular y a un uso más eficiente de los recursos disponibles.

2.3.1.4 Lavado

Otra alternativa encontrada fue la de lavar y reutilizar envases de vidrio. Se halló que se han llevado a cabo varios estudios y proyectos piloto en diferentes partes del mundo. Un ejemplo notable es el proyecto reWine [17], realizado en Cataluña desde septiembre de 2016 hasta diciembre de 2020. Este proyecto piloto se centró en la reutilización de botellas de vino, abarcando todo el proceso desde el lavado y etiquetado hasta el embotellado y la distribución en el mercado. En el proyecto participaron bodegas, consumidores, bares, restaurantes, empresas distribuidoras, tiendas y centros de recogida. El objetivo principal fue identificar las

barreras y oportunidades en la reutilización de botellas de vidrio, así como evaluar los aspectos ambientales, económicos y técnicos implicados.

Para que la reutilización de envases de vidrio sea una alternativa viable, es esencial considerar varios factores clave. En primer lugar, la planta de lavado debe estar ubicada cerca de los puntos de recogida y de las bodegas. Esto es crucial porque los costos de transporte influyen significativamente en la viabilidad económica del proceso; el costo de lavar y reutilizar una botella debe ser menor que el de usar una nueva. Además, dado que el objetivo principal es reducir la huella de carbono, transportar botellas a largas distancias puede causar un aumento notable en la misma, comprometiendo el propósito del proyecto. También es importante que las botellas en una región tengan características similares para facilitar el proceso de lavado. Finalmente, se determinó que el Sistema de Depósito y Reembolso es el método más eficaz para incentivar el retorno de las botellas vacías por parte de los consumidores.

Al concluir el proyecto, se estimó que la reutilización de botellas de vino en el sector vitivinícola catalán podría ahorrar más de 100 millones de kg de CO_2 equivalentes anuales y reducir en más de 21 mil toneladas la cantidad de residuos, disminuyendo así la huella de carbono en un 28%. Este ahorro se lograría si se reutilizaran las 48 millones de botellas de vino producidas en Cataluña y distribuidas en el mercado catalán.

2.3.1.5 Fundición

También se investigó la alternativa de fundir el vidrio de los envases, un proceso que permite reciclar el 100% del material, y que puede ser reutilizado indefinidamente sin perder sus propiedades. El vidrio reciclado puede emplearse para fabricar nuevos envases, así como para crear decoraciones, esculturas, bisutería e instrumentos de laboratorio. Por ejemplo, en Alemania [8], el vidrio posconsumo es la materia prima más importante en la producción de nuevos envases de vidrio. Para asegurar un reciclaje eficiente, es crucial que el vidrio se deseche adecuadamente, separando las botellas por color. En Alemania, hay cerca de 300.000 contenedores específicos para vidrio donde los consumidores pueden depositar sus envases, clasificados por color. Luego de ser recogidos, estos envases son transportados a plantas de procesamiento, donde se trituran y se eliminan impurezas como tapas y etiquetas. Los fragmentos de vidrio se tamizan para clasificar por tamaño y se inspeccionan nuevamente para eliminar impurezas y colores incorrectos. Finalmente, el vidrio granulado se funde en hornos y se utiliza para la fabricación de nuevos envases.

2.3.2 Multilaminado

Al mismo tiempo, se investigó sobre el multilaminado y sus alternativas de reciclaje en países de referencia.

Como se puede observar en el trabajo realizado por Men Fung Gutiérrez [18], los envases multilaminados se componen de la combinación de dos o más tipos de materiales diferentes y son ampliamente utilizados en la industria. Generalmente, están construidos con 6 o 7 capas que incluyen papel (75%), polietileno (20%) y aluminio (5%). Esta combinación ofrece múltiples

beneficios: proporciona una resistencia superior a impactos y rasgaduras, así como una mayor durabilidad. Además, actúa como una barrera eficaz contra gases, humedad y luz, lo que ayuda a preservar los productos envasados. A su vez, son versátiles y moldeables, se pueden diseñar para cumplir con requisitos específicos de protección y funcionalidad. Todo esto hace que sean una alternativa muy atractiva para envasar alimentos y bebidas, manteniéndolos frescos y prolongando su vida útil. Sin embargo, la mezcla de materiales presenta desafíos significativos para el reciclaje. Aunque cada material individualmente podría ser reciclado, la complejidad de separarlos hace que el envase en su totalidad no sea reciclable y termine siendo desechado.

2.3.2.1 Reciclado

Igualmente, a nivel mundial se están implementando diferentes maneras de reciclar los multilaminados. Como se puede observar en el artículo “Diseño y desarrollo de un prototipo a partir de envases reciclados” realizado por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos en Lima [19], la opción más común consiste en triturar el material y moldearlo para fabricar ladrillos y placas, que son cada vez más utilizados en la construcción debido a sus propiedades destacadas. Estos productos reciclados cuentan con buenas cualidades de insonorización, estabilidad frente a fuertes variaciones climáticas, y resistencia a hongos y bacterias. Además, son fáciles de trabajar y adaptar, pueden ser aserrados, pegados, atornillados y pintados, lo que los convierte en una alternativa práctica para diferentes aplicaciones constructivas. Usualmente son utilizados como revestimientos, para impermeabilización de techos y exteriores o como sustituto de la madera para fabricar muebles y demás.

2.3.2.2 Diseño

Otra variante que está emergiendo con respecto al multilaminado es modificar el diseño del producto con un enfoque sustentable, como se puede observar en el artículo “Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: A Review” [20]. Actualmente, este enfoque se está abordando desde dos perspectivas. La primera consiste en diseñar el envase de manera que sea fácil de desmontar para el reciclaje, es decir, crear la base y la tapa del envase únicamente de plástico y mantener la columna del mismo de manera multilaminada. Esto permite que, al momento de reciclar el envase, se puedan separar la base y la tapa fácilmente, y obtener una plancha multilaminada para el uso que se desee. El otro enfoque es aún más ambicioso y pretende cambiar el diseño del producto desde su raíz, eliminando por completo el aluminio, lo que simplificaría la separación de los materiales restantes (celulosa y plástico) y su respectivo reciclaje. Países de referencia como Suiza [21] y Noruega [22] se posicionan como líderes en la creación y comercialización de estos envases.

2.4 Alternativas de reciclaje de multilaminado y vidrio en Uruguay

Una vez comprendidas las distintas formas de reciclar multilaminado y vidrio que se están utilizando en el mundo, se procedió a investigar la situación del reciclaje de estos materiales en Uruguay.

2.4.1 Multilaminado

Se obtuvo información de un webinar sobre nuevas tecnologías para el reciclaje de multilaminados y envases de larga vida realizado en octubre de 2020 [23]. En este, se explica que en 2017 Uruguay generó 1.000.300 ton de residuos domésticos. De este total, solo se recuperaron y valorizaron 140.267 ton. De esos residuos recuperados, solo el 0.04% correspondió a polilaminados, es decir, 61 ton de polilaminados fueron revalorizadas en 2017 en Uruguay. Luego, se observó que aunque algunas empresas uruguayas que reciclan plástico podrían utilizar polilaminados en la fabricación de productos como maderas plásticas, pallets, placas y piques de plástico reciclado, actualmente no existe una solución específica para el reciclaje de este tipo de residuos en Uruguay.

En contraste, en Argentina están emergiendo iniciativas para reciclar multilaminados. Por ejemplo, se están transformando envases de larga vida posconsumo en material aislante térmico y acústico, lo cual contribuye a la reducción del consumo energético, mejora el aislamiento acústico, prolonga la durabilidad de los edificios, y ofrece protección contra plagas, resistencia al fuego, y prevención de moho y hongos. Además, se producen placas modulares para revestimientos y maderas plásticas a partir de estos envases.

Dado que el desarrollo de reciclaje del multilaminado en Uruguay es muy escaso, se decidió buscar una solución para el vidrio. Se observó que existen más estudios y una mayor cantidad de empresas dedicadas al reciclaje de este material a nivel global.

2.4.2 Vidrio

Con respecto a la situación del reciclaje de vidrio en Uruguay, se encontró que no se cuenta con producción nacional de vidrio desde 2019, momento en el que cerró la fábrica que lo hacía [24].

Según el estudio de “Análisis de Capacidades para el reciclado del vidrio en Uruguay” [12], se identifican tres vías prioritarias de valorización del vidrio a profundizar: aumentar el reciclaje mediante exportación conjunta a países limítrofes, usar vidrio postconsumo para materiales de construcción y aumentar la retornabilidad a través de un lavadero colectivo.

En primer lugar, sabemos que de preferencia, sería lo mejor poder contar con una alternativa a nivel local, para mantener el material en el país y poder así acercarnos más a una economía circular.

Luego de conversar con expertos en el tema, se constató que hoy en día en Uruguay no existen lavaderos de envases posconsumo que permitan volver a utilizarlos. Aunque algunos emprendimientos familiares informales realizan el lavado manual de ciertos envases, como frascos de mermelada y botellones de vino, estos carecen de garantías sanitarias y sólo venden a pequeñas empresas de alimentos artesanales. En el caso de las botellas de vino de alta gama, que cuentan con la certificación VCP (Vinos de Calidad Preferente) [12], el uso de botellas reutilizadas no es una opción viable. La falta de cumplimiento de las normativas

bromatológicas restringe a los clientes potenciales, lo que convierte esta alternativa en un cuello de botella, capaz de recuperar solo una pequeña fracción del vidrio que se genera en el país.

En este contexto, se encontró una empresa que desde 2018 explora diversas alternativas de reciclaje para vidrio de todos los colores y tamaños [26]. En el presente informe se hará referencia a esta empresa como “Empresa A”. Se estableció contacto con su fundadora, quien se mostró dispuesta a colaborar con el proyecto y a oficiar como fuente de información, tanto de su empresa como también de la situación actual del vidrio en el país. La empresa produce arena de vidrio, que es vidrio reciclado triturado y procesado hasta obtener partículas de tamaño similar al de la arena natural. Este material ofrece dos grandes beneficios medioambientales: el vidrio deja de ser un desecho y se deja de extraer arena natural. La arena de vidrio tiene múltiples aplicaciones; desde el principio, se ha utilizado para hacer una mezcla con cemento para fabricar hormigón, con el que actualmente se construyen en su mayoría baldosas. Sin embargo, la arena resultante del proceso también podría utilizarse para asfaltar calles o como sustituto de la arena natural en filtros de agua.

La empresa acepta envases de vidrio de todos los colores y tamaños, pero no trabaja con vidrio plano debido a las limitaciones de su maquinaria, que no soporta pedazos grandes de vidrio. Desde 2022, Empresa A ha establecido un convenio con el departamento de Florida para reciclar vidrio en sus localidades. Se han colocado contenedores para la recolección de envases en 15 puntos estratégicos de la ciudad de Florida, que tiene poco más de 33.000 habitantes, con el objetivo de alcanzar todos los barrios de la localidad. Los envases recolectados son procesados en la planta y luego devueltos a Florida en forma de arena, la cual utilizan para fabricar bloques. Además, Empresa A firmó un convenio con la Intendencia de Montevideo, que les permite recibir los envases de vidrio recolectados en los ecocentros de la ciudad, aumentando así la cantidad de materia prima disponible.

Actualmente, la empresa cuenta únicamente con el proceso de trituración del vidrio para la creación de arena. Dispone de un tamiz de corte cuya malla demora un día entero en cambiarse, por lo que no tamiza distintas granulometrías, lo cual limita los productos a los que se les puede aplicar la arena obtenida. En este momento, se obtiene el menor tamaño posible, adecuado para mezclarse con el cemento y producir hormigón. Desde sus inicios, Empresa A ha trabajado principalmente con una fábrica de baldosas que adquiere la mayor parte de su producción. La producción restante se divide en arena enviada a Florida, y por otro lado, se destina a la experimentación para explorar nuevas aplicaciones para la arena de vidrio.

Como ya se mencionó anteriormente, una de las posibles salidas de la arena de vidrio en el mundo es para la fabricación de mezclas asfálticas. En 2018 en Uruguay, la Empresa A junto con una empresa de construcción vial [27] llevaron a cabo ensayos incorporando la arena de vidrio a diferentes tecnologías de pavimentación. Tras varias pruebas, se identificó una especial compatibilidad entre el polvo de vidrio y un producto que se utiliza para sellar superficies y mejorar el aspecto de los pavimentos empleando la tecnología del Seal Coat. Se trata de una mezcla de asfalto, polímeros y cargas minerales, que permite mejorar la seguridad vial y preservar la vida útil del pavimento. Es en las cargas minerales que se presenta una

oportunidad para introducir la arena de vidrio, que podría incluso mejorar la resistencia al deslizamiento. El producto sellador incorporando arena de vidrio fue utilizado en un primer tramo experimental en la ciudad de Trinidad. Dado los buenos resultados obtenidos en este ensayo se continuó analizando la posibilidad de incorporar la arena de vidrio en el Seal Coat.

Uno de estos estudios es el “Seal Coat con polvo de vidrio para mejorar la resistencia al deslizamiento” [28] realizado en 2022. En el mismo se comparan diferentes formulaciones de Seal Coat cambiando su agregado mineral, se evalúan las propiedades de cada una y se concluye que el polvo de vidrio tanto fino como grueso mantiene o mejora los niveles de fricción y de coeficiente de resistencia al deslizamiento. Esto asegura que se puede sustituir parte del producto por arena de vidrio sin comprometer su funcionalidad.

Hoy en día, Empresa A tiene capacidad de procesar más de 8 ton/mes de envases en su planta, transformando el 98% de su materia prima en arena de vidrio, con una pérdida del 2%. Esto significa que, de las 8 ton de envases que podría procesar, se obtendrían 7,84 ton de arena de vidrio. Sin embargo, la empresa trabaja al 50% de su capacidad debido a que no hay demanda suficiente para aumentar la producción. A diferencia de los países de referencia mencionados en este informe, la baja tasa de recuperación de envases alcanzada por el antiguo Plan de Gestión de Envases sugiere que en Uruguay la logística inversa aún no se encuentra suficientemente desarrollada, lo que puede incidir en que las empresas no prioricen el reciclaje de vidrio [10]. Sucede también que incluso las empresas que sí deciden reciclar, esperan que el proceso sea lo menos costoso posible o hasta gratuito, buscando simplemente donar sus envases a empresas como Empresa A. Lo que muchas veces no se tiene en cuenta es que la gestión del reciclaje de los envases también conlleva costos, por lo que la fundadora de la Empresa A cobra por recibir y procesar los envases que acepta, es decir, no recibe “donaciones” de vidrio. Aunque parecería obvio pagar por dicho proceso, no es común que las empresas destinen dinero a dicha gestión, ya que no es una prioridad para ellas.

Además, Empresa A enfrenta un desafío logístico relacionado con el transporte, ya que, al operar con una única planta de triturado ubicada en Montevideo, le resulta complicado llegar a los departamentos más distantes de la capital.

Es por eso que la empresa está en constante experimentación para lograr obtener productos de mayor valor agregado, pues la arena es muy económica y su precio suele ser inferior al de la arena de vidrio. Al desarrollar productos con mayor valor, podría equilibrar los costos de sus procesos y aumentar su producción. Desde hace varios años, la empresa está investigando la posibilidad de tratar los residuos de vidrio de manera específica para utilizarlos como medio de filtración de agua. Este enfoque podría incrementar el valor agregado del producto y compensar el costo inicial de recepción de residuos. El proyecto ha sido aprobado y este año se implementará un piloto de un filtro de tamaño piscina para investigación y desarrollo.

Actualmente, Empresa A no podría manejar la cantidad de vidrio que se planea recuperar con el Plan Vale, lo que hace necesario encontrar una solución práctica para su gestión. El manejo del vidrio es complejo, ya que es un material voluminoso, pesado, peligroso y difícil de transportar. Dado que el Plan Vale busca recuperar residuos de vidrio en todo el país, es

fundamental que el tratamiento de estos se realice en una ubicación estratégica. Por lo tanto, se planteó como objetivo definir la ubicación, el diseño y la distribución de una nueva planta de trituración de vidrio que pueda recibir y transformar los envases recolectados por el Plan Vale.

3. Problemática

Dado el contexto global y nacional, el objetivo de este trabajo es ofrecer una alternativa viable para absorber las cantidades de vidrio que se recolectarán en el marco del Plan Vale. Se consideró que la alternativa de triturar el vidrio en Uruguay es la más pertinente para el país, ya que es una práctica que ya se implementa con éxito. Al ser un proceso probado y operativo a nivel local, está demostrado que funciona y que se adapta a las necesidades y capacidades actuales, lo que la convierte en una opción más viable y realista. Además, esta alternativa presenta la ventaja adicional de sustituir el uso de arena natural, cuya extracción también genera impactos negativos en el medio ambiente.

Entre otros aspectos, una gran motivación para elegir este tema y desarrollar el proyecto es la oportunidad de contribuir a la sociedad uruguaya y al cuidado del medio ambiente. Además, considerando que el Plan Vale está próximo a implementar el SDR en el país, esta es una cuestión relevante de la actualidad, y por lo tanto es el momento oportuno para contribuir y apoyar con este proyecto.

Por lo tanto, el objetivo consistirá en encontrar la ubicación, diseño y distribución de una nueva planta de triturado de vidrio para poder recibir y transformar todos los envases recolectados por el Plan Vale.

4. Ubicación

4.1 Modelo matemático

Para determinar la ubicación óptima de la planta, se desarrolló un modelo matemático de optimización.

El modelo elaborado se enfoca en encontrar la ubicación de N plantas industriales, sus capacidades y la distribución de materiales entre proveedores, plantas y clientes óptimos, con el propósito de minimizar los costos de transporte. La formulación del mismo incluye una función objetivo principal y un conjunto de restricciones lineales que limitan las soluciones posibles según la disponibilidad de recursos y las capacidades de los clientes.

Para estudiar diferentes escenarios utilizando el mismo modelo, se representó la cantidad de plantas a ubicar como un parámetro variable. Sin embargo, el caso principal buscará determinar la ubicación óptima de dos plantas. Dado que se trata de una situación que impacta a nivel nacional, con proveedores distribuidos en todos los departamentos, se consideró que dividir la producción entre dos plantas podría facilitar la cobertura de todo el país, reduciendo la distancia entre proveedores y clientes, y minimizando tanto los costos de transporte como los tiempos de distribución.

Se investigaron casos similares, como el de las plantas clasificadoras que operan actualmente en Uruguay, observándose que es razonable suponer que estas plantas realizan entregas semanales a las plantas de fabricación de vidrio. Por lo tanto, para el modelo se definió un horizonte de tiempo de una semana. Por otro lado, dado que la mayoría de los clientes reciben arena natural diariamente, se optó por aplicar el mismo esquema, con entregas diarias a los distintos clientes. Así, el horizonte común de planificación es semanal, y la solución obtenida representa la logística correspondiente a una semana.

A continuación se presenta la formulación del modelo utilizado.

4.1.1 Formulación modelo matemático

Conjuntos:

I: Potenciales plantas.
P: Proveedores de envases de vidrio residuales.
B: Clientes.

Parámetros:

Cv: Costo de transportar una tonelada de envases de vidrio residuales por un km.

Ca_b: Costo de transportar una tonelada de arena de vidrio por un km para el cliente b.[1]

dp_{ip}: Distancia entre los proveedores p y las posibles ubicaciones de las plantas i en km.

db_{ib}: Distancia entre las posibles ubicaciones de las plantas i y los clientes b en km.

qp_p: Cantidad de envases de vidrio entregados por el proveedor p en toneladas semanales.

qb_b: Capacidad del cliente b en toneladas diarias de arena de vidrio.

T_i : Parámetro que evalúa diversos factores de la ubicación i . Los factores evaluados son: cantidad y estado de las rutas que se conectan con la ubicación i, cantidad de mano de obra disponible y cantidad de industrias instaladas.

N: Cantidad de plantas a instalar.

M: Parámetro denominado "número muy grande".

E: Eficiencia de la planta.

S: Parámetro que indica la frecuencia de entrega a los clientes. En este caso, como la arena de vidrio se entrega diariamente, los costos se multiplican por 5, lo que representa los días de la semana en los que opera la planta de arena de vidrio.

Variables de decisión :

x_i : Variable binaria que vale 1 si la planta se encuentra en la ubicación i y 0 en caso contrario.

y_i : Capacidad de la planta que se encuentra en la ubicación i en toneladas de envases de vidrio por semana.

z_{pi} : Variable binaria que vale 1 si el proveedor p se conecta con la planta que se encuentra en la ubicación i y 0 en caso contrario.

u_{bi}: Cantidad de arena de vidrio diaria enviada desde la planta que se encuentra en la ubicación i al cliente b.

Función Objetivo:

Minimizar los costos semanales asociados al transporte de envases y arena de vidrio. Se incluyen los costos del medio de transporte, las distancias, las cantidades a transportar y el parámetro T_i. Las primeras sumatorias reflejan los costos asociados al transporte de envases de vidrio, y las segundas, las correspondientes al transporte de arena de vidrio.

$$min \sum_{i \epsilon I} \sum_{p \epsilon P} Cv \cdot T_i \cdot dp_{ip} \cdot qp_p \cdot z_{pi} + \sum_{i \epsilon I} \sum_{b \epsilon B} Ca_b \cdot T_i \cdot db_{ib} \cdot S \cdot u_{bi}$$

Restricciones

Cantidad de plantas de procesado de vidrio a instalar

[1] Se desglosó el costo por cliente con el fin de facilitar análisis posteriores, en los que se evaluarán variaciones en el costo de transporte de la arena según cada cliente.

La suma de las ubicaciones de las plantas x_i debe ser igual a N, lo que nos asegura que haya exactamente N plantas.

$$\sum_{i \epsilon I} x_i = N \qquad (1)$$

Envío desde proveedor a planta

Un proveedor de envases de vidrio p puede enviar su materia prima a una única planta i. Se decidió realizarlo de esta manera ya que la entrega de un proveedor a una única planta hará que la logística del modelo sea más práctica.

$$\sum_{i \epsilon I} z_{pi} = 1, \ \forall\, p \in P \qquad (2)$$

Capacidad de la planta

La capacidad de la planta i (toneladas/semana) debe ser suficiente para recibir los envases de los proveedores que se conectan con la misma.

$$\sum_{p \epsilon P} qp_p \cdot z_{pi} = y_i \ , \forall\, i \in I \qquad (3)$$

Balance en planta

La cantidad de envases (ton) que entra a una planta debe ser equivalente a la cantidad de arena de vidrio (ton) que sale de ella, teniendo en cuenta una merma del 2% en la producción[2].

$$E \cdot \sum_{p \epsilon P} qp_p \cdot z_{pi} = \sum_{b \epsilon B} S \cdot u_{bi} \ , \ \forall\, i \in I \ (4)$$

Existencia de la planta

Los proveedores no pueden conectarse con una planta que no existe. Esta restricción asegura que si una planta no existe, no puedan existir conexiones con ella.

$$M \cdot x_i \geq \sum_{p \epsilon P} z_{pi} \ , \forall i \epsilon I \qquad (5)$$

Si x_i es 0 todos los z_{pi} son 0 por lo que ningún proveedor se conecta con la planta i . En caso contrario, la restricción no tiene efecto ya que M es un número muy grande.

Lo mismo se aplica para los clientes, que no pueden recibir arena de vidrio de una planta que no existe.

$$M \cdot x_i \geq \sum_{b \epsilon B} u_{bi} \ , \forall i \epsilon I \qquad (6)$$

[2] Entrevista personal con Ana Paula Demaria (fundadora de Arenas de Vidrio), reunión virtual, 19 de junio de 2024.

Capacidad máxima de los clientes

La cantidad de arena que se le entrega a cada cliente b debe ser menor o igual a su capacidad máxima.

$$qb_b \geq \sum_{i \epsilon I} u_{bi} \; \forall b \epsilon B \qquad (7)$$

En casos extremos, un cliente puede no recibir nada de arena ($u_{bi} = 0$), pero jamás podrá entregarse más de lo que demanda.

Restricciones de dominio de las variables

$$x_i \in \{0,1\}, \; \forall \, i \in I \qquad (8)$$

$$y_i \geq 0, \; \forall \, i \in I \qquad (9)$$

$$z_{pi} \in \{0,1\}, \; \forall p \epsilon P, \; \forall i \epsilon I \qquad (10)$$

$$u_{bi} \geq 0, \; \forall \, i \in I, \forall \, b \in B \qquad (11)$$

Formulación matemática

$$min \sum_{i \epsilon I} \sum_{p \epsilon P} Cv \cdot T_i \cdot dp_{ip} \cdot qp_p \cdot z_{pi} + \sum_{i \epsilon I} \sum_{b \epsilon B} Ca_b \cdot T_i \cdot db_{ib} \cdot S \cdot u_{bi}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \epsilon I} x_i = N \qquad (1)$$

$$\sum_{i \epsilon I} z_{pi} = 1, \; \forall \, p \in P \qquad (2)$$

$$\sum_{p \epsilon P} qp_p \cdot z_{pi} = y_i \, , \forall \, i \in I \qquad (3)$$

$$E \cdot \sum_{p \epsilon P} qp_p . \, z_{pi} = \sum_{b \epsilon B} S \cdot u_{bi} \, , \; \forall \, i \in I, \qquad (4)$$

$$M \cdot x_i \geq \sum_{p \epsilon P} z_{pi} \, , \forall i \epsilon I \qquad (5)$$

$$M \cdot x_i \geq \sum_{b \epsilon B} u_{bi} \, , \forall i \epsilon I \qquad (6)$$

$$qb_b \geq \sum_{i \epsilon I} u_{bi} \; \forall b \epsilon B \qquad (7)$$

$$x_i \in \{0,1\}, \; \forall \, i \in I \qquad (8)$$

$$y_i \geq 0, \; \forall \, i \in I \qquad (9)$$

$$z_{pi} \in \{0,1\}, \; \forall p \epsilon P, \; \forall i \epsilon I \qquad (10)$$

$$u_{bi} \geq 0, \; \forall \, i \in I, \forall \, b \in B \qquad (11)$$

4.1.2 Construcción del modelo

Para la construcción del modelo matemático en computadora, se utilizó GLPK (GNU Linear Programming Kit), una herramienta de software de código abierto diseñada para resolver problemas de programación lineal y programación entera mixta. Este software actúa como el motor de resolución, encargándose de procesar el modelo matemático y encontrar la mejor solución.

La implementación se llevó a cabo en Visual Studio Code, lo que facilitó la visualización y edición del modelo. Se creó un archivo con extensión .mod, que define el modelo matemático en GMPL (GNU Math Programming Language), el lenguaje de modelado compatible con GLPK.

A continuación, se generó un archivo de datos .dat, que contiene los valores específicos necesarios para resolver el modelo matemático descrito en el archivo .mod. Esta separación entre modelo y datos en GMPL, permite la reutilización del mismo modelo con diferentes conjuntos de datos, lo que mejora la flexibilidad y eficiencia del proceso.

En el documento de datos se incluyen los valores correspondientes a los conjuntos del problema, es decir, las ubicaciones de las plantas potenciales, los proveedores y los clientes. También contiene los parámetros necesarios para la resolución del modelo: los costos de transporte, las distancias, las capacidades, la cantidad de plantas a instalar y el parámetro T_i, que evalúa la conectividad y el estado de las rutas.

Una vez que el modelo y los datos están listos, se ejecuta el problema en la consola de la computadora, obteniendo la solución, que se almacena en un archivo .sol, el formato de salida de GLPK.

4.1.3 Validación del modelo

Luego de finalizar la construcción del modelo y realizar algunas pruebas básicas para comprobar su correcto funcionamiento, se decidió construir una serie de casos límite. El propósito de dichos casos es implementar el modelo con casos extremos, utilizando datos ficticios, en los cuales los resultados a obtener sean evidentes, para poder corroborar si efectivamente el modelo funciona correctamente.

Para estos casos límites se decidió trabajar con :

- 4 potenciales ubicaciones de plantas: UbicaciónM, UbicaciónC, UbicaciónR y UbicaciónA
- 4 clientes: ClienteM, ClienteC, ClienteR y ClienteA
- 4 proveedores : ProveedorM, ProveedorC, ProveedorR y ProveedorA

En cada departamento de potencial ubicación se encuentra uno de los clientes y uno de los proveedores. Por ejemplo en UbicaciónM, se encuentran el ClienteM y el ProveedorM.

En cada caso límite, lo que se buscó fue ir modificando los diferentes parámetros para poner a prueba su funcionamiento.

4.1.3.1 Caso límite 1

En el primer caso límite, se decidió colocar los proveedores equidistantes entre ellos a una distancia de 10 km, al igual que los clientes quienes se encuentran cada uno en una de las potenciales ubicaciones. La distancia entre el cliente y el proveedor que se encuentran en la misma ubicación se estableció de 1 km.

Para este primer caso, se decidió establecer el costo de transportar vidrio ($10.000 /ton.km) mucho más elevado que el costo de transportar arena ($1 /ton.km), esto debería generar que el modelo establezca las plantas más cerca de los proveedores que de los clientes, para así disminuir la trayectoria de transporte del vidrio y por ende su costo.

Además, se seleccionaron dos proveedores (ProveedorC y ProveedorR) que entregan 1.000 ton/semana de vidrio y otros dos (ProveedorM y ProveedorA) que entregan 10 ton/semana de vidrio. Esto debería hacer que las plantas se ubiquen en las ubicaciones de los proveedores que entregan una mayor cantidad, para disminuir el costo del transporte. Por otro lado, los 4 clientes poseen la misma capacidad (100 ton/día).

Con estos datos se corrió el modelo y se obtuvo que las plantas fueron ubicadas en UbicaciónC y UbicaciónR, donde se encuentran los proveedores que más vidrio entregan. Además, el ProveedorA, el ProveedorM y el ProveedorR se conectan con la planta ubicada en UbicaciónR, mientras que el ProveedorC lo hace con la planta de UbicaciónC, lo que también tiene sentido. Este primer punto nos permite constatar que se cumple la restricción sobre que un proveedor debe proveer a una única planta y que además estos no pueden entregar a ubicaciones en las que no haya plantas.

Luego, se observó que la planta de UbicaciónR tiene una capacidad de 1.020 ton/semana, lo que corresponde a la suma total del vidrio entregado por sus proveedores. Esto indica que se cumple con la restricción de capacidad de la planta. Desde esta planta se abastecen 99,9 ton/día al ClienteM y 100 ton/día al ClienteR.

Por otro lado, la planta en UbicaciónC tiene una capacidad de 1.000 ton/semana, que corresponde a la cantidad de vidrio recibido. Además, se constata que desde esta planta se suministran 95,9 ton/día al ClienteA, 0,08 ton/día al ClienteM y 100 ton/día al ClienteC.

Se observa que a los clientes ClienteC y ClienteR, quienes están más cercanos a las plantas de UbicaciónC y UbicaciónR, respectivamente, se les abastece con toda su demanda. El resto de la producción se distribuye entre los demás clientes, aunque en algunos casos no se logra satisfacer toda su capacidad, ya que esta distribución resulta ser la opción más económica en

términos de costos de transporte.

Además, se puede constatar que la planta de UbicaciónC, entrega en total 196 ton diarias, lo que corresponde a 980 ton semanales, lo que a su vez corresponde al 98% de lo que recibe (1.000 ton) y por ende de su capacidad. Para el caso de la planta en UbicaciónR sucede algo análogo. Esto permite ver que efectivamente se cumple el balance de la planta.

En los diagramas presentados los proveedores están representados por el color verde junto con sus iniciales (ProveedorA = P A), los clientes por el color amarillo y por sus inciales y las plantas por el color rojo.

Además, las flechas simbolizan el flujo de materiales (color gris para vidrio y color celeste para arena) y los tamaños de las figuras son una representación de las capacidades de los diferentes actores (proveedores y clientes).

Este criterio se mantiene para los siguientes casos límites presentados a continuación.

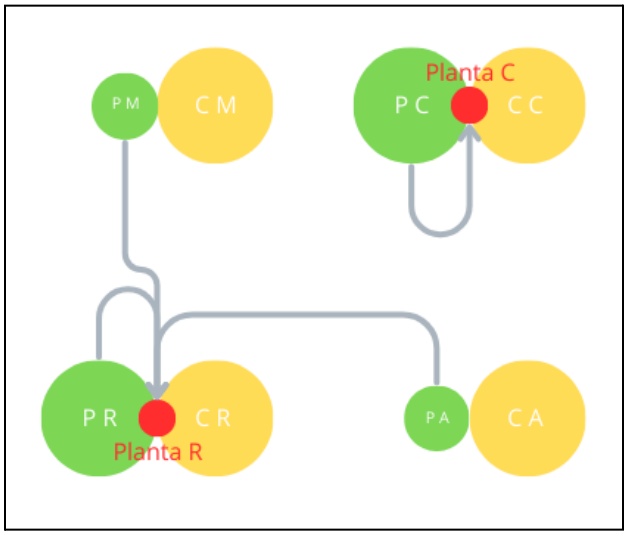

Figura 1: Conexiones entre proveedores y plantas obtenidos a partir del primer caso límite

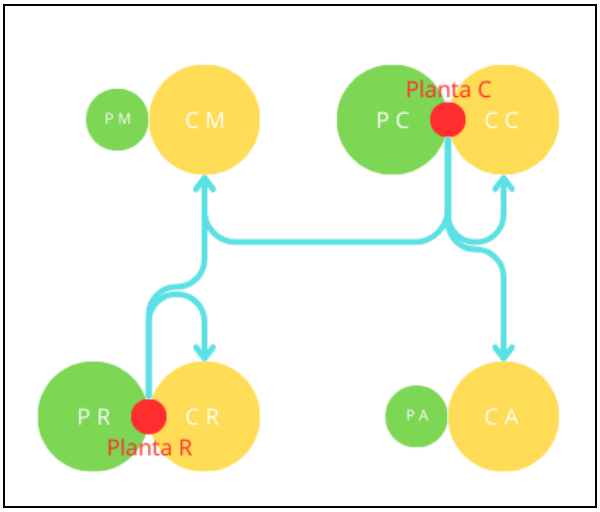

Figura 2: Conexiones entre plantas y clientes obtenidos a partir del primer caso límite

4.1.3.2 Caso límite 2

En este caso se trabajó con las mismas potenciales plantas, los mismos proveedores y los mismos clientes, todos equidistantes entre sí. Los costos de transportar arena y de transportar vidrio son los mismos ($1 /km.ton). En cuanto a las cantidades entregadas por cada proveedor, se estableció que el ProveedorA entregará 10.000 ton/semana y los demás 0 ton/semana. Análogamente con los clientes, el ClienteA puede recibir hasta 2.000 ton/día y los demás 0 ton/día. Ya que solamente el ProveedorA y el ClienteA entregan y pueden recibir material, el modelo debería devolver que se debe construir una planta en UbicaciónA con capacidad para procesar todo lo que se recibe y una planta en cualquier otro departamento, con capacidad nula, que no entregue arena ni reciba vidrio.

Con estos datos se corrió el modelo y se obtuvo que se ubica una planta en UbicaciónA y otra en UbicaciónR. La planta situada en la UbicaciónR tiene capacidad nula y la planta de UbicaciónA posee una capacidad que le permite tratar todo el vidrio recibido por el ProveedorA (10.000 ton/semana). Además, la planta de UbicaciónA le entrega 1.960 ton/día al ClienteA, lo cual tiene sentido ya que corresponde a las 10.000 ton recibidas por semana, divididas en los 5 días de la semana con una merma de un 2%.

Con este caso límite se ponen a prueba las restricciones de capacidad, ya que se confirma que si los clientes no tienen demanda, no se les va a entregar nada y que si los proveedores no ofrecen nada, no se los va a conectar con ninguna planta.

4.1.3.3 Caso límite 3

Para el tercer caso, se trabajó nuevamente con las mismas 4 ubicaciones, 4 proveedores y 4 clientes. Sin embargo, se introdujo una variación en las distancias entre los proveedores y las

ubicaciones. Se ubicó al ProveedorC a 10 km de todos las potenciales ubicaciones, mientras que los otros tres proveedores se encuentran a 30 km entre sí. La misma distribución de distancias se aplicó para los clientes. Además, se estableció que todos los proveedores suministren la misma cantidad (10 ton/semana) y que cada cliente reciba uniformemente (hasta 2 ton/día).

Es importante destacar que, en este caso, el costo de transporte del vidrio es igual al costo de transporte de la arena, y el parámetro T_i, se mantuvo constante en todos los escenarios analizados.

El objetivo de este caso es analizar cómo las distancias entre los proveedores y las ubicaciones influyen en las decisiones del modelo y si efectivamente funcionan de manera coherente.

Se espera que el modelo seleccione una planta en UbicaciónC, al ser el punto más cercano a todos los proveedores y clientes. Esta planta deberá procesar envases provenientes de tres departamentos, siendo UbicaciónC uno de estos. Adicionalmente, se espera una segunda planta, ubicada en cualquiera de las otras tres ubicaciones, que se encargue exclusivamente del vidrio generado en la ubicación donde se localiza.

Al ejecutar el modelo con estos datos, se obtuvieron los resultados esperados. En primer lugar, se instala una planta en UbicaciónC con una capacidad de 30 ton/semana, como estaba previsto, y otra planta en UbicaciónR con una capacidad de 10 ton/semana.

La planta de UbicaciónC recibe vidrio de tres proveedores: ProveedorA, ProveedorM y ProveedorC, mientras que la planta de UbicaciónR recibe exclusivamente del ProveedorR. Esto confirma que las capacidades de las plantas corresponden exactamente con la cantidad de vidrio que cada una debe procesar.

En cuanto a la distribución, el modelo determina que la planta de UbicaciónC entrega 1,88 ton/día al ClienteA, 2 ton/día al ClienteM y 2 ton/día al ClienteC. Por otro lado, la planta de UbicaciónR entrega 1,96 ton/día al ClienteR.

Estos resultados tienen total sentido, ya que la planta de UbicaciónR destina toda su capacidad al cliente más cercano, el ClienteR. Por su parte, la planta de UbicaciónC satisface por completo la demanda del ClienteC, su cliente más cercano, y distribuye el resto entre los otros dos clientes. De este modo, logra satisfacer completamente la demanda del ClienteM, pero no toda la del ClienteA.

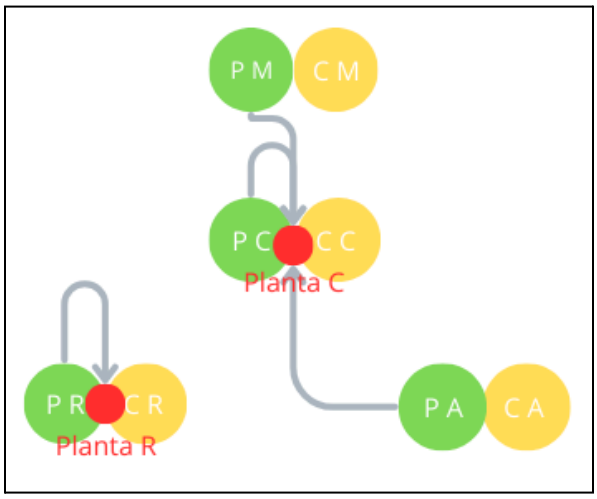

Figura 3: Conexiones entre proveedores y plantas obtenidas a partir del tercer caso límite

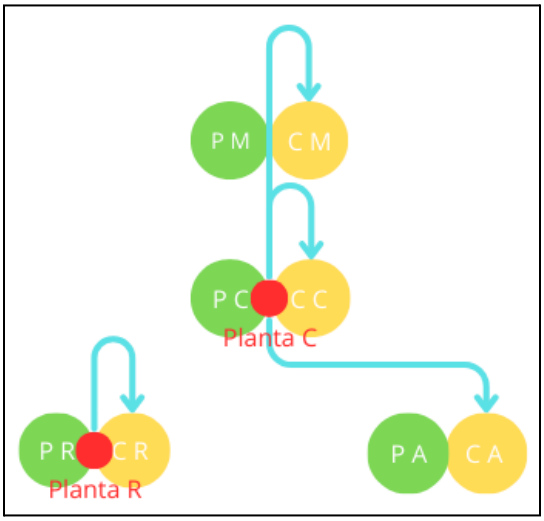

Figura 4: Conexiones entre plantas y clientes obtenidas a partir del tercer caso límite

4.1.3.4 Caso límite 4

Para el cuarto caso límite, se decidió variar el parámetro T_i para verificar si se comporta según lo esperado. Se partió nuevamente de la configuración inicial, en la que los cuatro proveedores se encuentran equidistantes (a 10 km) de los clientes. Cada proveedor aporta 10 ton de vidrio por semana, mientras que cada cliente tiene una capacidad de hasta 2 ton diarias.

En este escenario, se asignó al parámetro T_i un valor de 1 para UbicaciónA y UbicaciónC, y de 0,5 para UbicaciónM y UbicaciónR. Esto implica que, en la función objetivo, UbicaciónM y UbicaciónR serán favorecidos, ya que sus costos de transporte se reducirán a la mitad. Por lo tanto, si el modelo funciona correctamente, debería ubicar las plantas en UbicaciónM y

UbicaciónR, donde los costos de transporte serán significativamente menores.

Al ejecutar el modelo, los resultados confirman las expectativas: se ubica una planta en UbicaciónM y otra en UbicaciónR, ambas con una capacidad de 20 ton semanales. La planta de UbicaciónM recibe vidrio de ProveedorM y ProveedorC y la planta de UbicaciónR se abastece de ProveedorR y ProveedorA.

En cuanto a la distribución de la producción: la planta de UbicaciónM entrega 2 ton diarias al ClienteM y 1,92 ton diarias al ClienteC. Este comportamiento es consistente con el objetivo del modelo, que prioriza satisfacer la demanda del cliente más cercano (ClienteM) para minimizar costos de transporte, distribuyendo el remanente al ClienteC. De forma análoga, la planta de UbicaciónR suministra 2 ton diarias al ClienteR y 1,92 ton diarias al ClienteA, siguiendo la misma lógica.

Este análisis demuestra que el parámetro T_i opera como se esperaba: una reducción en su valor beneficia directamente a las ubicaciones correspondientes, promoviendo ubicaciones estratégicas que optimizan los resultados.

4.1.3.5 Caso límite 5

Para el caso límite número 5, se decidió variar el parámetro de la cantidad de plantas a construir. Para esto, se tomaron los mismos datos que en el caso inicial, 4 proveedores que entregan 10 ton por semana y 4 clientes equidistantes que pueden recibir 2 ton por día (a 10 km de distancia). A su vez, se le asignó a todos el mismo valor del parámetro T_i (1) y el costo de transportar arena es el mismo que el costo de transportar vidrio ($1 /ton.km).

En este caso, se varió la cantidad de plantas a construir de 2 a 4, lo que debería suceder es que el modelo sitúe una planta en cada ubicación de los proveedores y clientes, la cual recibirá la materia prima de ese proveedor y entregará a ese cliente ya que es lo más conveniente en cuanto a costos de transporte.

Al correr el modelo, se obtiene efectivamente que se instalan 4 plantas, una en cada ubicación, las cuales tienen una capacidad de 10 ton/semana para poder procesar lo que le entrega cada proveedor. Los proveedores de cada ubicación están conectados a su planta correspondiente.

Además, cada planta le entrega 1,96 ton/día al cliente de su ubicación, lo cual corresponde a las 10 ton/semana, divididas en los 5 días de la semana, con una merma de 2%.

Con este caso límite, se prueba que el parámetro de la cantidad de plantas funciona correctamente y que si se quisiera extrapolar este modelo a un problema con una mayor o menor cantidad de plantas, solamente se debe cambiar el valor del parámetro.

4.1.3.6 Caso límite 6

En este caso límite, se utilizó la misma configuración que en el escenario anterior: cuatro proveedores y cuatro clientes ubicados a distancias equidistantes, todos compartiendo el mismo valor del parámetro T_i. Sin embargo, se introdujo una modificación en el costo del transporte de materiales, estableciendo un valor significativamente más alto para el transporte de arena en comparación con el vidrio. Se decidió utilizar un costo de transporte de arena de $1.000 /ton.km mientras que el costo de transportar vidrio es de $1 /ton.km. Además, se modificaron las cantidades que puede recibir cada cliente: el ClienteM y ClienteC pueden recibir 4 ton/día y el ClienteA y ClienteR pueden recibir 0 ton/día.

Por lo tanto, al hacer estas modificaciones, lo que se espera es que el modelo ubique las dos plantas cerca de los clientes que pueden recibir arena, para lograr así minimizar las distancias de transporte de la arena aumentando las distancias de transporte del vidrio.

Efectivamente al correr el modelo, se obtuvo una planta en UbicaciónM y otra en UbicaciónC (los departamentos de los clientes que pueden recibir arena) ambas con una capacidad de 20 ton/semana ya que cada una recibe vidrio de dos proveedores que entregan 10 ton/semana.

Además, la planta de UbicaciónM le entrega 3,92 ton/día al ClienteM y la planta de UbicaciónC le entrega la misma cantidad al ClienteC.

Con este caso límite se evaluó si la variación en los precios del transporte de la arena tenían un impacto lógico en el modelo. Como se pudo constatar, si estos costos aumentan, el modelo acerca las plantas a los clientes, para lograr así minimizar los trayectos de la arena.

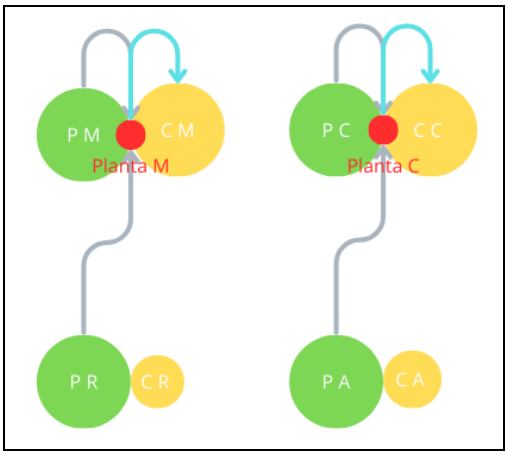

Figura 5: Conexiones entre proveedores, plantas y clientes obtenidas a partir del sexto caso límite

4.2 Relevamiento y generación de datos

En cuanto a la búsqueda de los datos que completarían el modelo y le darían el sentido para el cual se creó, la atención está puesta en los parámetros. Los mismos presentan distintos niveles de certeza, ya que algunos parámetros son constantes y pueden determinarse de manera fija y exacta, mientras que otros son estimados, lo cual trae siempre un cierto nivel de incertidumbre.

4.2.1 Vidrio generado

Para calcular la cantidad producida por cada proveedor, se promediaron los tres datos del vidrio hueco vertido en el país en los años 2019, 2020 y 2021, según el *Análisis de capacidades para el reciclado del vidrio en Uruguay* [12]. Una alternativa podría haber sido tomar únicamente el dato del 2021, el cual sería el más reciente, pero como en dicho año estaba en curso aún la pandemia del Covid-19, un promedio de los tres años pareció lo más adecuado. Como en el caso de este estudio los proveedores son los departamentos, dicha cantidad de vidrio hueco vertido se dividió por la población total de Uruguay, y luego se le hizo el producto por la población de cada departamento. De esta forma, con la consideración de que el consumo de vidrio de cada habitante es el mismo, se obtiene el vidrio hueco vertido por cada departamento, es decir, lo que ofrece cada proveedor. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 1.

Tabla 1: Vidrio hueco vertido por departamento

Departamento	Total Habitantes	Toneladas anuales vertidas por departamento	Porcentaje
Montevideo	1.383.965	7.476	38,9%
Artigas	73.561	397	2,1%
Canelones	618.419	3.340	17,4%
Cerro Largo	89.654	484	2,5%
Colonia	132.118	714	3,7%
Durazno	58.954	318	1,7%
Flores	26.467	143	0,7%
Florida	69.325	374	2,0%
Lavalleja	58.413	316	1,6%
Maldonado	199.822	1.079	5,6%
Paysandú	120.327	650	3,4%
Río Negro	58.708	317	1,7%
Rivera	109.460	591	3,1%
Rocha	74.393	402	2,1%
Salto	134.537	727	3,8%
San José	120.050	648	3,4%
Soriano	83.487	451	2,4%
Tacuarembó	92.788	501	2,6%
Treinta y Tres	50.467	273	1,4%

4.2.2 Demanda de los clientes

En el otro extremo de la red de conexión se encuentran los posibles clientes interesados en consumir la arena de vidrio producida.

El primer contacto se estableció con el cliente actual de Empresa A, el cual ya utiliza polvo de vidrio en sus productos. Se trata de un fabricante de baldosas, que incorpora la arena de vidrio para elaborar el hormigón requerido; identificado en este proyecto como Baldosa 1. Al ya utilizar arena de vidrio como sustituto, Baldosa 1 pudo proporcionar los datos exactos de consumo mensual de la misma.

Al tener evidencia de que la arena de vidrio se utiliza de manera eficaz para la producción de baldosas, se decidió contactar a otros clientes de este rubro. Una de las diferentes empresas contactadas mostró gran interés en incorporar arena de vidrio en su proceso de fabricación y proporcionó su consumo de arena natural mensual (Baldosa 2). El cálculo del posible consumo

de arena de vidrio de Baldosa 2 se esboza más adelante.

Luego, Empresa A brindó el contacto de otras dos empresas que han realizado pruebas para incluir arena de vidrio como materia prima de sus productos en un futuro. Las mismas se dedican a la fabricación de ladrillos ecológicos y bloques (Bloque 1 y Bloque 2). De incorporar la arena de vidrio, la empresa Bloque 1 utilizaría aproximadamente 70 m³ mensuales, equivalente a 112 toneladas, ya que los ladrillos que fabrica estarían compuestos en un 70% de por este material, con una producción mensual de 160 toneladas de ladrillos. Por su parte, Bloque 2 consumiría 4 kg de arena de vidrio por bloque y actualmente produce alrededor de 20.000 bloques mensuales, por lo tanto, esto equivaldría a un consumo mensual de 80 toneladas. Estos datos fueron proporcionados por ambas empresas.

Además, con el objetivo de mostrar el amplio rango de posibles aplicaciones de la arena de vidrio, se contactó a grandes empresas uruguayas especializadas en la producción de asfalto y hormigón, cuyos niveles de operación son significativamente mayores que los de las pequeñas empresas de baldosas o bloques. Actualmente, estas compañías emplean exclusivamente arena natural, pero reconocen que, a nivel internacional, ya se han probado y aplicado exitosamente mezclas que incluyen vidrio como agregado tanto en el asfalto como en el hormigón. Incluso, algunas de las diferentes empresas contactadas ya están destinando recursos a la investigación del uso de arena de vidrio como sustituto para sus productos, y varias de ellas ya han realizado pruebas.

Si bien no se realizó un estudio exhaustivo para identificar a todas las empresas que utilizan arena en Uruguay, los casos relevados ofrecen una referencia inicial sobre los volúmenes de consumo y los posibles usos del polvo de vidrio. Esto sugiere una oportunidad para explorar e invertir en este material como alternativa sostenible. Cabe destacar que existen otros posibles clientes que no fueron contemplados en esta muestra, lo que indica un potencial aún mayor para el desarrollo de este mercado.

Afortunadamente, las empresas que ya se han manejado con arena de vidrio pudieron brindar el consumo diario directamente. Por otro lado, para los clientes de hormigón y asfalto, el consumo de arena de vidrio se calculó en base a informes realizados en países más avanzados en el tema, donde se concluye que la arena de vidrio puede reemplazar el agregado fino hasta en un 25% para el hormigón, y hasta en un 10% para las mezclas asfálticas, sin alterar negativamente las propiedades de los productos (incluso mejorándolas en algunos casos).

Para el caso de las empresas que fabrican hormigón, se obtuvieron los datos del consumo de arena mensual (11.000 ton/mes), la cual representa el agregado fino. Por lo tanto, el consumo de arena de vidrio que se podría destinar para el rubro se calculó como el 25% del mismo. Este consumo corresponde a 3 plantas (Hormigón 1, Hormigón 2 y Hormigón 3), siendo Hormigón 1 la de mayor capacidad. De igual manera, se utilizó el mismo porcentaje para el cálculo del consumo mensual de arena de vidrio por parte de Baldosa 2.

Para la mezcla asfáltica, los agregados representan el 90% de la mezcla, donde se dividen a la mitad aproximadamente, los agregados finos de los gruesos. Por consiguiente, el porcentaje a reemplazar con arena de vidrio en una mezcla asfáltica es del 4,5% $(90\% * 50\% * 10\%)$, como se ilustra en la Figura 6. Las empresas del rubro asfalto brindaron información sobre su producción mensual, lo que permitió calcular la cantidad de agregado fino necesaria.

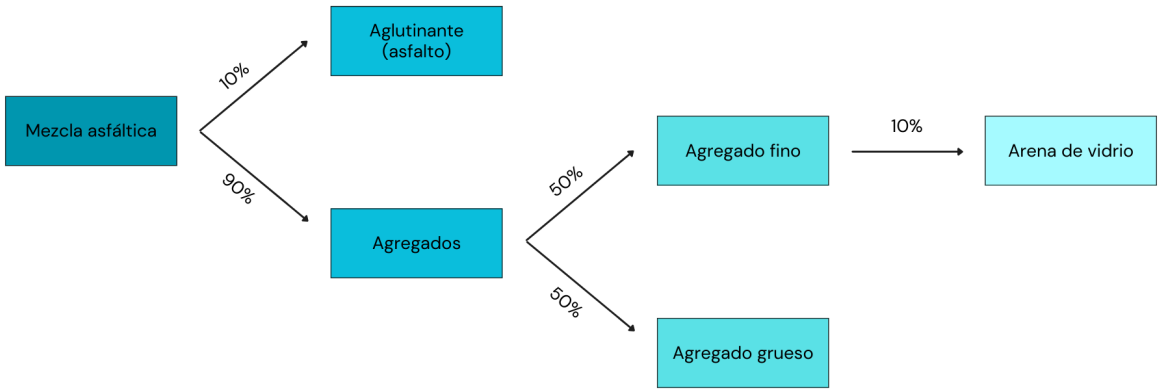

Figura 6: Distribución porcentual de los componentes de una mezcla asfáltica

La lista de clientes y su consumo diario de arena de vidrio se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Consumo diario posible de arena de vidrio de los clientes

Cliente	Consumo diario de arena de vidrio (ton/día)
Baldosa1	2,5
Baldosa2	1,8
Bloque1	5,1
Bloque2	3,6
Hormigón1	62,5
Hormigón2	31,3
Hormigón3	31,3
Asfalto1	9
Asfalto2	3,6
Asfalto3	6,3
Asfalto4	2,2
Asfalto5	8,1
Total	167,3

A modo de aclaración, las cantidades representadas en la Tabla 2 estiman el consumo diario máximo posible de cada cliente, no son demandas reales de arena de vidrio ya que dicho material no es utilizado actualmente por todos los clientes.

En la Figura 7 se muestran en detalle las ubicaciones de los proveedores y los clientes involucrados en el problema.

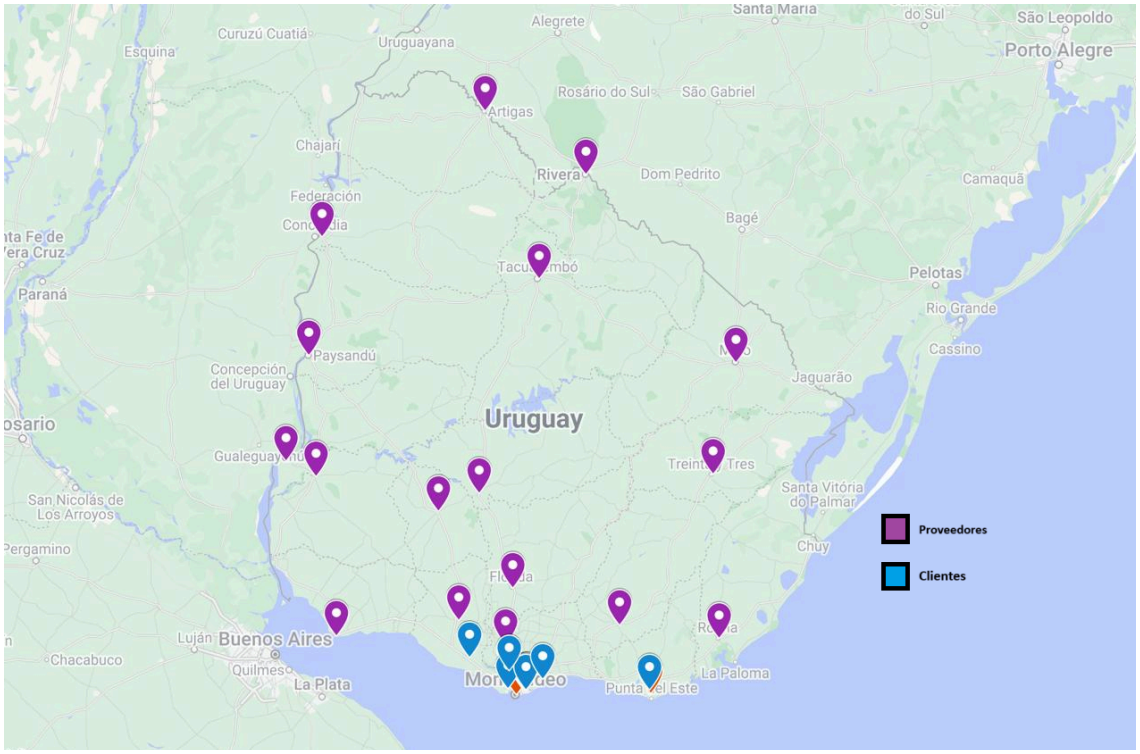

Figura 7: Proveedores y clientes del problema matemático

4.2.3 Distancias

El ejemplo más claro de parámetro constante son las distancias, tanto desde los proveedores hacia las plantas, como desde las plantas hacia los clientes. Teniendo las ubicaciones exactas de los clientes, y asignando la ubicación de la capital de cada departamento a los respectivos proveedores, dichas distancias se obtienen de Google Maps y quedan fijas. Los datos de estas distancias se pueden observar en las Tabla 33 : Distancias entre departamentos en km y Tabla 34 : Distancias entre clientes y departamentos.

Luego, hay otros parámetros que no presentan una única manera de ser definidos, por lo que a cada uno se le aplicó una metodología de estimación acorde.

4.2.4 Costos de transporte

Para calcular el costo de transporte tanto de los envases como de la arena, se utilizó como referencia un camión mediano de una empresa habilitada para transportar residuos en el país. Esta empresa proporcionó el dato del precio estándar por kilómetro recorrido, que es de $58 /km. Los camiones medianos tienen una capacidad de 28 m³ y pueden transportar hasta 14 ton de carga útil.

En el caso de los envases, se determinó para el acopio dentro del camión el uso de bolsones de 1 m³ (big bags), con un peso aproximado de 0,37 ton por bolsón. Se tomó esta decisión siguiendo la recomendación de los expertos en el tema[3], quienes observan mayor comodidad con dicha práctica. Según la capacidad del camión, el factor limitante sería el volumen, ya que en los 28 m³ disponibles se podrían cargar 28 bolsones, equivalentes a 10,4 ton, un peso menor a la capacidad máxima de 14 ton. En este caso, dividiendo el precio entre las 10,4 ton que se pueden transportar, el costo de transporte del vidrio sería de **$5,6 /km.ton**.

En cuanto a la arena, el límite en este caso es el peso. Dado que la densidad de la arena es de 1,6 kg/L, los 28 m³ equivaldrían a 44,8 ton, lo cual excede ampliamente la capacidad máxima de 14 ton del camión. Por lo tanto, transportando las 14 ton máximas de arena de vidrio, el costo sería de **$4,1 /km.ton**. Para este estudio inicial, se optó por aplicar un costo de transporte de arena uniforme para todos los clientes. En análisis posteriores, se explorará la diferenciación entre clientes mediante la asignación de costos de transporte específicos para cada caso.

4.2.5 Conectividad y estado de rutas

Por último, el parámetro que quizás involucró más toma de decisiones y estimación fue el multiplicador T_i. Este parámetro se creó para incluir de forma cuantitativa factores cualitativos que influyen en el modelo, específicamente en las posibles ubicaciones de las plantas (i), es decir, los departamentos del país. Estos factores son la conectividad, la industrialización y la mano de obra de cada departamento. Cada factor fue evaluado individualmente, asignando un valor a cada ubicación, que varía entre 0,5 (mejor caso) y 1 (peor caso). Esta escala se debe a que T_i actúa como coeficiente en la función objetivo, afectando el costo de transporte en la red. Como el objetivo es minimizar el costo, multiplicar por un valor menor a 1 representa una reducción en los costos. Posteriormente, se promediaron los valores de los tres factores para obtener un valor total por departamento.

La conectividad se dividió en tres subfactores:

1. La cantidad de corredores principales y rutas primarias que atraviesan el departamento i
2. La cantidad de capitales con las que conecta el departamento i
3. El estado de las rutas que pasan por el departamento i

La información sobre la conectividad fue recolectada del Visualizador de Indicadores Activos Viales (VIAV) [29] desarrollado por la Dirección Nacional de Vialidad Uruguaya. Esta herramienta cuenta con mapas del país, filtros y botones interactivos, permitiendo acceder a toda la información relacionada con la red vial en tiempo real.

La industrialización y la mano de obra fueron más sencillas de estimar. Para la industrialización,

[3] Entrevista personal con Alessandro Garlati (CCO de Ecogestión), reunión virtual, 11 de Octubre de 2024.

se consideró la participación de cada departamento en el total de industrias PMG del país (ponderado por el tamaño de las industrias) [30]. Para la mano de obra, se utilizaron los datos del censo uruguayo de 2011 [31], filtrando por la población de entre 18 y 64 años de cada departamento, la cual representaría la fuerza laboral disponible. Para los tres factores, sus respectivos valores se normalizaron en un rango continuo de 0,5 a 1. Esto se logra calculando qué tan cerca está cada valor del mínimo, y luego ajustándolo para que quede dentro del rango definido por el mínimo (0,5) y el máximo (1). La normalización genera un rango continuo porque no solo se ajustan los valores extremos, sino también todos los valores intermedios de forma proporcional.

Los valores obtenidos para el parámetro T_i se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores del factor T_i para todos los departamentos

Departamento	Conectividad	Industrialización	Disponibilidad de mano de obra	Promedio
Artigas	0,9	1	0,98	0,96
Canelones	0,53	0,91	0,81	0,75
Cerro Largo	0,74	0,99	0,98	0,9
Colonia	0,74	0,97	0,96	0,89
Durazno	0,95	1	0,99	0,98
Flores	0,8	1	1	0,93
Florida	0,81	0,99	0,99	0,93
Lavalleja	0,79	1	0,99	0,93
Maldonado	0,76	0,98	0,95	0,9
Montevideo	0,66	0,5	0,5	0,55
Paysandú	0,77	0,98	0,97	0,91
Río Negro	0,79	1	0,99	0,93
Rivera	0,9	1	0,97	0,96
Rocha	0,89	1	0,98	0,96
Salto	0,83	0,99	0,96	0,93
San José	0,71	0,97	0,97	0,88
Soriano	0,7	1	0,98	0,89
Tacuarembó	0,87	1	0,98	0,95
Treinta y Tres	0,79	1	0,99	0,93

4.3 Resolución del modelo

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del modelo es determinar la ubicación óptima de dos plantas de producción de arena de vidrio, así como las conexiones más eficientes entre

proveedores, plantas y clientes, minimizando los costos de transporte.

El modelo fue resuelto utilizando GLPK, el cual permitió encontrar la mejor solución al problema de optimización planteado. Se elaboró un archivo .mod donde se describe el modelo matemático. Luego, se generó un archivo .dat donde se completaron los datos del problema. Finalmente, se ejecutó el modelo a través de la consola de la computadora para obtener los resultados de optimización. La solución se almacenó en un archivo .sol, el formato de salida de GLPK.

La solución obtenida consiste en establecer una planta en Maldonado con una capacidad de procesamiento de 37,5 ton/semana de envases de vidrio y otra en Montevideo con una capacidad de 362,5 ton/semana.

Además de determinar la ubicación óptima y las capacidades de las plantas, el modelo establece las conexiones más eficientes entre estas y sus proveedores. La planta de Maldonado recibe los envases de vidrio residuales de los departamentos de Lavalleja, Maldonado y Rocha, mientras que la planta de Montevideo procesa los envases provenientes del resto de los departamentos del país. Estas conexiones se ilustran en la Figura 8 y la Figura 9; en azul se muestran las rutas entre los proveedores y las plantas.

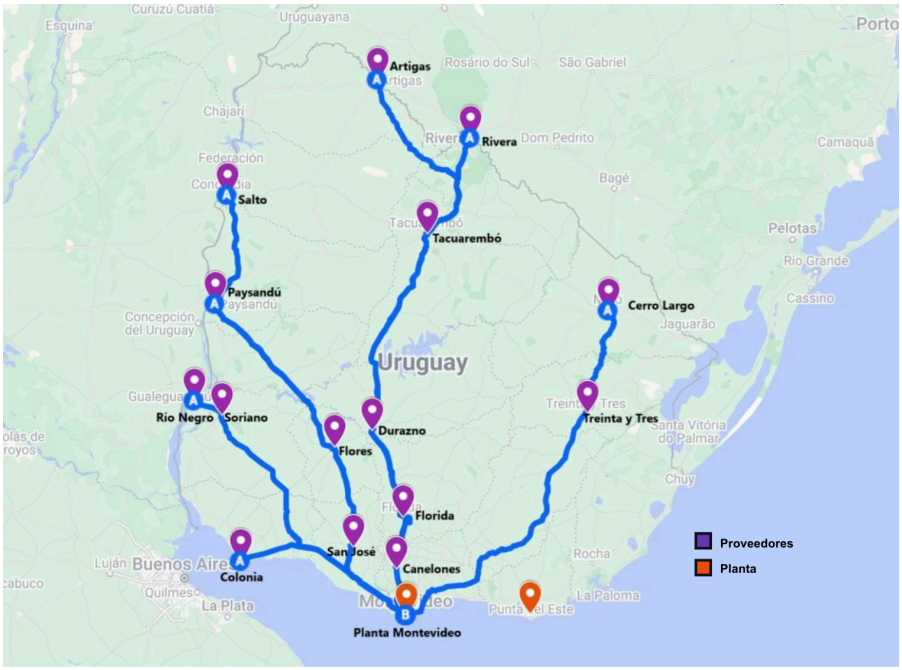

Figura 8: Conexiones entre proveedores y planta de Montevideo

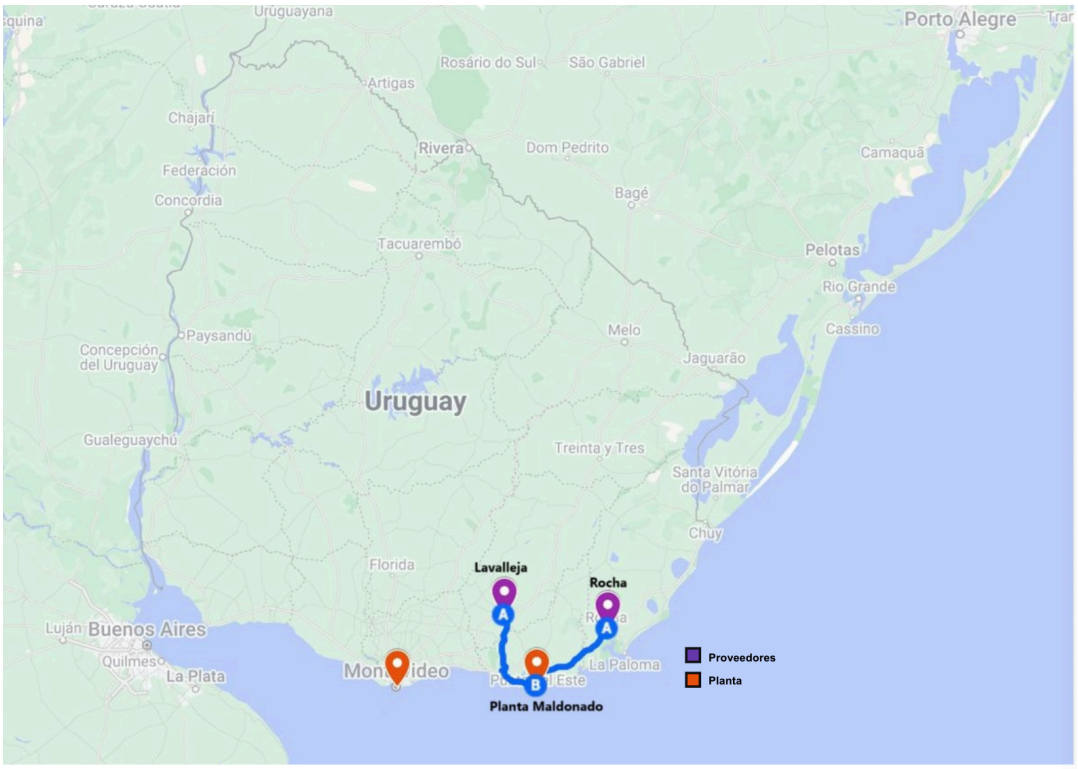

Figura 9: Conexiones entre proveedores y planta de Maldonado

Asimismo, el modelo especifica las conexiones óptimas entre las plantas y los clientes. En la Figura 10 se puede observar la ubicación de los posibles clientes y las plantas.

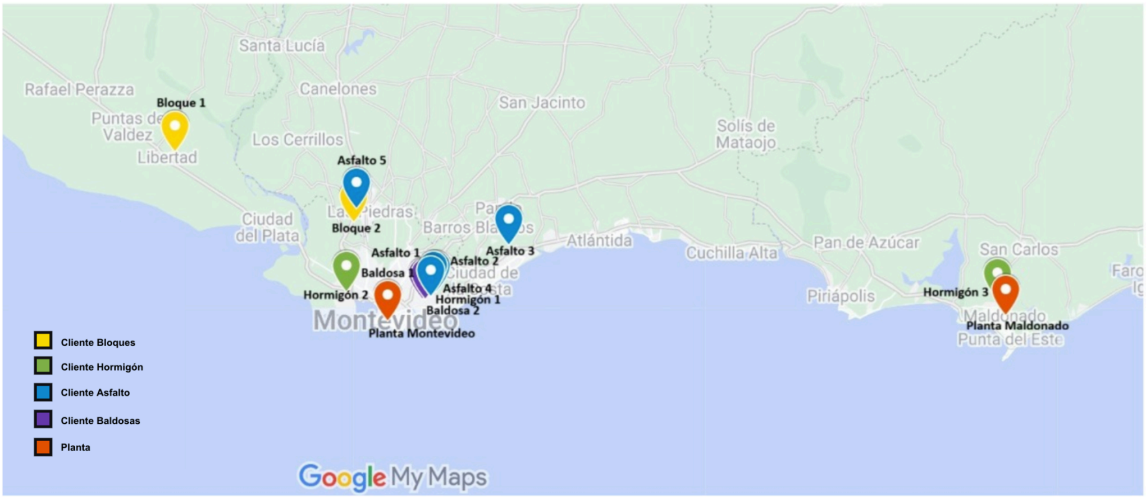

Figura 10: Ubicación de las plantas y los potenciales clientes

La solución del modelo define que la planta de Maldonado suministra 7,35 toneladas diarias de arena de vidrio a la planta de Hormigón 3, ubicada a solo 5 km de distancia. Esta conexión está claramente representada en la Figura 11. Sin embargo, se observa que este suministro no es suficiente para cubrir completamente la demanda de Hormigón 3, que alcanza las 31,3 ton diarias. Esto se debe a que, a nivel de costo de transporte, lo más conveniente es que la planta de Maldonado reciba vidrio residual solamente de los departamentos de Maldonado, Rocha y Lavalleja, sin embargo, este vidrio no es suficiente para cubrir la demanda de Hormigón 3.

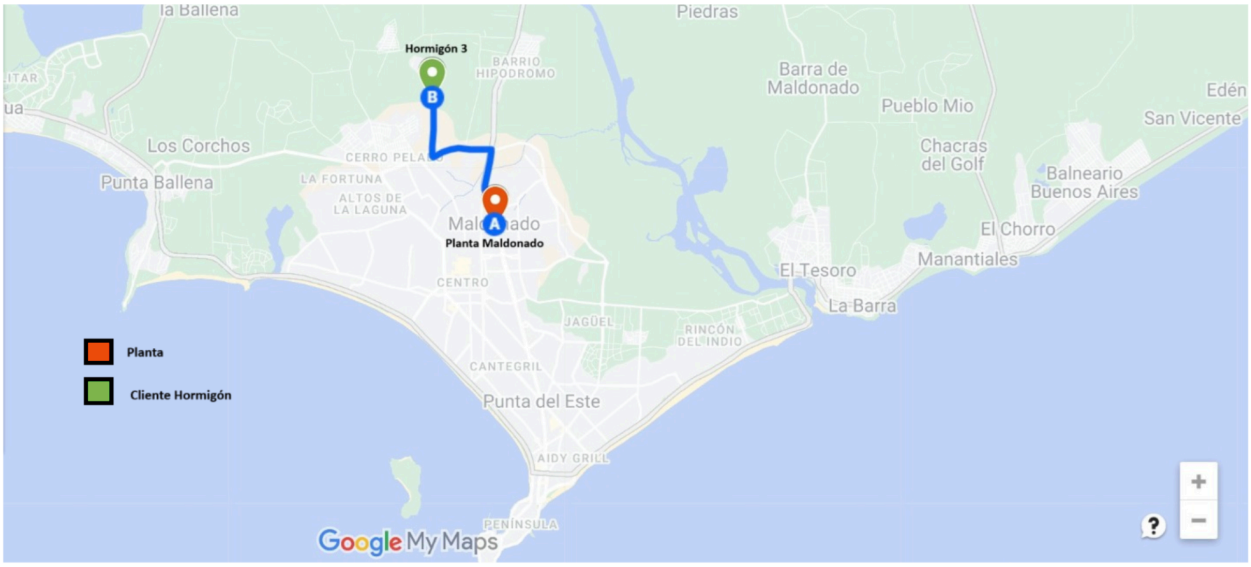

Figura 11: Conexión entre la planta de Maldonado y su cliente Hormigón 3

Por otro lado, la planta de Montevideo satisface por completo la demanda diaria de los siguientes clientes: Baldosa 1 con 2,5 ton/día, Baldosa 2 con 1,8 ton/día, Hormigón 1 con 62,5 ton/día y Asfalto 4 con 2,2 ton/día. Sin embargo, aunque entrega 2,05 ton diarias a la planta de Asfalto 1, no logra cubrir completamente su demanda. Esto sucede ya que Asfalto 1 se encuentra a mayor distancia de la planta, por lo que cubrir completamente su demanda implicaría un mayor costo de transporte de la arena. Las conexiones entre la planta de Montevideo y sus clientes se muestran en la Figura 12.

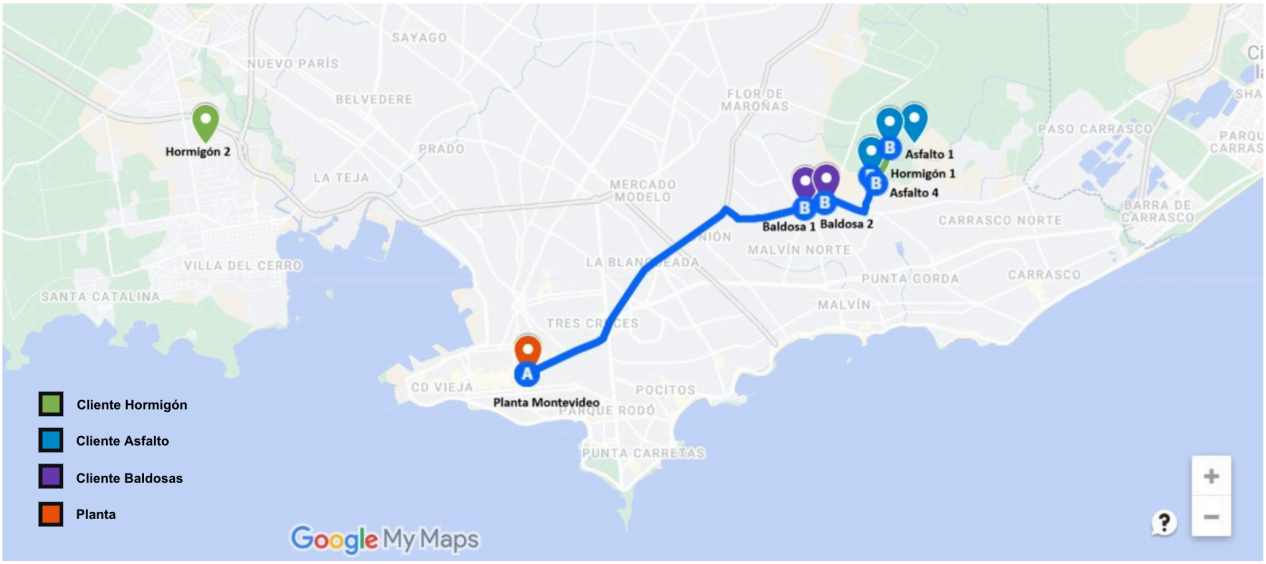

Figura 12: Conexión entre la planta de Montevideo y sus clientes

La respuesta del modelo es lógica, ya que ubica una planta en Montevideo, donde se concentran la mayoría de los clientes, y otra en Maldonado, cercana a un cliente importante. Además, la distribución dentro de Montevideo también resulta coherente, ya que se prioriza la entrega a los cinco clientes más cercanos.

Las distancias de estos clientes a la planta de Montevideo son las siguientes: Baldosa 1 está a 8 km, Baldosa 2 a 9 km, Hormigón 1 y Asfalto 4 a 11 km, y Asfalto 1 a 12 km. Es razonable que la planta no logre satisfacer completamente la demanda de Asfalto 1, ya que, al ser el cliente más distante, su transporte implica un costo mayor. La Figura 12 ilustra claramente la proximidad entre los clientes de la planta de Montevideo, lo que respalda la coherencia de la solución propuesta.

Además, se observa que los clientes Hormigón 2, Bloque 1 y 2, Asfalto 3 y 5 no reciben producto. Esto también resulta lógico, ya que son los clientes más alejados de la planta de Montevideo y no se genera producto suficiente para cumplir con la demanda de todos los clientes.

A continuación, en la Tabla 4 se presenta la lista de los clientes del problema, ordenados según su distancia a la planta de Montevideo. Se puede observar claramente la cantidad entregada a cada cliente, en comparación con su capacidad.

Tabla 4: Resultados del modelo

Cliente	Capacidad (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	9
Asfalto 4	2,2	2,2	11
Hormigón 1	62,5	62,5	11
Asfalto 1	9	2,05	12
Asfalto 2	3,6	0	12
Hormigón 2	31,3	0	12
Asfalto 5	8,1	0	23
Bloque 2	3,6	0	26
Asfalto 3	6,3	0	28
Bloque 1	5,1	0	55
Hormigón 3 (cliente abastecido desde planta Maldonado)	31,3	7,35	128

Finalmente, se observa que la solución obtiene un costo mínimo de transporte de $168.216 semanales.

4.4 Análisis de Sensibilidad

Luego de haber corrido el modelo con los datos reales y de haber obtenido un resultado, se decidió realizar un análisis de sensibilidad. Esto permitió estudiar cómo los cambios en los valores de los parámetros podrían afectar el resultado. De esta manera, se logró identificar qué parámetros son las que tienen mayor impacto en el resultado y evaluar la robustez del modelo.

4.4.1 Variación del costo de transporte

En primer lugar, se comenzó el análisis de sensibilidad variando los valores del costo del transporte de los materiales. En el modelo original, el costo del transporte de la arena es de $4,1/km.ton y el costo del transporte del vidrio es de $5,6/km.ton.

El primer estudio consistió en variar por igual el costo del transporte de la arena como el costo del transporte del vidrio, en estos casos, tanto para el aumento como para la disminución, lo único que cambia en el resultado del modelo es el costo total. No se constatan variaciones en la distribución ni en la ubicación de las plantas, lo que tiene sentido, ya que un aumento o disminución de los costos en igual medida para ambos materiales no debería modificar la lógica del modelo. Se llegó incluso a aumentar ambos costos de un 100%, obteniendo así un costo total de transporte de $336.433 semanales y a disminuir de un 90%, obteniendo así un costo de transporte de $16.822 semanales.

Luego, se continuó con la variación de los costos de transporte, pero esta vez de un material a la vez.

4.4.1.1 Aumento del costo de transporte del vidrio

Se comenzó a aumentar gradualmente el costo del transporte del vidrio. En este caso, se esperaba que, al llegar a cierto punto, el modelo reubicara alguna planta en una zona más central. En el modelo original, ambas están en el sur del país cercanas a los clientes. Por lo tanto, con el aumento del costo del transporte del vidrio, el modelo buscará reducir su recorrido y compensarlo con mayores distancias para la arena, optimizando así los costos.

Al ir aumentando dicho costo, se constató que la respuesta del modelo no cambia hasta llegar a un aumento del 90%, quedando en $10,6/km.ton. En este caso, el modelo ubica una planta en Montevideo como hacía previamente, pero ahora en vez de ubicar la segunda planta en Maldonado, lo hace en Tacuarembó. La planta ubicada en Tacuarembó tiene una capacidad de 31 ton y recibe los envases de vidrio provenientes de los departamentos : Artigas, Rivera y Tacuarembó. La arena generada en esta planta (6,08 ton/día) es enviada al cliente Asfalto 5, el cual es el más cercano al departamento de Tacuarembó (366 km).

Por otro lado, la planta de Montevideo tiene una capacidad de 369 ton y su distribución de arena es la siguiente :

- Baldosa 1 : 2,5 ton/día
- Baldosa 2 : 1,8 ton/día
- Hormigón 1 : 62,5 ton/día
- Asfalto 4 : 2,2 ton/día
- Asfalto 1 : 3,32 ton/día

Podemos constatar que la distribución de la planta de Montevideo sigue lo esperado ya que le sigue entregando a los cinco clientes más cercanos.

En este escenario, la planta de Montevideo tiene mayor capacidad que en el caso original ya que recibe envases de otros departamentos. Esta capacidad extra se la suma a Asfalto 1, lo que tiene sentido ya que es el único cliente al cual aún no le entrega su capacidad máxima en el caso original.

El costo total de transporte obtenido en este caso es de $309.580 semanales.

En este caso, la respuesta del modelo es la esperada ya que al aumentar el costo del transporte del vidrio, es conveniente disminuir y optimizar los trayectos de este material. Por esta razón es que ubica una planta en Tacuarembó que recibe el vidrio de los departamentos más alejados de Montevideo. Además, también era de esperarse que la planta de Tacuarembó le entregara a Asfalto 5 ya que de todos los clientes es el que más cerca está del departamento.

En la Figura 13 se pueden constatar las conexiones de esta nueva planta de Tacuarembó con sus proveedores y el cliente al que le entrega.

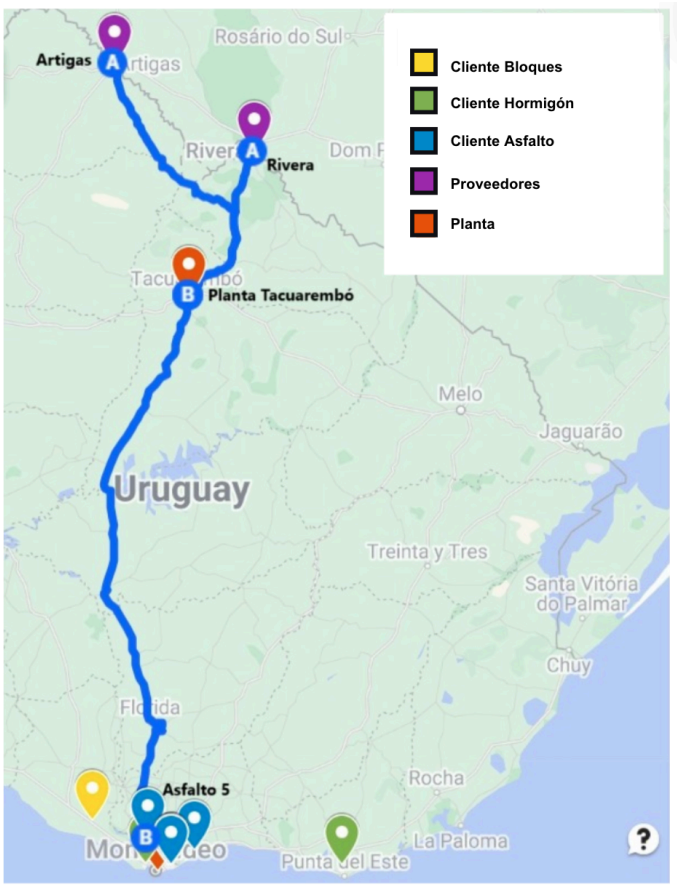

Figura 13: Conexión entre la planta de Tacuarembó, sus proveedores y sus clientes.

4.4.1.2 Disminución del costo del transporte del vidrio

Luego, se continuó disminuyendo el costo del transporte del vidrio hasta llegar a una disminución del 90% y se constató que la respuesta del modelo no varía, salvo por el costo del transporte disminuye a $25.149 semanales.

Esta respuesta también tiene lógica, ya que el modelo ya posiciona las plantas lo más cerca posible de los clientes (Montevideo y Maldonado). Por lo tanto, si el costo del transporte del vidrio disminuyera, el modelo debería acercar aún más las plantas a los clientes para reducir la distancia de la arena, que es más costosa de transportar. Sin embargo, como las plantas ya están ubicadas en la mejor posición posible, el modelo mantiene la misma solución, lo que resulta coherente.

4.4.1.3 Aumento del costo del transporte de la arena

Se aumentó gradualmente el costo del transporte de la arena y se dejó constante el costo del transporte del vidrio. Se alcanzó un aumento del 100% y en todos los casos se constató que la situación no varía con respecto al escenario original.

Esto tiene sentido ya que este caso es análogo al caso visto previamente en el cual se disminuye el costo del transporte del vidrio. El modelo ya de por sí en su respuesta original posiciona las plantas lo más cerca posible de sus clientes, por lo tanto, no importa cuanto aumente el costo del transporte de la arena o cuanto disminuya el costo del transporte del vidrio, los trayectos de arena no se van a poder disminuir ya que están en su mínimo.

4.4.1.4 Disminución del costo del transporte de la arena de vidrio

Continuando con la variación del costo del transporte de la arena de vidrio, se prosiguió a disminuir dicho parámetro. Se realizó una disminución gradual y se observó que recién cuando se varía un 50% es cuando la situación cambia.

En ese caso, se observa que el costo de transporte disminuye a $161.564 semanales y que al igual que en el caso del aumento del costo del transporte del vidrio, el modelo ubica una planta en Montevideo de capacidad 369 ton y una planta en Tacuarembó de 31 ton.

De igual manera, la planta de Tacuarembó recibe envases de Artigas, Rivera y Tacuarembó y envía 6,1 ton/día a Asfalto 5, que como ya se mencionó, es el cliente más cercano a dicho departamento.

La distribución de la arena proveniente de la planta de Montevideo es análoga a la vista en el caso de un aumento de un 90% del costo de transporte de los envases de vidrio.

Esta respuesta es la esperada por el modelo, ya que tanto al disminuir el costo del transporte de la arena como al aumentar el costo del transporte del vidrio, llega un punto (50% de disminución para la arena y 90% de aumento para el vidrio), en el cual es conveniente disminuir los trayectos de vidrio y aumentar los de la arena ya que son más accesibles. Es por eso que tiene sentido que ubique una de las plantas en Tacuarembó, al norte del país, para que reciba vidrio de los departamentos más alejados.

Al completar el análisis de sensibilidad respecto a los costos de transporte, se observa que el modelo responde de manera consistente frente a la variación de estos parámetros. Esto sugiere que el costo del transporte no es un factor altamente sensible dentro del modelo, ya que su impacto en los resultados es limitado a menos que se introduzcan variaciones de gran magnitud (de más de un 50%). De hecho, en algunos escenarios, incluso modificaciones considerables en los costos no afectan la respuesta del modelo.

4.4.2 Variación de la demanda de los clientes

A continuación, se procedió a variar los datos de la demanda de los clientes. Se comenzó variando en igual medida para todos los clientes y luego se realizó una variación según los diferentes rubros.

4.4.2.1 Aumento de la demanda para todos los clientes

La demanda de los clientes se aumentó un 10%, y se observó que la ubicación óptima para las plantas sigue siendo Montevideo y Maldonado, con capacidades de 362,5 ton/semana y 37,5 ton/semana, respectivamente.

Además, la planta de Maldonado continúa entregando 7,35 ton diarias de arena de vidrio a la planta de Hormigón 3. Al igual que en el caso original, no logra cubrir por completo la demanda de este cliente, aunque le destine toda su producción.

Sin embargo, la planta de Montevideo no abastece a los mismos clientes que en el caso original. En este escenario, entregaría 2,75 ton diarias a Baldosa 1, 1,98 ton/día a Baldosa 2 y 66,3 ton/día a Hormigón 1, sin lograr completar la demanda de este último, que en este caso asciende a 68,8 ton diarias. Esta distribución y su comparación con el caso original se puede observar en la Tabla 5.

Este resultado también es lógico, ya que el modelo sigue priorizando la entrega a los clientes más cercanos a la planta con el fin de minimizar los costos de transporte. Baldosa 1, ubicada a 8 km, es el cliente más próximo, seguido de Baldosa 2 a 9 km y Hormigón 1 a 11 km. Aunque el cliente Asfalto 4 también está a 11 km, el modelo prioriza a Hormigón 1.

Dado el incremento en la demanda de todos los clientes, el modelo deja de abastecer a Asfalto 1, que se encuentra a 12 km de la planta. Esto es consistente con el comportamiento observado en el caso original, donde Asfalto 1 ya era el cliente más desfavorecido al no recibir su demanda completa. Así, el modelo demuestra seguir una lógica clara.

Finalmente, se observa que el costo total de transporte aumenta a $168.181 semanales.

Al aumentar en mayores porcentajes la demanda de los clientes, se observa que las ubicaciones de las plantas continúan siendo las mismas y que las únicas variaciones se

encuentran en la cantidad de clientes que se logra abastecer. En todos los casos el modelo prioriza a los clientes más cercanos.

Tabla 5: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al aumentar 10% su demanda

Cliente	Demanda original (ton/día)	Demanda modificada (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,75	2,5	2,75	8
Baldosa 2	1,8	1,98	1,8	1,98	9
Asfalto 4	2,2	2,42	2,2	0	11
Hormigón 1	62,5	68,8	62,5	66,3	11
Asfalto 1	9	9,9	2,05	0	12
Asfalto 2	3,6	3,96	0	0	12
Hormigón 2	31,3	34,4	0	0	12

4.4.2.2 Disminución de la demanda para todos los clientes

La demanda de los clientes se redujo en un 10%, y se observó que nuevamente las plantas son ubicadas en Maldonado y Montevideo, manteniendo las mismas capacidades que en el caso original. A su vez, la planta de Maldonado continúa abasteciendo con 7,35 ton diarias a Hormigón 3.

Sin embargo, los clientes de Montevideo vuelven a variar. Se entregan 2,25 ton a Baldosa 1, 1,62 ton a Baldosa 2; 56,3 ton a Hormigón 1; 1,98 ton a Asfalto 4; 8,1 ton a Asfalto 1 y, finalmente, 0,85 ton a Hormigón 2. Estos valores pueden observarse comparados al caso original en la Tabla 6.

En este escenario, la planta de Montevideo logra cubrir por completo la demanda de los clientes a los que abastecía en el caso original (Baldosa 1, Baldosa 2, Hormigón 1, Asfalto 4 y Asfalto 1). Además, aún le sobra material (0,85 ton diarias), que destina a Hormigón 2. Aunque este cliente se encuentra a la misma distancia que Asfalto 2 (12 km), el modelo lo prioriza.

Esto nos permite concluir que, en términos de transporte, los próximos clientes a considerar en caso de una disminución de la demanda, serían Asfalto 1, Hormigón 2 o Asfalto 2, ya que todos se encuentran a 12 km de la planta. Asimismo, el modelo matemático sigue manteniendo la misma lógica, priorizando la entrega a los clientes más cercanos.

Finalmente, se constató que el costo total de transporte es de $168.307 por semana.

Al igual que en el caso del aumento de la demanda para todos los clientes, se estudiaron diferentes porcentajes de disminución y se constató que la respuesta del modelo es siempre similar; las plantas se ubican en los mismos departamentos y se prioriza a los clientes más cercanos.

Tabla 6: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al disminuir 10% su demanda

Cliente	Demanda original (ton/día)	Demanda modificada (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,25	2,5	2,25	8
Baldosa 2	1,8	1,62	1,8	1,62	9
Asfalto 4	2,2	1,98	2,2	1,98	11
Hormigón 1	62,5	56,3	62,5	56,3	11
Asfalto 1	9	8,1	2,05	8,1	12
Asfalto 2	3,6	3,24	0	0	12
Hormigón 2	31,3	28,2	0	0,85	12

4.4.2.3 Aumento de la demanda para los clientes del rubro asfalto

Al aumentar en un 10% la demanda de arena de vidrio por parte de los clientes del rubro asfalto, el modelo mantiene la ubicación de las plantas en Maldonado y Montevideo, con las mismas capacidades que en el escenario original. Además, la planta de Maldonado continúa entregando la misma cantidad a Hormigón 3.

Por otro lado, la cantidad entregada a los clientes de la planta de Montevideo varía. En este caso, se sigue completando la demanda de Baldosa 1, Baldosa 2, Hormigón 1 y Asfalto 4, que ahora es 2,42 ton semanales. Sin embargo, el modelo le entrega menos material a Asfalto 1 (1,83 ton/día), ya que tiene que entregar más a Asfalto 4. Estos valores se pueden observar comparados a los del escenario original en la Tabla 7.

Se observa que el modelo sigue aplicando la misma lógica, priorizando a los clientes más cercanos. Como la demanda del rubro asfalto aumenta, el modelo reduce la entrega a Asfalto 1 para favorecer a Asfalto 4, que se encuentra a menor distancia de la planta.

Finalmente, el costo de transporte asciende a $168.214 semanales.

Tabla 7: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al aumentar 10% la demanda del rubro asfalto

Cliente	Demanda original (ton/día)	Demanda modificada (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	1,8	1,8	9
Asfalto 4	2,2	2,42	2,2	2,42	11
Hormigón 1	62,5	62,5	62,5	62,5	11
Asfalto 1	9	9,9	2,05	1,83	12
Asfalto 2	3,6	3,96	0	0	12
Hormigón 2	31,3	31,3	0	0	12

4.4.2.4 Disminución de la demanda para los clientes del rubro asfalto

Al reducir un 10% la demanda de arena de vidrio en el rubro asfalto, las plantas siguen ubicadas en Maldonado y Montevideo, conservando sus capacidades originales. A su vez, la planta de Maldonado mantiene sin cambios su entrega a Hormigón 3.

En este escenario, la demanda de Asfalto 4 se reduce a 1,98 ton, es decir, 0,22 ton menos que en el caso original. Este excedente es entregado a Asfalto 1, que ahora recibe un total de 2,27 ton, aunque sigue sin cubrir su demanda por completo. Los demás clientes del caso original (Baldosa 1, Baldosa 2 y Hormigón 1) mantienen sus asignaciones sin cambios. Estos valores pueden observarse en la Tabla 8.

Esta distribución tiene lógica, ya que el excedente de lo que se entregaba en el modelo original a Asfalto 4 ahora se destina a Asfalto 1, que era el único cliente cuya demanda no se cubría completamente. Como se mencionó anteriormente, con las modificaciones, el modelo ajusta las entregas priorizando al cliente más cercano. En este caso, el modelo opta por entregar el excedente a Asfalto 1, aunque Asfalto 2 y Hormigón 2 también se encuentran a 12 km de la planta.

Finalmente, en esta situación el costo del transporte es de $168.219 semanales.

Tabla 8: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al disminuir 10% la demanda del rubro asfalto

Cliente	Demanda original (ton/día)	Demanda modificada (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	1,8	1,8	9
Asfalto 4	2,2	1,98	2,2	1,98	11
Hormigón 1	62,5	62,5	62,5	62,5	11
Asfalto 1	9	8,1	2,05	2,27	12
Asfalto 2	3,6	3,24	0	0	12
Hormigón 2	31,3	31,3	0	0	12

4.4.2.5 Aumento de la demanda para los clientes del rubro baldosas

Cuando se aumenta en un 10% la demanda de arena de vidrio para los clientes del rubro baldosas, la situación es similar a la del escenario original. La única diferencia es que ahora se entrega un 10% más a Baldosa 1 (2,75 ton) y a Baldosa 2 (1,98 ton) para satisfacer sus demandas. Para poder entregar estas cantidades, se reduce la entrega a Asfalto 1, que ahora recibe 1,62 ton diarias. Esto tiene sentido, ya que tanto Baldosa 1 como Baldosa 2 están más cerca de la planta que Asfalto 1, lo que muestra una vez más la estabilidad del modelo. Las cantidades entregadas a los clientes pueden observarse en la Tabla 9.

En este escenario, el costo del transporte es de $168.199 semanales.

Tabla 9: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al aumentar 10% la demanda del rubro baldosas

Cliente	Demanda original (ton/día)	Demanda modificada (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,75	2,5	2,75	8
Baldosa 2	1,8	1,98	1,8	1,98	9
Asfalto 4	2,2	2,2	2,2	2,2	11
Hormigón 1	62,5	62,5	62,5	62,5	11
Asfalto 1	9	9	2,05	1,62	12
Asfalto 2	3,6	3,6	0	0	12
Hormigón 2	31,3	31,3	0	0	12

4.4.2.6 Disminución de la demanda para los clientes del rubro baldosas

Al reducir en un 10% la demanda de arena de vidrio para los clientes del rubro baldosas, la situación es similar a la del escenario original.

Al igual que en el caso original, se continúan cubriendo las demandas de Hormigón 1 y Asfalto 4 (62,5 y 2,2 ton/sem). Sin embargo, en este caso, se entrega un 10% menos a Baldosa 1 y Baldosa 2, es decir, 2,25 ton y 1,62 ton diarias, respectivamente. Por lo tanto, las 0,43 ton que estos clientes recibían en el caso original deben ser entregadas a otro cliente. Como era de esperarse, el modelo asigna este excedente a Asfalto 1, entregando ahora 2,48 ton diarias. Estos valores pueden observarse en la Tabla 10.

En este escenario el costo del transporte es de $168.234 semanales.

Tabla 10: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al disminuir 10% la demanda del rubro baldosas

Cliente	Demanda original (ton/día)	Demanda modificada (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,25	2,5	2,25	8
Baldosa 2	1,8	1,62	1,8	1,62	9
Asfalto 4	2,2	2,2	2,2	2,2	11
Hormigón 1	62,5	62,5	62,5	62,5	11
Asfalto 1	9	9	2,05	2,48	12
Asfalto 2	3,6	3,6	0	0	12
Hormigón 2	31,3	31,3	0	0	12

4.4.2.7 Aumento de la demanda para los clientes del rubro hormigón

Se incrementó en un 10% la demanda de arena de vidrio por parte de los clientes que producen hormigón, lo que generó ciertas variaciones en las entregas desde la planta de Montevideo.

Como en el caso original, la planta entrega 2,5 ton diarias a Baldosa 1 y 1,8 ton diarias a Baldosa 2, cubriendo completamente sus demandas. Sin embargo, en este escenario, la planta de Montevideo deja de abastecer a Asfalto 1 y Asfalto 4, ya que la cantidad que les suministraba en la situación inicial se redirige ahora a Hormigón 1.

En consecuencia, Hormigón 1 recibe 66,6 ton diarias, aunque esta cantidad no es suficiente para cubrir su nueva demanda de 68,8 ton diarias. Esta distribución se puede observar en la Tabla 11.

Aunque Asfalto 4 está a la misma distancia de la planta que Hormigón 1 (11 km), el modelo prioriza el suministro a este último. Por otro lado, dado que Asfalto 1 se encuentra aún más lejos, no recibe ninguna entrega. El modelo se mantiene consistente, ya que abastece primero a los clientes más cercanos.

Por su parte, la planta de Maldonado continúa entregando a Hormigón 3 la misma cantidad de arena que en el escenario original. Esto se debe a que, en términos de costos de transporte, lo

más eficiente es que esta planta reciba vidrio residual únicamente de los departamentos de Maldonado, Rocha y Lavalleja. Sin embargo, el volumen recolectado desde estas zonas sigue siendo insuficiente para cubrir por completo la demanda de Hormigón 3, que asciende a 34,4 ton/día. Por lo tanto, la cantidad entregada representa solo una parte de lo que el cliente requiere.

Como resultado, el costo total del transporte asciende a $168.193 semanales.

Tabla 11: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al aumentar 10% la demanda del rubro hormigón

Cliente	Demanda original (ton/día)	Demanda modificada (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	1,8	1,8	9
Asfalto 4	2,2	2,2	2,2	0	11
Hormigón 1	62,5	68,8	62,5	66,6	11
Asfalto 1	9	9	2,05	0	12
Asfalto 2	3,6	3,6	0	0	12
Hormigón 2	31,3	34,4	0	0	12

4.4.2.8 Disminución de la demanda para los clientes del rubro hormigón

Al reducirse en un 10% la demanda por parte de los clientes que producen hormigón, la planta de Montevideo redistribuye el excedente que antes entregaba a Hormigón 1 hacia Asfalto 1, ya que es uno de los clientes más cercanos a la planta (12 km). El modelo lo prioriza sobre Asfalto 2 y Hormigón 2, que también se encuentran a 12 km de distancia.

Inicialmente, Hormigón 1 recibía 62,5 ton diarias, pero con la reducción de demanda, ahora requiere 56,3 ton diarias. Como resultado, las 6,25 ton restantes se redirigen a Asfalto 1, que en el caso original recibía 2,05 ton diarias y ahora pasa a recibir 8,3 ton diarias. Estos valores se muestran en la Tabla 12.

Contrariamente al caso anterior, la demanda de Hormigón 3 desciende a 28,2 ton/día. Por lo tanto, la cantidad de arena de vidrio entregada por la planta de Maldonado a este cliente, la cual continúa siendo de 7,35 ton/día, representa una mayor porción de la capacidad total.

El costo total del transporte asciende a $168.287 semanales.

Tabla 12: Entrega a clientes desde planta de Montevideo al disminuir 10% la demanda del rubro hormigón

Cliente	Demanda original (ton/día)	Demanda modificada (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	1,8	1,8	9
Asfalto 4	2,2	2,2	2,2	2,2	11
Hormigón 1	62,5	56,3	62,5	56,3	11
Asfalto 1	9	9	2,05	8,3	12
Asfalto 2	3,6	3,6	0	0	12
Hormigón 2	31,3	28,2	0	0	12

4.4.2.9 Variación de la demanda para los clientes del rubro bloques

Se observa que, en el caso de los bloques, no tiene sentido realizar un análisis de sensibilidad al variar su demanda. Ni al aumentar ni al disminuir su demanda el modelo se ve afectado, ya que no resulta conveniente abastecerlos debido a su distancia respecto a las plantas. Bloque 1 se encuentra a 55 km de la planta de Montevideo y Bloque 2, a 26 km. Por lo cual el modelo nunca los priorizaría ante los clientes más cercanos.

Sin embargo, se observa que Bloque 1 es el cliente más cercano a San José y Bloque 2 el segundo más cercano a Canelones. Por ende, de instalarse una planta en alguno de estos departamentos aumentarían las probabilidades de satisfacer a estos clientes.

4.4.3 Variación de la cantidad de plantas a instalar

4.4.3.1 Instalación de una única planta

Al indicar al modelo que, en lugar de instalar dos plantas, debe instalar solo una, esta se ubica en Montevideo, con capacidad de procesar 400 ton de envases de vidrio residuales por semana. Esta planta recibe material de todos los departamentos.

Se observa que la planta suministra arena de vidrio a Baldosa 1, Baldosa 2, Hormigón 1, Asfalto 4 y Asfalto 1, cumpliendo con su demanda, además de entregar una pequeña cantidad de material a Hormigón 2 (0,4 ton/día).

Esto tiene sentido, ya que estos seis clientes son los más cercanos a la planta, por lo que resulta conveniente abastecerlos. Nuevamente, cuando se incrementa la cantidad de material disponible para entregar, el modelo prioriza completar la demanda de Asfalto 1 sobre Hormigón 2, aunque se encuentren a igual distancia de la planta. Esta distribución se puede observar en la Tabla 13.

El costo total del transporte es de $179.338 semanales.

Tabla 13: Entrega a clientes al instalar una única planta

Cliente	Demanda original (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	1,8	9
Asfalto 4	2,2	2,2	2,2	11
Hormigón 1	62,5	62,5	56,3	11
Asfalto 1	9	2,05	9	12
Asfalto 2	3,6	0	3,6	12
Hormigón 2	31,3	0	0,4	12

4.4.3.2 Instalación de tres plantas

Al indicar al modelo que se deben instalar tres plantas, estas se ubican en Montevideo, Canelones y Maldonado, con capacidades de 292,9 ton/día, 69,6 ton/día y 37,5 ton/día, respectivamente.

La nueva planta a instalar en Canelones recibe envases únicamente de Canelones, mientras que la planta de Maldonado continúa recibiendo material de Maldonado, Rocha y Lavalleja. Por su parte, la planta de Montevideo se abastece de los 15 departamentos restantes.

La planta de Montevideo entrega diariamente 2,5 ton a Baldosa 1, 1,8 ton a Baldosa 2, completando sus demandas, y 53,1 ton a Hormigón 1. Se observa que, en este caso, el modelo

prioriza abastecer a Hormigón 1 antes que a Asfalto 4, a pesar de encontrarse a la misma distancia. Estos valores se observan en la Tabla 14.

Tabla 14: Entrega a clientes desde planta en Montevideo al instalar tres plantas

Cliente	Demanda original (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	1,8	9
Asfalto 4	2,2	2,2	0	11
Hormigón 1	62,5	62,5	53,1	11
Asfalto 1	9	2,05	0	12
Asfalto 2	3,6	0	0	12
Hormigón 2	31,3	0	0	12

Al igual que en el caso original, la planta de Maldonado entrega 7,35 ton diarias de arena de vidrio a Hormigón 3.

Finalmente, la planta de Canelones entrega diariamente 8,1 ton a Asfalto 5, 3,6 ton a Bloque 2, completando sus demandas, y 1,94 ton a Hormigón 2. Esto tiene sentido, ya que son los clientes más cercanos a la planta de Canelones, ubicados a 24 km, 27 km y 42 km de la planta, respectivamente. La cantidad entregada a cada cliente por la planta y sus distancias a la misma se visualiza en la Tabla 15. Además, la ubicación de la planta y de sus clientes puede observarse en la Figura 14.

El costo total del transporte es de $161.306 semanales.

Tabla 15: Entrega a clientes desde planta en Canelones al instalar tres plantas

Cliente	Capacidad (ton/día)	Cantidad entregada por planta en Canelones(ton/día)	Distancia a planta Canelones (km)
Asfalto 5	8,1	8,1	24
Bloque 2	3,6	3,6	27
Hormigón 2	31,3	1,94	42
Baldosa 1	2,5	0	51
Asfalto 1	9	0	51
Asfalto 3	6,3	0	51
Baldosa 2	1,8	0	52
Asfalto 2	3,6	0	52
Asfalto 4	2,2	0	54
Hormigón 1	62,5	0	54
Bloque 1	5,1	0	62
Hormigón 3	31,3	0	146

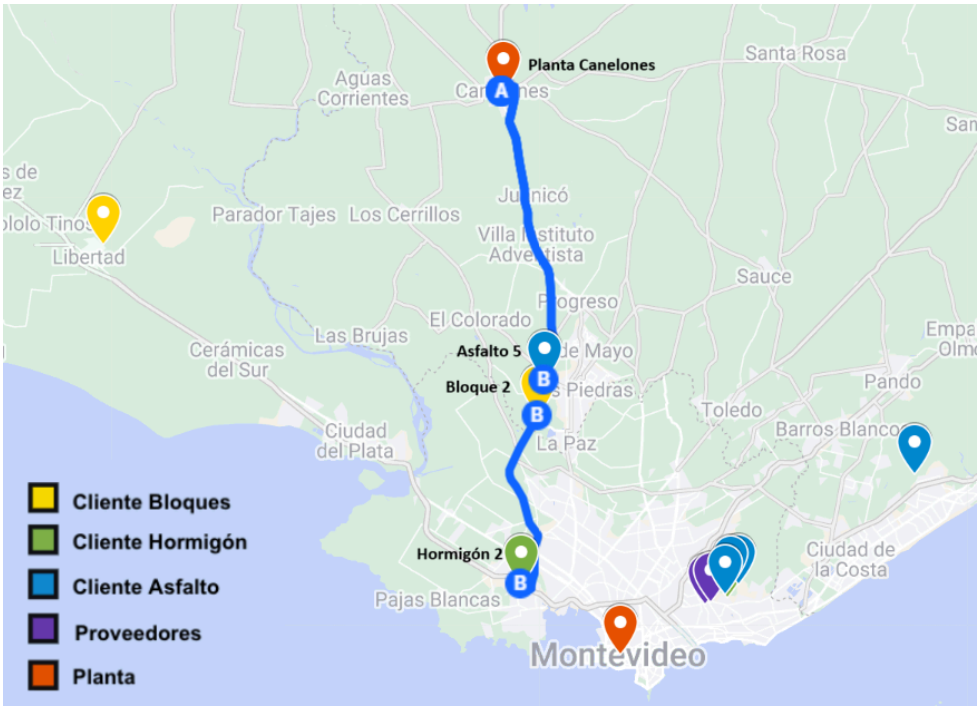

Figura 14: Conexión entre la planta de Canelones y sus clientes

4.4.4 Variación de la cantidad de vidrio recolectado

4.4.4.1 Aumento de la cantidad de vidrio recolectado

Al incrementarse en un 10% la cantidad total de envases recolectados, la capacidad de cada planta aumenta en la misma proporción, ya que continúan recibiendo vidrio de los mismos departamentos considerados en la resolución original del modelo.

Para la planta de Maldonado, este cambio no representa una variación significativa, salvo que la cantidad entregada a Hormigón 3 (su único cliente) aumenta a 8,09 ton de arena, lo que equivale a un 10% más en comparación con el resultado base.

Por otro lado, la planta de Montevideo alcanza una capacidad de 398,7 ton de vidrio, lo que le permite cubrir la demanda de los clientes Baldosa 1, Baldosa 2, Hormigón 1 y Asfalto 4, tal como en el escenario original. Además, logra satisfacer completamente la demanda de Asfalto 1, que en la distribución base quedaba incompleta, y entrega una pequeña cantidad de 0,14 ton a Hormigón 2. Esta distribución se detalla en la Tabla 16.

Asfalto 1, Asfalto 2 y Hormigón 2 se encuentran a 12 km de la planta de Montevideo, lo que los posiciona como los siguientes clientes con menor costo de abastecimiento, luego de los cuatro a quienes el modelo asigna la demanda completa. Dado el incremento en la cantidad de material disponible para distribuir, resulta lógico que el modelo no solo complete la demanda de Asfalto 1, sino que también incorpore a Hormigón 2 dentro de la distribución. En este caso, se

prioriza la entrega a Asfalto 1 y Hormigón 2, dejando por fuera a Asfalto 2. De todos modos, cualquier otra configuración de distribución que incluya a Asfalto 1, Asfalto 2 y Hormigón 2 también se consideraría consistente.

El costo total del transporte es de $185.076 semanales.

Tabla 16: Entrega a clientes desde planta en Montevideo al aumentar la cantidad de vidrio recolectado

Cliente	Demanda original (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	1,8	9
Asfalto 4	2,2	2,2	2,2	11
Hormigón 1	62,5	62,5	62,5	11
Asfalto 1	9	2,05	9	12
Asfalto 2	3,6	0	0	12
Hormigón 2	31,3	0	0,14	12

4.4.4.2 Disminución de la cantidad de vidrio recolectado

Al reducirse en un 10% la cantidad de vidrio recolectado, las capacidades de ambas plantas disminuyen en la misma proporción. La planta de Maldonado entrega 6,6 ton a Hormigón 3, mientras que la planta de Montevideo cubre la demanda de Baldosa 1 y Baldosa 2, y suministra 59,7 ton a Hormigón 1. Dado que la reducción en el vidrio recolectado impacta la producción de arena, la planta dispone de menos material para distribuir. En este escenario, los clientes afectados son Hormigón 1, cuya demanda no se completa, y Asfalto 4 y Asfalto 1, que no reciben ninguna cantidad de arena.

Los clientes del sector de baldosas son los más cercanos a la planta, por lo que es lógico que el modelo continúe priorizándolos. De manera contraria, Asfalto 1 es el más distante de los cinco clientes mencionados, por lo que también resulta razonable que no reciba suministro en este caso. En cuanto a Hormigón 1 y Asfalto 4, ambos están ubicados a 11 km de la planta de Montevideo, por lo que es comprensible que uno de ellos se vea afectado por la reducción en la recolección de vidrio. Esta distribución puede observarse en la Tabla 17.

El costo total del transporte es de $151.469 semanales.

Tabla 17: Entrega a clientes desde planta en Montevideo al disminuir la cantidad de vidrio recolectado

Cliente	Demanda original (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	1,8	9
Asfalto 4	2,2	2,2	0	11
Hormigón 1	62,5	62,5	59,7	11
Asfalto 1	9	2,05	0	12
Asfalto 2	3,6	0	0	12
Hormigón 2	31,3	0	0	12

4.4.5 Conclusiones análisis de sensibilidad

Luego de los diferentes análisis realizados, se alcanzaron ciertas conclusiones con respecto al modelo estudiado.

En primer lugar, como observación general, se puede constatar que el modelo se comporta de una manera estable, ya que en todos los casos estudiados sigue con la lógica esperada y no sufre ningún cambio abrupto. Se puede observar que el modelo busca minimizar los costos de transporte priorizando siempre a los clientes más cercanos a las diferentes plantas o reduciendo las distancias de transporte de los materiales con costos más elevados.

Como mejora futura del modelo, se podría investigar en detalle el criterio utilizado por el modelo para decidir a qué cliente abastecer cuando varios se encuentran a la misma distancia. Además, sería interesante analizar qué criterios se podrían incluir para jerarquizar estos clientes (antigüedad, fecha del pedido, demanda, etc.).

Los casos en los que se observa un cambio significativo en la respuesta del modelo son : aumento del costo del transporte del vidrio de un 90% y disminución del costo del transporte de la arena en un 50%. En estos, la planta que en el caso original se instala en Maldonado ahora pasa a instalarse en Tacuarembó, para estar más cerca del norte del país y así equilibrar el desbalance entre los costos de transportar vidrio y arena.

Además de los estudiados, un factor que podría afectar en gran medida la respuesta del modelo sería el surgimiento de nuevos clientes en otros departamentos ya que actualmente todos se sitúan en la zona sur del país.

4.5 Distribución

En el análisis de sensibilidad, se evaluó el comportamiento del modelo mediante variaciones porcentuales en todos sus parámetros. Sin embargo, no se realizó un análisis detallado del transporte para cada cliente según la cantidad de material enviada.

En esta sección, se examinarán con mayor profundidad los costos de transporte específicos para cada cliente, tanto en el caso de los envases de vidrio como en el de la arena.

En el estudio del transporte de envases, se evaluaron otras dos alternativas, variando el tamaño de los camiones y el material de acopio.

La primera alternativa ofrece el uso de camiones más grandes, los cuales tienen un costo de $85/km[4] y permiten un volumen de 40 m³ y cargas de hasta 30 ton.

- Si la limitante fuera el volumen, lo máximo que podrían entrar son 40 bolsones ya que 1 bolsón equivale a 1 m³. Además, sabemos que un bolsón pesa en promedio 370 kg, por lo tanto el camión podría llevar: $40 * 0,37 = 14,8\ ton$.
- Si la limitante fuera el peso, se podrían transportar hasta 30 ton, pero en este caso no se cumpliría con la restricción de volumen, por lo tanto no sería posible.

Observando que el factor limitante sería el volumen, concluímos que para estos camiones se podrían transportar como máximo 14,8 ton. En este caso, el costo de transporte sería:
$\$\,85/km \div 14,8\ ton = \$\,5,7/km.ton$.

Se puede constatar que este precio es ligeramente más elevado que el costo del transporte utilizando camiones medianos, razón por la cual no se eligió para el modelo matemático ya que el mismo busca reducir los costos totales. El incremento en la capacidad de transporte entre un camión mediano y uno grande no es proporcional en términos de peso y volumen. Mientras que el volumen aumenta en un 50% (pasando de 28 m³ a 40 m³), el peso aumenta a más del doble (de 14 ton a 30 ton). Además, el aumento del costo entre ambos camiones es similar a la proporción en la que aumenta el volumen (de $58 /km a $85 /km), por lo tanto se observa que el beneficio de usar camiones grandes representa un gran aumento en la capacidad de peso que se puede transportar, pero no tanto de volumen. Transportar mayores cantidades suele ser más rentable solo si el incremento de carga compensa el mayor costo del camión; sin embargo, en este caso, el transporte de envases de vidrio está limitado por el volumen más que por el peso, y como el costo aumenta de manera casi proporcional al volumen máximo transportable,

[4] Entrevista personal con Alessandro Garlati (CCO en Ecogestión), reunión virtual, 11 de octubre de 2024.

no se logra ningún beneficio económico ni se compensa el aumento del precio.

La segunda alternativa, sugerida por expertos en transporte[5], fue el uso de cajones, que ofrecen mayor facilidad de estibamiento. Estos cajones tienen dimensiones de 1,2 m x 1,2 m x 0,6 m y un peso total de hasta 0,2 ton (incluyendo el vidrio). Dado que su volumen es de 0,86 m³, el camión mediano podría albergar hasta 32 cajones. Sin embargo, debido al espacio ocupado por la estructura de los cajones, la carga máxima transportada sería de 6,5 ton, inferior a la alcanzada con los bolsones. Esto elevaría el costo de transporte a $8,9/km.ton, otra opción descartada siguiendo el objetivo de minimizar costos.

Por otro lado, en el estudio del transporte de la arena a los clientes, se evaluaron más alternativas, enfocadas en el tamaño del camión, el tipo del camión, y la posibilidad de agrupar clientes como uno solo para el uso de otro camión.

La primera alternativa, al igual que en los envases, es considerar el uso de camiones grandes. Lo que difiere, es que con la arena, el factor limitante es el peso, pues los 40m³ del camión grande equivalen a 64 ton[6], las cuales superan la carga de 30 ton. Tomando como máximo las 30 ton, el costo sería: $\$85/km \div 30\,ton = \$2,8/km.ton$; un costo más atractivo que el utilizado en el modelo matemático.

Sin embargo, introducir este costo en el modelo para algunos clientes no tendría sentido ya que en realidad, antes de tener la solución del modelo, no se sabe cuánta arena será la óptima a entregar a cada cliente. Por ejemplo, puede pasar que haya un cliente que tenga una demanda muy grande por lo que convendría utilizar un camión grande pero que el modelo indique entregar tan solo una porción de su demanda.

El costo de $2,8/km.ton se obtiene en un caso ideal donde todos los camiones transportan 30 ton, pero el modelo devuelve cantidades óptimas, no estrictas. Es de importancia al menos saber cuántas ton debe transportar el camión para alcanzar un costo igual o más barato que el original de $4,1/km.ton (el que se calculó con camiones medianos).

$$\frac{\$85\ /km}{x\ ton} = \$4,1\ /km.ton \Rightarrow \frac{\$85/km}{\$4,1\ /km.ton} = x \simeq 20,7\ toneladas \quad \text{(I)}$$

Cargando al menos 20,7 ton en el camión grande, se igualaría al precio del camión mediano. Si se cargan más $(20,7 \leq x \leq 30)$, el precio disminuirá, hasta el mínimo posible de $2,8/km.ton, el cual se alcanza cargando lo máximo posible (30 ton).

Por lo tanto, para estudiar más en detalle esta alternativa, se decidió volver a correr el modelo, cambiando el costo del transporte de la arena para los clientes que tengan una demanda mayor a 20,7 ton y luego en la solución corroborar si efectivamente se les envía más de dicha cantidad.

[5] Entrevista personal con Roberto Suarez (Urugestión), llamada telefónica, 20 de octubre de 2024
[6] Densidad de la arena: 1,6 kg/L.

Los clientes que tienen una demanda mayor a 20,7 ton son Hormigón 1, Hormigón 2 y Hormigón 3, por lo tanto, aplicarían para este análisis, modificándose su costo del transporte de arena de $4,1/km.ton a $2,8/km.ton .

Al correr el modelo obtenemos que las plantas siguen estando en los mismos lugares, con las mismas capacidades y que reciben vidrio de los mismos departamentos. Sin embargo, la distribución de los clientes de Montevideo es diferente, y el costo total resulta ligeramente menor que el costo del caso original : $165.413/semana, lo que representa una reducción del 1,7 %.

En este caso de estudio, la planta de Montevideo le entrega: 2,5 ton/día a Baldosa 1, 62,5 ton/día a Hormigón 1, y 6,05 ton/día a Hormigón 2.

Tabla 18 : Entrega a clientes desde planta en Montevideo considerando camiones medianos y grandes.

Cliente	Demanda original (ton/día)	Cantidad entregada en el caso original (ton/día)	Cantidad entregada (ton/día)	Distancia a planta Montevideo (km)
Baldosa 1	2,5	2,5	2,5	8
Baldosa 2	1,8	1,8	0	9
Asfalto 4	2,2	2,2	0	11
Hormigón 1	62,5	62,5	62,5	11
Asfalto 1	9	2,05	0	12
Asfalto 2	3,6	0	0	12
Hormigón 2	31,3	0	6,05	12

Se puede ver que el cambio en el costo de transporte, hace más conveniente entregarle a Hormigón 2 antes que a Baldosa 2, Asfalto 1 y Asfalto 4, ya que el transporte es mucho más económico. Sin embargo, esto no tiene sentido ya que a Hormigón 2 le entrega 6,05 ton (menos que 20,7) por lo que en realidad no sería favorable utilizar un camión grande. El costo que se determinó en $ 2,8 /km.ton (cargando 30 ton), sería en realidad $\frac{\$85\ /km}{6{,}05\ ton} = 14\ \$/km.ton.$

Cabe aclarar que el análisis no busca clientes que reciban 30 ton exactas, sino aquellos que reciban 20,7 ton o más, para afirmar que sí sería beneficioso utilizar camiones grandes, conforme se concluyó en la ecuación (I). Se entiende que, como ejemplo, si un cliente recibiera

25 ton su costo exacto tampoco sería $2,8 /km.ton, sino de $\frac{\$85\ /km}{25\ ton} = \$\ 3,4\ /km.ton$. De todas formas, lo vital a observar es que dicho costo siempre será menor a $4,1 /km.ton.

La conclusión acertada, es que sí sería beneficioso utilizar camiones grandes para el transporte hacia Hormigón 1. Para estudiar esta situación se volvió a correr el modelo dejando el costo en $2,8/km.ton para Hormigón 1, y $4,1/km.ton para el resto de los clientes. Al correr el modelo, la solución resultó ser la misma que en el caso original, aunque con un costo total menor de $165.734 /semana, lo que representa una disminución de un 1,5% dado que el costo de transporte hacia Hormigón 1 es más bajo que para los demás clientes.

La segunda opción, recomendada por expertos[7], consistió en utilizar camiones volcadores, que ofrecen mayor practicidad en la descarga de la arena. Se obtuvieron datos de este tipo de transporte, el cual tiene una capacidad de 20 m³, lo que equivale a 30 ton de arena. Su costo promedio es de $9 /m³.km, por lo que transportar 20 m³ de arena equivale a $180/km. Dividiendo esto por las ton que se pueden transportar $\frac{\$180}{km \cdot 30\ ton}$, obtenemos un precio de $6/km.ton .

Esta opción podría ser útil para algunos clientes que estén preparados para recibir este tipo de camiones ya que se descarga mucho más fácil que los demás camiones con bolsones. Por otro lado, para los clientes chicos esta no podría ser una solución viable ya que muchas veces no tienen la infraestructura para recibir camiones volcadores. Asimismo, aplicando el mismo criterio de reducción de costos utilizado para los envases, se decidió optar por el camión mediano común, ya que presenta un costo inferior al del camión volcador.

Como posible mejora futura, se podría modelar el costo de transporte como un parámetro variable dependiente de la cantidad transportada, en lugar de tratarlo como un parámetro fijo. Si bien esto aumentaría la complejidad del modelo al volverlo no lineal, permitiría obtener una estimación más precisa del costo asociado a la distribución óptima.

4.5.1 Posibilidad de juntar clientes

Como se puede constatar, hay algunos clientes que se encuentran muy cerca los unos de los otros, como es el caso de Baldosa 1 y Baldosa 2, que se encuentran ambos en Camino Carrasco a 450 m el uno del otro. Tomando un margen un poco mayor, se nota que Baldosa 1, Baldosa 2, Hormigón 1, Asfalto 4 y Asfalto 1 están a 3 km o menos de distancia entre ellos (Baldosa1 y Asfalto1 son los más distantes, con una separación de 3 km). Observando además que a todos estos clientes el modelo determina entregarles, unirlos como un único cliente para que la repartición se de en conjunto podría ser lo más realista y óptimo para los costos del transporte. Las distancias entre dichos clientes se pueden visualizar en la Tabla 19.

[7] Entrevista personal con David Fontans y Alejandro Cajelli (Grinor), reunión presencial, 29 de octubre de 2024.

Tabla 19: Distancias entre los clientes Baldosa 1, Baldosa 2, Hormigón 1, Asfalto 1 y Asfalto 4

Distancias (km)	Baldosa 1	Baldosa 2	Hormigon 1	Asfalto 1	Asfalto 4
Baldosa 1		0,5	2,2	3,0	2,3
Baldosa 2	0,5		1,8	2,6	1,8
Hormigon 1	2,2	1,8		1,0	0,2
Asfalto 1	3,0	2,6	1,0		1,1
Asfalto 4	2,3	1,8	0,2	1,1	

Además, no solo las distancias entre los clientes son cortas, si no que también, si se observa el mapa de la Figura 12, se ve que pertenecen a la misma ruta. Por ejemplo, si se debe entregar a Baldosa 1 y a Asfalto 4, el camino pasa por Baldosa 2, por lo que unificarlos no implicaría desvíos que generen grandes gastos.

Por lo tanto, se podría pensar que en una misma entrega se podrían juntar varios clientes, para lograr así abaratar costos de transporte e incluso analizar la posibilidad de utilizar camiones más grandes.

Esto en el modelo diseñado, no es posible de visualizar ya que no se contempla un precio extra por viaje, si no que el costo es por tonelada y por kilómetro recorrido. Sin embargo, lo que sí se puede realizar es un análisis más cualitativo, ya que por ejemplo se puede ver que en la solución original, manteniendo camiones únicos por cliente, la distribución se llevaría a cabo con un total de nueve camiones. Por otro lado, si se junta lo que se le entrega a Asfalto 1, Baldosa 1, Baldosa 2 y Asfalto 4 se podría entregar todo en un mismo camión mediano, reduciendo la cantidad de camiones a seis. Esta distribución de camiones se observa en la Tabla 20 y en la Tabla 21.

Tabla 20: Cantidad de camiones medianos utilizados en el modelo original

Clientes	Toneladas entregadas	Cantidad de camiones medianos	Redondeo hacia arriba
Baldosa 1	2,5	0,2	1
Baldosa 2	1,8	0,1	1
Hormigón 1	62,5	4,5	5
Asfalto 4	2,2	0,2	1
Asfalto 1	2,05	0,1	1
		Total	**9**

Tabla 21: Cantidad de camiones medianos utilizados unificando clientes

Clientes	Toneladas entregadas	Cantidad de camiones medianos	Redondeo hacia arriba
Baldosa 1 + Baldosa 2 + Asfalto 4 + Asfalto 1	8,55	0,6	1
Hormigón 1	62,5	4,5	5
		Total	**6**

5. Diseño de proceso y planta

Una vez finalizado el estudio de la ubicación de la planta, se llevó a cabo un análisis a gran escala de su funcionamiento. Para ello, en primer lugar, se estudió el proceso que actualmente se desarrolla en la planta existente de trituración de vidrio y, posteriormente, la maquinaria requerida para dicho proceso.

Para esta etapa de diseño, se decidió trabajar solamente con la planta de Montevideo ya que será la principal y la que podrá servir de guía para otras.

5.1 Proceso de trituración

El principal proceso de la planta es el proceso de trituración, mediante el cual los envases de vidrio recibidos se transforman en la arena entregada a los clientes. En la Figura 15 se puede observar el diagrama de flujo que refleja las principales tareas de dicho proceso.

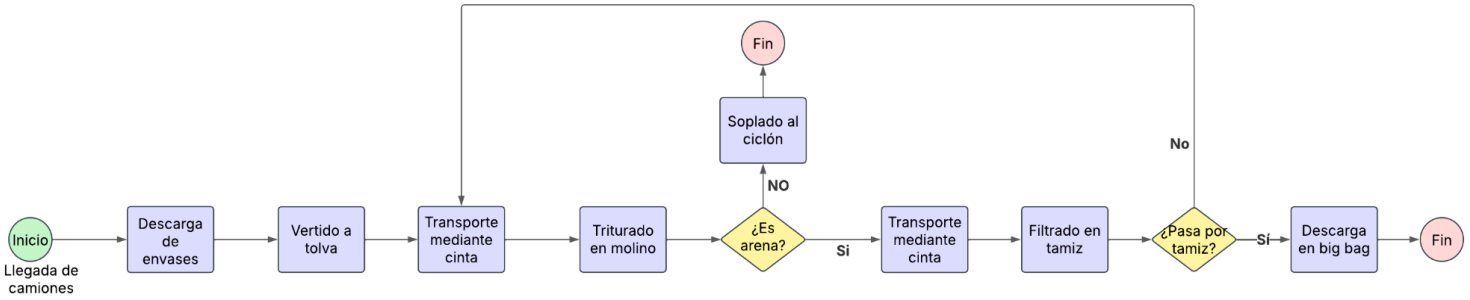

Figura 15: Diagrama de flujo del proceso de trituración

Como se puede constatar en el diagrama, el proceso inicia con la llegada de los camiones con los envases residuales separados en big bags de 1 m³. Estos son vertidos en una tolva que los descarga a una cinta transportadora. A través de esta, los envases ingresan al molino triturador, el cual los convierte en arena. Allí se aplica un sistema de soplado para eliminar etiquetas y residuos. Finalmente, la arena es transportada por otra cinta hacia el tamiz, donde se filtra según la granulometría deseada y se deposita en un big bag. Si no cumple con la granulometría, la arena es redireccionada al molino triturador.

5.2 Análisis de maquinaria

La planta debe tener la capacidad de procesar 71,1 ton/día de arena de vidrio ya que es la demanda que se le debe entregar diariamente a los clientes. Dentro de estas 71,1 ton se tienen 66,8 ton que se destinan a los clientes de Hormigón y Baldosas, por lo que su granulometría deberá ser de 1,22 mm, y 4,25 ton que se destinan a los clientes de Asfalto con una granulometría de 2,36 mm. Estos valores de granulometría fueron seleccionados luego de un análisis bibliográfico y entrevistas con expertos en el tema.

Suponiendo que la planta trabajará 8 horas más 1 de descanso (9 horas totales), se debería tener una producción de 8,9 ton/hora ($\frac{71{,}1\ ton}{8\ horas}$). Por lo tanto, la maquinaria a utilizar debe como mínimo poder cumplir con esta capacidad.

En el estudio de la maquinaria, se ajustaron los precios dependiendo de las capacidades según la siguiente fórmula [32] :

$$C_2 = C_1(\frac{Q_2}{Q_1})^n$$

Siendo :

C_2 = costo del equipo con capacidad deseada

C_1 = costo del equipo conocido

Q_1 = capacidad del equipo conocido

Q_2 = capacidad deseada

$n = 0,6$ índice de referencia

Otro punto a tener en cuenta a la hora de estudiar la maquinaria a utilizar es considerar los costos de importación de los diferentes equipos. Para esto, se estimó un incremento del 15% sobre el precio del equipo [33].

En primer lugar, para la descarga de los envases de vidrio en la tolva, se debe contar con un autoelevador montacargas, que cuente con dos horquillas desde las cuales se puedan sostener las dos manijas del big bag, elevar este sobre la tolva y desatar el fondo para que se vacíe en esta.

Para elegir este autoelevador, se debió tener en cuenta el peso de los bolsones, tanto cuando se llenan de envases como cuando se llenan de arena, ya que esta misma máquina va a ser utilizada para cargar los bolsones con la arena en el camión. Se sabe que un bolsón tiene una capacidad de 1 m³, cuando se trabaja con envases de vidrio estos pesan en promedio 0,37 ton,

sin embargo, cuando se trabaja con la arena estos pueden llegar a pesar 1,6 ton. Por lo tanto, se necesita un montacargas que pueda cargar como mínimo un peso de 1,6 ton.

Se evaluaron diferentes marcas y modelos de autoelevadores, tanto eléctricos como a nafta, con capacidades de entre 1,8 y 2,5 ton y se obtuvo un promedio de precio de USD 21.000. Se observa que existe una gran diferencia de precio entre los autoelevadores eléctricos y diesel, por lo tanto se decidió realizar dos promedios de precios separados. El promedio de precios obtenido para los autoelevadores eléctricos es USD 26.000 y para los diesel USD 13.000 [34]-[37]. Se constata una gran diferencia entre ambos precios de compra, aunque, el costo operativo de los eléctricos es menor que el de los de nafta. Se puede observar un ejemplo de autoelevador en la Figura 16.

Figura 16 : Ejemplo de montacargas. [34]

Los envases son vertidos en una tolva, que debe poder procesar al menos 8,9 ton/hora, para esto su tamaño debe ser de aproximadamente 1 m³ la cual permitirá procesar un big bag a la vez. Este equipo permite descargar los envases en una cinta transportadora a un ritmo controlado. Se encontraron distintos precios de tolvas en el mercado, llegando a un promedio de USD 8.000 [38]-[40], teniendo en cuenta los costos de importación. El precio de este equipo incrementa de gran manera al considerar tolvas vibratorias. Considerando únicamente las no vibratorias, se llega a un promedio de USD 2.500, significativamente menor al promedio anterior. La vibración permite que el contenido de la tolva se descargue más rápidamente, pero debería analizarse más en detalle su verdadera necesidad. Se muestra un ejemplo de Tolva en la Figura 17.

Figura 17: Ejemplo de tolva [41]

Luego de la tolva, los envases salen hacia una cinta transportadora de 7 m [8]. Se estudiaron diferentes cintas posibles, que varían principalmente en su material y su fuente de energía. Se analizaron los costos del mercado y se obtuvo un promedio de USD 5.000 [42]-[43]. En la Figura 18 se puede observar un ejemplo de cinta transportadora.

[8] Medida de referencia obtenida de la empresa ADV.

Figura 18: Ejemplo de cinta transportadora [44]

Esta cinta transportadora lleva los envases al molino triturador. Este equipo está compuesto principalmente por un eje que sostiene martillos, el funcionamiento se basa en el impacto generado por los martillos que giran a alta velocidad y así trituran el material. Además, este cuenta con una criba la cual actúa como un primer filtro para controlar el tamaño de salida de los fragmentos de vidrio. Como el vidrio es un material que desgasta fácilmente la maquinaria, el molino debe estar elaborado con un material resistente, el más comúnmente usado en estos casos es el acero.

Conectadas a este molino se encuentran tanto en la parte superior como en la inferior, mangueras que succionan el polvo producido por la molienda para controlar el nivel de partículas en el aire. Esta misma máquina, es utilizada para eliminar residuos, principalmente etiquetas, que se encuentran mezcladas con la arena de vidrio. La máquina sopla estos residuos, que al ser más livianos que la arena son elevados y succionados por esta misma.

Luego del análisis de los diferentes molinos de acero disponibles en el mercado, se obtuvo que en promedio este tendría un costo de USD 111.000 [45]-[47]. A este precio además se le debe sumar el 15% correspondiente a los costos de importación, lo que quedaría en un precio promedio de USD 127.000. Durante este análisis se constató que dos de los factores principales que varían el precio de los molinos son las dimensiones de la boca de alimentación y la potencia del motor. Para este caso de estudio es necesaria una potencia de aproximadamente 100 HP, lo que permitiría triturar el vidrio al ritmo deseado. En la Figura 19 se puede observar un ejemplo de molino triturador.

Figura 19: Ejemplo de molino triturador [48]

A la salida del molino, la arena de vidrio cae en una cinta transportadora de 4 m [9] que la lleva al tamiz. Esta cinta cuenta con las mismas características que la anterior, pero al ser más corta su precio es de USD 4.000.

Finalmente, las partículas de vidrio se depositan en el tamiz, el cual filtra la arena según su granulometría. Como se puede ver en la Figura 20, este equipo cuenta con: una boca de entrada por la cual ingresan las partículas, varias mallas por las cuales estas son filtradas y varias bocas de salida para cada granulometría. Cada una de estas mallas corresponde a un tamaño diferente, en este caso se debería contar con una malla de 2,36 mm y una de 1,22 mm. Las partículas que pasan por el filtro, salen del tamiz y se depositan en el big bag y las que no, son dirigidas nuevamente hacia el molino para volver a triturarlas hasta cumplir con la granulometría correspondiente. Para controlar la granulometría del material a la salida del molino, es posible ajustar diversos parámetros operativos, como la velocidad del rotor, el caudal de alimentación de vidrio y el tipo de martillos empleados. Si se busca obtener un tamaño de partícula más fino, se recomienda aumentar la velocidad del rotor, reducir el caudal de alimentación, incrementar la cantidad de martillos y/o utilizar martillos más afilados. En cambio, si se desea una granulometría más gruesa, deben aplicarse ajustes inversos.

Se realizó un análisis de costos para diferentes tamices y se obtuvo un precio promedio de USD 20.000 [49]-[51]. A esto se le debe agregar un 15% más correspondiente a los costos de importación, resultando en un precio de USD 23.000.

Se observa que este costo varía según la forma del equipo, que puede ser cilíndrico o lineal. Además, algunos tamices cuentan con una sola malla, lo que enlentece el proceso, ya que para

[9] Medida de referencia obtenida de la empresa ADV.

modificar la granulometría del producto es necesario reemplazarla. En el caso estudiado, se consideró una jornada de trabajo de 8 horas sin interrupciones por cambio de malla, por lo que se optará por un tamiz con dos mallas y salidas simultáneas.

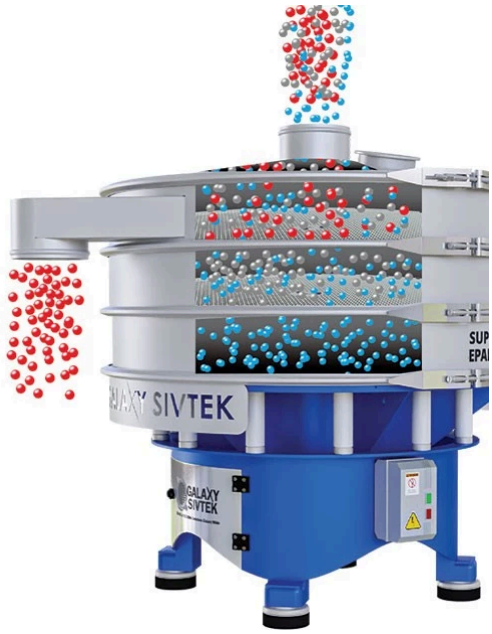

Figura 20: Ejemplo de tamiz [52]

Cabe destacar que es posible realizar una automatización del proceso para garantizar mayor eficiencia del mismo. Para esto sería necesario contar con una cabina y tablero de comando, que permiten regular la velocidad del flujo para lograr un trabajo óptimo. Además, se podrían instalar cámaras, que permitirían visualizar la carga, el tipo de producto y detectar anomalías. Esto proporciona un mayor control del proceso y la calidad del producto.

Se observó que las tareas que deberían ser realizadas por operarios son el manejo del montacargas para descargar el big bag con envases en la tolva y desplazar el big bag con arena. Además, para el control del proceso se necesita un trabajador que opere el tablero de comando y monitoree las cámaras.

5.3 Diagrama de planta

Luego de descrito el proceso y seleccionada la maquinaria se realizó un esquema de la planta el cual se visualiza en la Figura 21. En este se pueden visualizar los diferentes equipos utilizados: tolva, tamiz, cinta y molino, y los flujos de materiales.

En azul se representa el flujo de los envases de vidrio, los cuales son descargados del big bag en la tolva, luego transportados mediante la cinta hacia el molino. En amarillo se muestra la

circulación de la arena, la cual sale del molino triturador, es transportada hacia el tamiz y allí se divide en dos, la arena que pasa el filtro es depositada en los big bags, dependiendo de su granulometría, y la que no (flujo naranja) regresa a la primer cinta transportadora para pasar nuevamente por el molino.

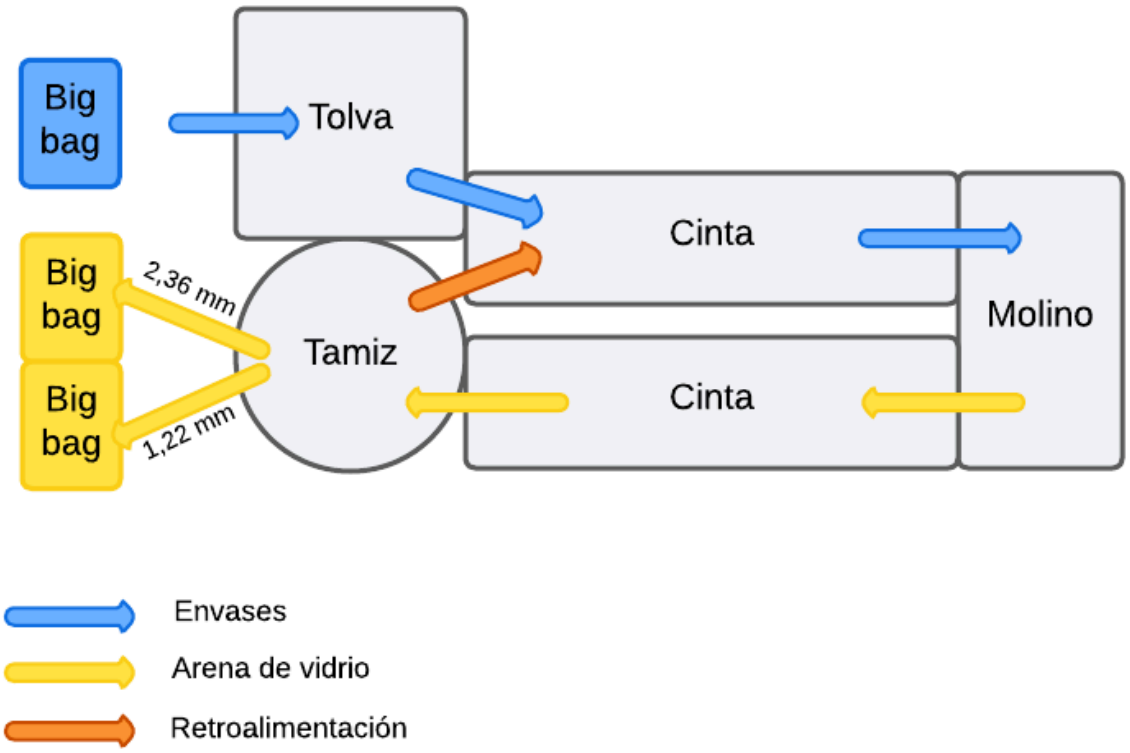

Figura 21: Diagrama de planta

6. Análisis financiero

Con el fin de evaluar la rentabilidad del proyecto se decidió realizar un análisis financiero a gran escala del mismo, considerando sus gastos principales. A pesar de no ser el enfoque central de este trabajo, dicho análisis permite dar un panorama global de la situación y del esfuerzo económico que requerirá llevarlo a cabo.

Al igual que en la etapa de diseño, para la realización del análisis se tuvo en cuenta únicamente la planta de Montevideo y se consideró un horizonte de 10 años.

6.1 Inversión inicial

Se comenzó por realizar un estimativo del capital requerido al inicio del proyecto. Para este se tuvieron en cuenta tres componentes clave: maquinaria, padrón y construcción.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, la maquinaria que se necesita adquirir se muestra en la Tabla 22. En la misma, se observa que el costo total de la inversión en equipamiento es de **USD 188.000.**

Tabla 22: Inversión inicial en maquinaria

Inversiones maquinaria	USD
Autoelevador	21.000
Tolva	8.000
Cinta 7m	5.000
Molino triturador	127.000
Cinta 4m	4.000
Cernidor	23.000
Subtotal de inversiones en maquinaria	**188.000**

El segundo costo que se consideró fue el padrón en el cual se construirá la planta. Como ya se mencionó anteriormente, la planta se ubicará en Montevideo donde el precio por m² varía desde USD 456/m² hasta USD 2.014/m² [10]. Por lo tanto, tomando un promedio de estos, se obtiene un costo de USD 1.235/m².

[10] Entrevista personal con Arquitecta Aida Ferrari, reunión presencial, marzo de 2025.

Teniendo en cuenta las medidas de la maquinaria elegida y las referencias de la planta actual, se concluyó que el área a adquirir debería ser de aproximadamente 120 m², lo que resultaría en un costo total de **USD 150.000**.

El tercer aporte económico inicial estaría destinado a la construcción de la planta. Para esto, se tuvo en cuenta el costo por metro cuadrado para construir en Uruguay, que usualmente varía entre USD 1.300 y USD 2.500 [53], dependiendo de los materiales y tecnologías utilizados. Promediando, se obtuvo un costo de **USD 230.000.**

Además, dado que se trata de un estudio a nivel macro, se decidió incluir un margen adicional del 40 % sobre la inversión estimada, destinado a cubrir otros factores que, si bien no constituyen los costos principales, sí representan una parte significativa del presupuesto. Entre estos se encuentran los montajes mecánicos y eléctricos, las instalaciones de servicios (agua, electricidad, aire comprimido, sistemas contra incendios y de seguridad), así como posibles variaciones e imprevistos que puedan surgir durante la ejecución del proyecto.

Como se puede observar en la Tabla 23, la inversión inicial alcanza un total de **USD 795.200.**

Tabla 23: Inversión inicial total

Inversiones	USD
Maquinaria	188.000
Valor del terreno	150.000
Construcción de la planta	230.000
Subtotal	**568.000**
Otras inversiones (40%)	227.200
Inversión inicial total	**795.200**

6.2 Depreciación

La maquinaria descrita anteriormente sufre una depreciación a lo largo de los años la cual se debe tener en cuenta para realizar un análisis financiero completo. La misma depende del costo inicial y de la vida útil de cada equipo.

Analizando la información disponible de cada equipo se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 24.

Tabla 24: Cuotas de depreciación por activo

Depreciación	Costo del activo (USD)	Vida útil (años)	Depreciación cuota (USD)
Autoelevador	21.000	10	2.100
Tolva	8.000	8	1.000
Cinta 7m	5.000	10	500
Molino triturador	127.000	15	8.467
Cinta 4m	4.000	10	400
Cernidor	23.000	20	1.150

Para el cálculo de la cuota de depreciación de cada equipo, se utilizó una depreciación lineal, en donde se considera que su valor se reduce uniformemente a lo largo de su vida útil. Esta cuota se calcula dividiendo el costo del activo por la vida útil de la maquinaria.

Teniendo en cuenta la vida útil de cada equipo y el horizonte de proyecto determinado, los equipos a reemplazar serían la tolva en el año 8, y el autoelevador y las cintas en el año 10, significando egresos económicos adicionales en dichos años.

6.3 Egresos

Luego, se calcularon los egresos anuales del proyecto. Para esto, se tuvieron en cuenta los principales costos operativos de la planta: el mantenimiento de los equipos, el transporte de los materiales y productos, la mano de obra y la energía eléctrica. Además, se agregó un margen de un 40%, para considerar ciertos aspectos no previstos (puesta en marcha, insumos, salarios vacacionales, etc.) y cubrirse ante variaciones e imprevistos.

Para el mantenimiento de los equipos, se estimó un costo del 15% de la inversión inicial en maquinaria, obteniendo un total de **USD 84.000** anuales [32].

El valor del transporte proviene del resultado del modelo matemático realizado previamente. Dado que el análisis financiero se centra exclusivamente en el proyecto de instalación de la planta de Montevideo, se considera solo su costo de transporte, el cual corresponde a **USD 130.000** anuales. Este número se obtiene restando el costo del transporte de la planta de Maldonado al valor de costo de transporte que nos devolvió el modelo.

El costo de la mano de obra abarca el sueldo de dos operarios, que trabajarán en el proceso de trituración y un administrativo, que se encargará de llevar a cabo la parte contable de la empresa. Considerando una jornada de 8 horas, los operarios recibirán un sueldo de $30.000

[54] mensuales cada uno y el administrativo un sueldo de $50.000 mensuales [55]. Por lo tanto, el costo total de la mano de obra es de **USD 36.000** anuales.[11]

Para el cálculo del costo de la energía, se tuvieron en cuenta las potencias eléctricas de los diferentes equipos (molino triturador, cintas transportadoras y cernidor) así como el total de horas que estos trabajan.

El molino utiliza una potencia de 100 HP, lo que corresponde a 74,6 kW. Luego, la suma de potencia del resto de los equipos se estima en 22,4 kW (300 HP). Como estos trabajan 8 horas al día, de acuerdo con la jornada de los operarios de la planta, se obtiene un consumo eléctrico de 776 kWh/día. Se observa que el molino es el equipo que mayor consumo representa. La tarifa de UTE [56] para medianos consumidores indica que el costo del kWh en Uruguay es de aproximadamente $5, lo que implica un costo de energía eléctrica de **USD 24.000** anuales.

La suma de los costos operativos se detalla en la Tabla 25 y alcanza un total de **USD 383.600**.

Tabla 25: Costos operativos anuales totales

Costos operativos anuales	**USD**
Mantenimiento	84.000
Transporte	130.000
Mano de obra	36.000
Energía	24.000
Subtotal	**274.000**
Otros egresos (40%)	109.600
Total	**383.600**

Se realizó un balance año a año de los egresos del proyecto, considerando en este tanto los costos operativos como la depreciación de los equipos. El mismo se puede observar en la Tabla 35 y en la Tabla 36 del anexo.

[11] Para las conversiones de moneda se tomó un valor del dólar de $42,42.

6.4 Beneficios

Como último paso antes de realizar el flujo de fondo, se realizó el estudio de los beneficios obtenidos. Para establecer un precio competitivo para la arena de vidrio, se decidió tomar como referencia el precio actual de la arena natural en Uruguay. Tras la investigación realizada, se estableció un precio de $1.000/ton para la arena de vidrio, ya que este valor representa un promedio del precio actual de la arena natural, y permite posicionarla como una alternativa competitiva en el mercado[12].

Dado que la producción de la planta es de 71,1 ton/día, tomando 22 días laborables al mes durante los 12 meses del año, se llegó a que la producción anual es de 18.757 ton/año. Esto resulta en un ingreso de **USD 442.178/año.** Estos valores se encuentran detallados en la Tabla 26.

Tabla 26: Cálculo de los beneficios anuales obtenidos

	Precio ($/ton)	**ton/día**	**ton/año**	**Total $ anual**	**Total USD anual[13]**
Arena de vidrio	1.000	71,1	18.757	18.757.200	442.178

Además, otro beneficio que se debió tener en cuenta es el del valor de desecho de la maquinaria adquirida. El valor de desecho de una máquina es el monto estimado que se puede recuperar al final de su vida útil, ya sea por venta como equipo usado, chatarra o reutilización de partes.

Asumiendo un horizonte de proyecto de 10 años y considerando las diferentes vidas útiles de los equipos, se obtuvieron los valores de desecho mostrados en la Tabla 27.

El valor de desecho representa el valor residual de un bien al final de su vida útil o tras cierto tiempo de uso. Como se puede observar en la siguiente fórmula, este se calcula restando al valor inicial del bien la depreciación acumulada a lo largo de los años en que ha sido utilizado. La depreciación anual se obtiene dividiendo el valor inicial entre la vida útil estimada del bien, y al multiplicarla por los años de uso, se determina cuánto valor ha perdido el activo en ese período. Así, el valor de desecho refleja cuánto vale el bien tras haberse depreciado en función del tiempo.

$$Valor\ de\ Desecho = Valor\ Inicial - \frac{Valor\ Inicial}{Vida\ Util} \cdot Años\ de\ Uso$$

Se observa que el valor residual en el año 10 para el autoelevador y las cintas coincide con el valor inicial de adquisición. Esto se debe a que estos equipos tienen una vida útil de 10 años, y se considera que se reemplazan por equipos nuevos en ese año. Por lo tanto, si se decidiera vender estos equipos en el año 10, su valor residual sería igual al precio de compra. Para

[12] Entrevista personal con Roberto Suarez (Urugestión), entrevista virtual, 4 de febrero de 2025.
[13] Para la conversión de moneda se tomó un valor del dólar de $42,42.

equipos con una vida útil menor a 10 años, lo que significa por lo menos un reemplazo antes de completado el horizonte de tiempo del proyecto, el valor de desecho se calcula para el último activo adquirido.

Tabla 27: Beneficio por valor de desecho

Equipo	Valor inicial (USD)	Vida útil (años)	Valor de desecho (USD)
Autoelevador	21.000	10	21.000
Tolva	8.000	8	6.000
Cinta 7m	5.000	10	5.000
Molino triturador	127.000	15	42.333
Cinta 4m	4.000	10	4.000
Cernidor	23.000	20	11.500
		Total	**89.833**

6.5 Flujo de fondos

Luego de calculados los diferentes factores ya mencionados, se estuvo en condición de realizar un flujo de fondos con un horizonte de 10 años, que se puede observar en la Tabla 28.

Tabla 28: Flujo de fondos (en USD)

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
Beneficios Gravados por Impuestos		442.178	442.178	442.178	442.178	442.178	442.178	442.178	442.178	442.178	442.178
Egresos Fijos Gravados por Impuestos		-383.600	-383.600	-383.600	-383.600	-383.600	-383.600	-383.600	-383.600	-383.600	-383.600
Gastos no Desembolsables (Depreciación)		-13.917	-13.917	-13.917	-13.917	-13.917	-13.917	-13.917	-13.917	-13.917	-13.917
Utilidad antes de impuestos		44.662	44.662	44.662	44.662	44.662	44.662	44.662	44.662	44.662	44.662
IRAE (25%)		-11.165	-11.165	-11.165	-11.165	-11.165	-11.165	-11.165	-11.165	-11.165	-11.165
Utilidad después de impuestos		33.496	33.496	33.496	33.496	33.496	33.496	33.496	33.496	33.496	33.496
Gastos no Desembolsables (Depreciación)		13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917
Inversión inicial	-795.200										
Reemplazo de equipos		0	0	0	0	0	0	0	-8.000	0	-33.000
Valor de recupero activos fijos (valor de desecho)											89.833
Flujo Neto (USD)	-795.200	47.413	47.413	47.413	47.413	47.413	47.413	47.413	39.413	47.413	**104.246**
Flujo Neto acumulado (USD)	-795.200	-747.787	-700.374	-652.962	-605.549	-558.136	-510.723	-463.310	-423.897	-376.485	-272.238

Teniendo en cuenta los beneficios, los egresos y la depreciación de la maquinaria se llegó a una utilidad de USD 44.662 , la cual desciende a USD 33.496 luego de los impuestos de IRAE. Luego, sumando la depreciación y el valor de recupero de los activos fijos, y restando la inversión inicial y el reemplazo de los equipos en los años correspondientes, se llega al flujo

neto anual. Se observa que el valor del flujo neto es negativo el primero año del proyecto y positivo para el resto del horizonte del proyecto, alcanzando en el año 10 un valor de USD 104.246.

Finalmente, se calculó el flujo neto acumulado en todos los años, el cual resultó negativo y termina con un valor de USD -272.238 en el año 10.

Luego, se procedió a calcular dos indicadores financieros claves para evaluar la rentabilidad del proyecto.

El primer indicador calculado fue el VAN (Valor Actual Neto), que corresponde al valor presente de todos los flujos de caja futuros esperados de un proyecto, descontados a una tasa determinada. Esta representa el costo oportunidad del capital, es decir, la rentabilidad mínima que se espera obtener para que la inversión valga la pena.

El VAN nos permite evaluar cuánto se va a ganar o perder con una determinada inversión. Cuando su valor es positivo, indica que el proyecto genera valor y por lo tanto es rentable. En cambio, si su valor es negativo, indica que el proyecto no logra cubrir la inversión inicial y por lo tanto no es rentable. La fórmula utilizada para el cálculo fue la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=0}^{n} \frac{F_t}{(1+r)^t} - I_0$$

$VAN = Valor\ actual\ neto$
$F_t = Flujo\ de\ fondo\ en\ el\ período\ t$
$r = Tasa\ de\ descuento$
$t = Período\ del\ tiempo\ en\ años$
$n = Número\ total\ de\ períodos$
$I_0 = Inversión\ inicial$

Luego, se calculó la TIR (Tasa Interna de Retorno), la tasa de descuento que hace que el VAN de un proyecto sea igual a cero. Es decir, es la tasa de rendimiento o rentabilidad esperada del proyecto. Este indicador se compara con la tasa de descuento utilizada, si es mayor a dicha tasa entonces el proyecto es rentable, si es igual a la tasa de descuento el proyecto no genera ganancia y por último si es menor a la tasa, el proyecto no es rentable. La fórmula utilizada para el cálculo fue la siguiente :

$$0 = \sum_{t=0}^{n} \left(\frac{F_t}{(1+TIR)^t}\right) - I_0$$

$I_0 = Inversión\ inicial$

$F_t = Flujo\ de\ fondos\ en\ el\ período\ t$

$t = Período\ del\ tiempo\ en\ años$

Para el cálculo de estos dos indicadores, luego de investigar sobre proyectos similares, se decidió considerar una tasa de descuento de 10%[14].

Utilizando las fórmulas ya mencionadas se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 29.

Tabla 29: Cálculo de VAN y TIR

VAN (USD)	TIR
-485.689	-7%

Como se puede observar, el valor del VAN es ampliamente negativo, y la TIR es menor a la tasa de descuento considerada, lo que permite concluir que con los valores utilizados y en un horizonte de 10 años el proyecto no sería rentable. Cabe aclarar que detrás de todas estas estimaciones se tomaron varios supuestos.

6.6 Análisis de sensibilidad

Una vez obtenidos los resultados anteriores, es importante estudiar qué cambios deberían suceder para que el proyecto sea rentable.

Por lo tanto, para concluir el análisis financiero del proyecto, se evaluó la sensibilidad del mismo frente a variaciones del precio de venta de la arena, los costos operativos y la inversión inicial, considerando incrementos para el primer caso y reducciones para los últimos dos. Para evaluar el comportamiento del proyecto, se utilizaron los mismos indicadores empleados hasta el momento: el VAN y la TIR.

En primer lugar, se estudiaron los valores de los indicadores ante un posible aumento en el precio de venta de la arena de vidrio. Como se muestra en la Tabla 30, con un aumento del 30%, representando un precio de $1.300 /ton, se alcanza un VAN positivo de USD 125.635. Asimismo, se identificó que la TIR pasa a ser mayor que la tasa de descuento utilizada (10%) a partir de dicho aumento. Por lo tanto, es en este escenario que el proyecto comienza a ser rentable. Sin embargo, este parece un aumento de gran magnitud y poco alcanzable en la realidad ya que aumentar el precio de la arena de vidrio en un 30% haría que deje de ser competitiva frente a la arena natural, que como ya se mencionó anteriormente, su precio de venta ronda los $1.000 /ton.

[14] Basado en apuntes del curso "Evaluación Económica y Financiera de Proyectos de Inversión", dictado por Gerardo Gazzano y Lorena Silveira, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, semestre 2, 2023.

Tabla 30: Variación del precio de venta de la arena de vidrio

Variación precio de venta de la arena de vidrio				
	0%	10%	20%	30%
VAN (USD)	-485.689	-281.915	-78.140	125.635
TIR	-7%	1%	8%	14%

En segundo lugar, se analizó la variación del VAN y la TIR al disminuir los costos operativos. Como se puede observar en la Tabla 31, el proyecto comienza a ser rentable al disminuir en un 30% los costos operativos. En ese caso, el VAN resulta positivo, con un valor de USD 44.649 y la TIR es de 11%, lo que es superior a la tasa de descuento utilizada. Sin embargo, disminuir los costos en casi un tercio resulta poco factible para un proyecto de tal envergadura.

A futuro, los costos operativos podrían experimentar variaciones, principalmente debido a cambios en los costos de transporte, que actualmente representan la mayor proporción del total. Estas variaciones podrían originarse tanto por un aumento en la cantidad de clientes distribuidos geográficamente, lo que implicaría mayores distancias y rutas logísticas más complejas, como por la instalación de nuevas plantas más cercanas a los puntos de recolección de vidrio, lo que permitiría optimizar la cadena de suministro. Asimismo, factores externos como el precio del combustible, la disponibilidad de flota de transporte o nuevas regulaciones ambientales también podrían influir significativamente en la estructura de costos operativos.

Tabla 31: Variación de los costos operativos

Variación costos operativos				
	-30%	-20%	-10%	0%
VAN (USD)	44.649	-132.131	-308.910	-485.689
TIR	11%	6%	0%	-7%

Por último, se realizó un análisis variando la inversión inicial, el cual se puede observar en la Tabla 32. Para este caso, solamente fue de interés disminuir el valor de dicha inversión ya que se quiere estudiar si esto podría hacer que el proyecto sea rentable. Se comenzó por una disminución del 10%, en la cual se obtuvo un VAN de USD -406.169 y una TIR de -5%, se puede observar que ambos valores aumentan levemente pero siguen estando muy alejados de indicar un proyecto rentable. Luego, se continuó con las disminuciones de un 20%, 30%, 40% y 50%, obteniendo en esta última un VAN de USD -88.089 y una TIR de 5%. Esto nos permite constatar que incluso disminuyendo la inversión inicial a la mitad, el proyecto sigue sin ser rentable. Por lo tanto, se puede concluir que el negocio es muy poco sensible a la variación de la inversión inicial.

Tabla 32: Variación inversión inicial

Variación inversión inicial						
	-50%	-40%	-30%	-20%	-10%	0%
VAN	-88.089	-167.609	-247.129	-326.649	-406.169	-485.689
TIR	5%	2%	-1%	-3%	-5%	-7%

Con excepción de la variación de la inversión inicial, se verifica que al variar en un 30% el precio de venta (aumento) y en un 30% los costos operativos (disminución) el VAN es positivo, lo que se traduce en un proyecto rentable.

Sin embargo, se observa que en los tres casos estas variaciones son difíciles de implementar en la práctica y generarían consecuencias que afectarían al negocio. Por ejemplo, un aumento en el precio del producto implicaría que la arena de vidrio resulte menos competitiva frente a la arena natural. Además, una disminución en los costos operativos podría afectar la calidad del producto.

Es importante aclarar que el análisis financiero fue realizado a una escala macro, por lo tanto se tomaron varios supuestos que pueden haber impactado en sus resultados. Decisiones como establecer un margen del 40% o seleccionar maquinaria con costos elevados pueden responder a una postura conservadora, que no siempre refleja las condiciones reales.

7. Conclusiones

En este informe se presenta un marco teórico sobre la situación global del manejo de envases no retornables, con foco en el concepto de Sistema de Depósito y Reembolso. Se identificó que algunos países cuentan con tecnologías que permiten altos niveles de retornabilidad. Luego, se analizó el contexto nacional, destacando la existencia del Plan Vale, orientado a la revalorización de envases de un solo uso. Aunque aún en etapa de planificación, se comprobó que existen soluciones para plásticos y aluminio, pero no para vidrio y multilaminados, lo que motivó un análisis más profundo de alternativas para estos materiales.

Al introducirse en esta temática se descubrió que en Uruguay ya existe una propuesta que permite revalorizar los envases de vidrio a pequeña escala, por esta razón se decidió continuar con el estudio del vidrio. Esta alternativa se basa en la trituración de los envases para transformarlos en arena, que posteriormente pueda ser utilizada como sustituto de la arena natural en materiales de construcción. Además, luego de investigar se constató que este proceso se lleva a cabo en varias partes del mundo.

Dado que la cantidad de material que se prevé recolectar por el Plan Vale es ampliamente mayor a la que hoy en día se procesa, se decidió estudiar la expansión de dicho proceso a nivel nacional. Para lograr implementarlo a nivel país, se requeriría la creación de una o varias plantas que permitan triturar todo el material que se reciba. Ya que toda iniciativa que se implemente a tan gran escala requiere de una red logística compleja, se tomó como foco la optimización de la misma. Se optó por analizar la ubicación y conexiones con proveedores y clientes de dos plantas de trituración para lograr la minimización de los costos de transporte asociados.

Para este estudio se realizó un modelo matemático de programación lineal, teniendo en cuenta parámetros clave como: los proveedores y clientes de la red, las distancias de estos con las potenciales ubicaciones de las plantas, sus capacidades, los costos de transporte y algunos factores cualitativos. Como respuesta de este modelo se obtienen las ubicaciones de las plantas y las cantidades que procesan y entregan a los distintos clientes, las cuales permiten una minimización del costo de transporte.

Fue necesario realizar un relevamiento de datos para poder correr el modelo, tomando como proveedores a los distintos departamentos del país, y como clientes a empresas que producen asfalto, hormigón, baldosas y bloques.

Una vez ejecutado el modelo, se obtuvieron como ubicaciones óptimas a Montevideo (con una capacidad significativamente mayor) y Maldonado, las cuales se conectan con sus clientes más cercanos. Luego, se realizó un análisis de sensibilidad que demostró que el modelo realizado es robusto y que no presenta grandes variaciones ante cambios en los parámetros. Dentro de este análisis se estudiaron los cambios del modelo al variar: los costos de transporte (tanto de la arena como del vidrio), la demanda de los clientes, la cantidad de plantas a instalar y la cantidad de vidrio recolectado por departamento.

En una segunda etapa, se realizó un diseño a gran escala de la planta de Montevideo, para el cual se estudió el proceso de trituración y los equipos necesarios para este, estimando los costos asociados a su adquisición. Con los datos obtenidos se logró cuantificar parte de la inversión inicial requerida.

Por último, se realizó un análisis financiero, elaborando un flujo de fondos y calculando el VAN y la TIR, para evaluar la rentabilidad del proyecto. Tomando el precio de la arena de vidrio equivalente al precio de la arena natural para lograr que el producto sea competitivo en el mercado, se obtienen resultados negativos, lo que indica que el proyecto no es rentable bajo estas condiciones.

Como conclusión general del proyecto, se pudo evidenciar que la iniciativa planteada podría ser una solución para la salida del vidrio en Uruguay, el cual es un problema vigente y sin solución actual. Además podría evitar la sobreexplotación de un material natural como la arena, ayudando de esta manera a preservar el medio ambiente. Sin embargo, como se puede observar en el análisis financiero realizado, con las condiciones existentes, este proyecto no sería un negocio rentable.

En los países tomados como referencia de este estudio, se cuentan con sistemas de apoyo completos, donde no solo se incentiva el reciclaje, sino que también se aplican multas a quiénes no lo hacen. Como se mencionó en el marco teórico del proyecto, en países como Alemania se ha impuesto a industrias y distribuidores de envases leyes que los obligan a hacerse cargo de sus productos hasta el final de su vida, siguiendo y financiando integralmente un sistema que asegure el reciclado de los mismos [8]. Un caso que permite visualizar con cifras el impacto de los apoyos gubernamentales, tanto en forma de legislación como de incentivos económicos, es el de Noruega, que promueve el uso de máquinas de vending inverso, pagando una retribución más alta a los minoristas que adoptan esta tecnología. Prácticas como estas, junto con otros factores, le permiten alcanzar una tasa de retorno de envases del 92%, considerablemente alta al compararla con la ciudad de California, que alcanza el 62%. Alemania vuelve a destacarse con una tasa del 98%, reflejo de su fuerte compromiso con la economía circular y el reciclaje efectivo [7].

Por lo tanto, se cree que para que la implementación de esta solución sea viable, en Uruguay debería suceder algo similar. Iniciativas como esta, para las cuales se requiere de una gran inversión, deberían venir acompañadas de políticas gubernamentales que por ejemplo promuevan el uso del material reciclado.

Los diferentes clientes alcanzados se muestran interesados en la implementación de arena de vidrio en sus productos, ya que comprenden la importancia de una solución más ecológica y reconocen la existencia de dicha práctica en otros países. Incluso varios de ellos han realizado pruebas y ensayos suplantando parte de la arena natural. Sin embargo, al ser este un material sencillo de obtener y con un precio accesible, sustituirlo por arena de vidrio no resulta rentable. Esto refuerza incluso más, la necesidad de incentivos que promuevan la utilización de arena de vidrio.

Como trabajos futuros, se plantea enriquecer el modelo matemático incorporando el costo por viaje y la consideración de diferentes tamaños de camiones, a fin de obtener una representación más realista de la logística. Asimismo, resulta pertinente profundizar en el estudio del proceso productivo para identificar oportunidades de mejora y complementar el análisis con una evaluación financiera más detallada. Del mismo modo, se recomienda continuar explorando alternativas de valorización para la arena de vidrio que contribuyan a incrementar la rentabilidad del sistema. Finalmente, se sugiere seguir analizando posibles aplicaciones para el multilaminado en la búsqueda de oportunidades de circularización.

Referencias

[1] Bocken, Nancy M. P., Ingrid de Pauw, Conny Bakker, y Bram van der Grinten. 2016. “Product Design and Business Model Strategies for a Circular Economy.” *Journal of Industrial and Production Engineering* 33 (5): 308–320.

[2] Den Hollander, M. C., C. A. Bakker, y E. J. Hultink. 2017. “Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms.” *Journal of Industrial Ecology* 21 (3): 517–525. https://www.researchgate.net/publication/317183411_Product_Design_in_a_Circular_Economy_Development_of_a_Typology_of_Key_Concepts_and_Terms_Key_Concepts_and_Terms_for_Circular_Product_Design.

[3] Pokharel, Subash, y Ashish Mutha. 2009. “Perspectives in Reverse Logistics: A Review.” *Resources, Conservation and Recycling* 53 (4): 175–182. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344908002024.

[4] G-advisory. 2018. *Descripción de los Sistemas de Depósito y Reembolso: Ventajas e Inconvenientes*. Informe encargado por la Asociación de Supermercados de Chile (ASACH). https://economiacircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/06/16-SUPERMERCADOS-DE-CHILE-1.pdf.

[5] Görgün, Erdem, Kardelen Afrodit Adsal, Aybike Mısır, Eyüp Vural Aydın, Çağdaş Evrim Ergün, Nihan Keskin, Aynur Acar, y Şeyla Ergenekon. 2021. “Deposit Refund System for Beverage Containers as a Best Practice Example for Recycling Maximization.” *Environmental Research and Technology* 199–205. Estambul: Yıldız Technical University Press. https://doi.org/10.35208/ert.862611.

[6] TOMRA. 2020. *Sistema de Depósito y Reembolso en Noruega: Lecciones Aprendidas y la Evolución del Modelo*. https://www.tomra.com/es-es/reverse-vending/media-center/feature-articles/norway-deposit-return-scheme.

[7] TOMRA. 2021. “Return to Retail: Simplifying Recycling for Consumers.” Publicado el 1 de noviembre de 2021. https://www.tomra.com/es-es/reverse-vending/media-center/feature-articles/return-to-retail-deposit-return-systems.

[8] Azevedo, Bruno Duarte, Luiz Felipe Scavarda, Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado, y Maryegli Fuss. 2021. “Improving Urban Household Solid Waste Management in Developing Countries Based on the German Experience.” *Waste Management* 120: 772–783. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.001.

[9] Uruguay. 2007. *Decreto Nº 260/007: Reglamentación de la Ley Nº 17.849*. Montevideo. https://www.impo.com.uy/bases/decretos/260-2007.

[10] Ministerio de Ambiente (Uruguay). 2023. *Del Plan de Gestión de Envases al Plan Vale*. Montevideo. https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/noticias/del-plan-gestion-envases-plan-vale.

[11] Cámara de Industrias del Uruguay. 2022. *Plan Vale: Un Plan Nacional para Recuperar y Valorizar Envases y Materiales de Envasado Posconsumo*. Montevideo. https://www.ciu.com.uy/novedades-ciu/plan-vale/.

[12] CEMPRE Uruguay. 2022. Análisis de Capacidades de Reciclaje de Vidrio en Uruguay. Octubre de 2022. https://cempre.org.uy/wp-content/uploads/2022/10/Analisis-de-Capacidades-de-Reciclaje-de-Vidrio-en-Uruguay-comprimido.pdf.

[13] Lessard, Jean-Martin, Guillaume Habert, Arezki Tagnit-Hamou, y Ben Amor. 2021. "Tracking the Environmental Consequences of Circular Economy over Space and Time: The Case of Close- and Open-Loop Recovery of Postconsumer Glass." *Environmental Science & Technology* 55 (17): 11521–11532.

[14] Pozzotive. 2024. *Sitio Web Oficial de Pozzotive*. Último acceso: 20 de mayo de 2024. https://pozzotive.com/.

[15] Ávila Escalante, Anthony Glen. 2022. *Influencia del Vidrio Molido como Agregado Fino en las Propiedades de la Mezcla de Asfalto*. Tesis de maestría, Universidad Peruana Los Andes. https://www.studocu.com/pe/document/universidad-alas-peruanas/ingenieria-civil/tesis-nacio-influencia-del-vidrio-molido-como-agregado-fino-en-las-propiedades-de-la-mezcla-de-asfalto-2022/84534102.

[16] Anochie-Boateng, Joseph K., y Theresa B. George. 2016. "Use of Waste Crushed Glass for the Production of Hot-Mix Asphalt." En *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4)*, Las Vegas, Nevada, EE. UU., 7–11 de agosto de 2016. Proceedings publicados en 2017 por CreateSpace Independent Publishing Platform.

[17] Rewine. 2024. *Sitio Web Oficial de Rewine*. Último acceso: 24 de mayo de 2024. https://www.rewine.cat/es/rewine.

[18] Men Fung Gutiérrez, Fernando. 2020. *Análisis de la Implementación del Sistema de Reciclaje de Depósitos en México*. Tesis de maestría, Centro de Investigación en Ciencias de la Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1823/1/PCER_M_Tesis_2020_Fernando_Men_Fung_Gutierrez.pdf.

[19] Inche M., Jorge, Alfonso Chung P., Javier Del Carpio G., Julio Yenque D., Luis Ráez G., y Daniel Mavila H. 2003. *Diseño y Desarrollo de un Prototipo a Partir de Envases Reciclados*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. https://www.redalyc.org/pdf/816/81660202.pdf.

[20] Maris, E., A. Botta-Genoulaz, y A. Montarnal. 2018. “Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: A Review.” *Recycling*. https://www.mdpi.com/2313-4321/3/1/1.

[21] SIG. 2024. *Sitio Web Oficial de SIG*. Último acceso: 6 de junio de 2024. https://www.sig.biz/en.

[22] Elopak. 2024. *Sitio Web Oficial de Elopak*. Último acceso: 6 de junio de 2024. https://www.elopak.com/es/.

[23] CEMPRE. 2020. *Webinar: Nuevas Tecnologías para el Reciclaje de Multilaminados y Envases Larga Vida*. Noviembre de 2020. https://www.youtube.com/watch?v=dR6rpM69fzo.

[24] Delisa, Carolina. 2021. “Directivo de Envidrio: ‘Teníamos 120 trabajadores en una fábrica que era para 60’.” *El Observador*, 7 de noviembre de 2021. https://www.elobservador.com.uy/nota/directivo-de-envidrio-teniamos-120-trabajadores-en-una-fabrica-que-era-para-60--202111518120.

[25] Uruguay. 1993. *Decreto Nº 283/993. Reglamento Bromatológico Nacional*. Montevideo: Diario Oficial, 22 de junio de 1993. Último acceso: 14 de julio de 2024. https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/283-1993.

[26] Arenas de Vidrio. 2025. *Sitio Web Oficial de Arenas de Vidrio*. Último acceso: 17 de febrero de 2025. https://adv.uy/.

[27] Bitafal. 2024. *Sitio Web Oficial de Bitafal*. Último acceso: 12 de diciembre de 2024. https://bitafal.com.uy/.

[28] Lasso, Antonella, y Santiago Kröger. 2022. *“Seal Coat con polvo de vidrio para mejorar la resistencia al deslizamiento.” Revista VIAL* 148 (noviembre–diciembre): 38–42. Presentado en el XXI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA 2022), Punta del Este, Uruguay, 20–25 de noviembre de 2022. Distribuido por Revistas S.A., Buenos Aires.

[29] Ministerio de Transporte y Obras Públicas (Uruguay). 2024. *Visualizador Vial*. Accedido el 15 de junio de 2024. https://www.gub.uy/ministerio-transporte-obras-publicas/pagina-embebida/visualizador-vial.

[30] Rodrígues Miranda, Adrián, y Florencia Beder. 2017. *Caracterización Industrial Regional de Uruguay*. Documento de Trabajo N.º 06/2017. Montevideo: Instituto de Economía, Universidad de la República. https://desarrolloterritorial.ei.udelar.edu.uy/wp-content/uploads/2021/06/DT-06-2017.pdf.

[31] Instituto Nacional de Estadística (Uruguay). 2011. *Cantidad de Personas Según Departamento y Tramo de Edad. Censo 2011*. Montevideo: Ministerio de Desarrollo Social (MIDES). https://www.gub.uy/ministerio-desarrollo-social/indicador/cantidad-personas-segun-departamento-tramo-edad-censo-2011.

[32] Peters, Max S., y Klaus D. Timmerhaus. 2003. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 5ª ed., 123–173. New York: McGraw-Hill. https://davuniversity.org/images/files/study-material/PLANT%20DESIGN%20AND%20ECONOMICS%20FOR%20CHEMICAL%20ENGINEERS.pdf.

[33] Walkenhorst, Peter, y Tadashi Yasui. 2003. *Quantitative Assessment of the Benefits of Trade Facilitation*. Organisation for Economic Co-operation and Development. https://econwpa.ub.uni-muenchen.de/econ-wp/it/papers/0401/0401008.pdf.

[34] Mercado Libre Uruguay. Autoelevador montacarga nuevo modelo Hangcha 2500 kg. Imagen del producto. Último acceso: 10 de marzo de 2025. Autoelevador Montacarga Eléctrico Hangcha 2500kg - Litio | MercadoLibre

[35] Mercado Libre Uruguay. Autoelevador, Montacarga Nuevo Hangcha 1800 Kg. Imagen del producto. Último acceso: 10 de marzo de 2025. Autoelevador Montacarga Eléctrico Hangcha 1800kg - Litio | MercadoLibre

[36] Mercado Libre Uruguay. Autoelevador Montacarga Eléctrico 1.8t Batería de Litio. Imagen del producto. Último acceso: 10 de marzo de 2025.https://vehiculo.mercadolibre.com.uy/MLU-707997228-autoelevador-montacarga-electrico-18t-bateria-de-litio-_JM

[37] Epicentro Uruguay. 2025. *Autoelevadores Eléctricos*. Imagen del producto. Último acceso: 10 de marzo de 2025. https://www.epicentro.com.uy/autoelevadores-electricos-113-1-categorias#/autoelevadores-electricos-113-1-categorias.

[38] Calibrafruta Lda. 2025. *Tolva de Recepción y Llenado de Big Bag*. DirectIndustry. Último acceso: 11 de marzo de 2025. https://www.directindustry.es/prod/calibrafruta-lda/product-218938-2632506.html.

[39] Nomatech S.R.O. 2025. *Sistema de Llenado de Big Bag*. DirectIndustry. Último acceso: 11 de marzo de 2025. https://www.directindustry.es/prod/nomatech-sro/product-4567808-2572307.html.

[40] Goubard. 2025. *Tolva de Llenado y Elevación Big Bag*. Volquetes Goubard. Último acceso: 11 de marzo de 2025. https://volquetes-goubard.com/produit/tolva-de-llenado-y-elevacion-big-bag/.

[41] Urugestión. 2024. *Proceso en planta actual: Máquina de vidrio*. Documento inédito proporcionado por Urugestión, Montevideo.

[42] Ultimation Inc. 2025. *Adjustable Speed Variable Belt Conveyors*. Ultimation Industries LLC. Último acceso: 10 de marzo de 2025. https://www.ultimationinc.com/replacement-parts/buy-belt-conveyors/adjustable-speed-variable/.

[43] Mercado Libre. "Cinta Transportadora de Granos Inoxidable 8m J Hartwich." *Mercado Libre Uruguay*. Último acceso: 10 de marzo de 2025. https://vehiculo.mercadolibre.com.uy/MLU-676913444-cinta-transportadora-de-granos-inoxidable-8m-j-hartwich-_JM#polycard_client=search-nordic&position=21&search_layout=stack&type=item&tracking_id=f71be12d-e71c-4790-87dc-11ed8026f2e7.

[44] Agrofy. 2025. *Cinta Transportadora Ruly JP350*. Último acceso: 10 de marzo de 2025. https://www.agrofy.com.uy/cinta-transportadora-ruly-jp350.html.

[45] Molino para Plásticos. 2025. *Molinos y Trituradoras – Conéctate con Expertos en Reciclaje*. Último acceso: 15 de marzo de 2025. https://www.molinoparaplasticos.com/contacto-molinos-y-trituradoras-conectate-con-expertos-en-reciclaje/.

[46] Eagle Crusher. 2025. *Molinos de Martillos*. Último acceso: 15 de marzo de 2025. https://eaglecrusher.com/molinos-de-martillos/?lang=es.

[47] Abyper. 2025. *Trituradores para Vidrios TV*. Último acceso: 15 de marzo de 2025. https://www.abyper.com.ar/abecom/Trituradores-para-Vidrios-TV.

[48] JXSC Machine. 2024. *Trituradora de Martillos*. Última modificación 2024. https://www.jxscmachine.com/es/trituradora-de-rocas/trituradora-de-martillos/.

[49] Magri. 2025. *Harnero Seleccionadora Tamiz Tromel Rotativa 1.45 m*. Magri Chile. Último acceso: 20 de marzo de 2025. https://www.magri.cl/harnero-seleccicionadora-tamiz-tromel-rotativa-145m.

[50] Filtra Vibración. 2025. *Tamizadora Circular Vibratoria ZEUS*. Último acceso: 20 de marzo de 2025. https://filtra.com/tamizadora-circular-vibratoria-zeus/.

[51] Eversun. 2025. *Máquina de Tamizado de Polvo de Alta Calidad*. Último acceso: 20 de marzo de 2025. https://www.vibrosievingmachine.com/es/products/powder-sieving-machine/.

[52] Galaxy Sivtek. 2025. *Sivtek Super Gyro Separator*. Último acceso: 10 de marzo de 2025. https://www.galaxysivtek.com/products/high-vibration-sifters/gyratory-screeners/.

[53] Grupo Pla Constructora. [s.f.]. “Costo por Metro Cuadrado Construcción Uruguay.” *Grupo Pla Constructora (sitio web)*. Último acceso: 16 de marzo de 2025. https://grupoplaconstructora.uy/costo-por-metro-cuadrado-construccion-uruguay/.

[54] Computrabajo. 2025. “Salarios de Operario de Producción en Uruguay.” *Computrabajo Uruguay*. Último acceso: 16 de marzo de 2025. https://uy.computrabajo.com/salarios/operario-de-produccion.

[55] Computrabajo Uruguay. 2025. “Salario de Administrativo/a en Uruguay.” *Computrabajo Uruguay (sitio web)*. Último acceso: 16 de marzo de 2025. https://uy.computrabajo.com/salarios/administrativoa.

[56] UTE (Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas). 2025. *Pliego Tarifario Enero 2025*. Montevideo: UTE. https://www.ute.com.uy/sites/default/files/docs/Pliego%20Tarifario%20Enero%202025.pdf.

Anexo

Tabla 33: Distancias entre departamentos en km

x	Artigas	Canelones	Cerro Largo	Colonia	Durazno	Flores	Florida	Lavalleja	Maldonado
Artigas	0	585	397	613	412	454	499	624	679
Canelones	585	0	393	160	154	145	67	121	148
Cerro Largo	397	393	0	494	291	331	321	278	323
Colonia	613	160	494	0	203	163	181	274	304
Durazno	412	154	291	203	0	41	88	213	268
Flores	454	145	331	163	41	0	127	252	292
Florida	499	67	321	181	88	127	0	126	180
Lavalleja	624	121	278	274	213	252	126	0	73
Maldonado	679	148	323	304	268	292	180	73	0
Montevideo	645	51	400	179	223	193	117	122	130
Paysandú	331	327	437	297	223	182	310	441	475
Río Negro	441	271	495	209	204	163	291	384	418
Rivera	178	492	243	523	319	361	406	520	562
Rocha	651	217	282	373	330	363	243	116	83
Salto	206	443	422	412	338	298	425	550	590
San José	551	50	405	110	138	99	73	163	198
Soriano	436	239	464	178	173	132	259	353	387
Tacuarembó	206	380	202	411	207	249	294	419	473
Treinta y Tres	483	278	113	428	264	304	246	165	211

x	Montevideo	Paysandú	Río Negro	Rivera	Rocha	Salto	San José	Soriano	Tacuarembó	Treinta y Tres
Artigas	645	331	441	178	651	206	551	436	206	483
Canelones	51	327	271	492	217	443	50	239	380	278
Cerro Largo	400	437	495	243	282	422	405	464	202	113
Colonia	179	297	209	523	373	412	110	178	411	428
Durazno	223	223	204	319	330	338	138	173	207	264
Flores	193	182	163	361	363	298	99	132	249	304
Florida	117	310	291	406	243	425	73	259	294	246
Lavalleja	122	441	384	520	116	550	163	353	419	165
Maldonado	130	475	418	562	83	590	198	387	473	211
Montevideo	0	375	307	540	198	491	95	276	428	287
Paysandú	375	0	124	348	544	121	281	120	236	486
Río Negro	307	124	0	428	487	240	221	32	316	468
Rivera	540	348	428	0	524	333	458	421	113	355
Rocha	198	544	487	524	0	659	266	455	456	169
Salto	491	121	240	333	659	0	396	235	222	508
San José	95	281	221	458	266	396	0	190	346	329
Soriano	276	120	32	421	455	235	190	0	309	437
Tacuarembó	428	236	316	113	456	222	346	309	0	288
Treinta y Tres	287	486	468	355	169	508	329	437	288	0

Tabla 34: Distancias entre clientes y departamentos

Departamento /Clientes	Baldosa1	Baldosa2	Bloque1	Bloque2	A1	A2	A3	A4	A5	H1	H2	H3
Artigas	611	612	588	584	613	617	614	619	584	614	601	680
Canelones	51	52	62	27	51	52	51	54	24	54	42	146
Cerro Largo	391	391	418	387	390	386	374	389	385	386	403	322
Colonia	184	184	126	173	187	187	204	186	174	186	168	306
Durazno	207	209	172	176	206	207	200	209	173	209	191	269
Flores	198	198	138	172	199	199	197	200	170	200	183	290
Florida	114	115	89	89	116	116	113	116	86	116	104	182
Lavalleja	114	113	168	127	114	113	97	113	127	113	134	84
Maldonado	120	120	180	162	120	119	102	120	142	119	148	4
Montevideo	8	9	55	26	12	12	28	11	23	11	12	128
Paysandú	381	381	320	355	383	383	373	383	347	382	365	472
Río Negro	311	313	255	299	316	316	316	315	290	315	297	416
Rivera	519	519	495	490	520	523	500	521	478	521	508	564
Rocha	189	189	249	210	190	188	173	189	207	189	217	82
Salto	496	496	435	470	499	499	489	498	462	498	480	588
San José	100	101	39	80	103	103	97	103	70	102	85	195
Soriano	281	282	223	268	284	284	285	284	258	283	266	385
Tacuarembó	406	411	383	380	408	408	388	409	366	409	396	474
Treinta y Tres	279	278	331	291	279	278	261	278	279	278	299	210

Observación Tabla 34: A representa Asfalto y H representa Hormigón; ejemplo: A1 es Asfalto1.

Tabla 35: Egresos fijos gravados por impuestos por año

Egresos fijos gravados por impuestos (USD)										
Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costos operativos	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600
Egresos fijos Gravados por impuestos	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600	383.600

Tabla 36: Gastos no desembolsables por año

Gastos no Desembolsables Depreciación (USD)										
Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cintas y autoelevador	3.300	3.300	3.300	3.300	3.300	3.300	3.300	3.300	3.300	3.300
Tolva	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Molino triturador	8.467	8.467	8.467	8.467	8.467	8.467	8.467	8.467	8.467	8.467
Cernidor	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150	1.150
Gastos no Desembolsables Depreciación	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917	13.917