Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

Dimensionamiento de un patio intermedio de madera para reducir los costos de logística forestal: modelización aplicada

Dimensionamento de um pátio intermediário de madeira para reduzir custos de logística florestal: modelagem aplicada

Sizing an intermediate wood yard to reduce forest logistics costs: applied modeling

Vitória Bianca Lima Dantas – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), vitoria_bianca@ufms.br
Fernando Jose Gomez Paredes – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), fernando.gomez@ufms.br

Resumen: En el transporte de madera a las fábricas de celulosa, los períodos lluviosos comprometen la transitabilidad de los caminos internos de las fincas y obligan a las empresas a revestir con grava extensas redes viales para garantizar el suministro. Este trabajo desarrolló un modelo para dimensionar un patio intermedio de madera capaz de reducir la necesidad de mantener existencias en las fincas durante las lluvias y, con ello, los costos de revestimiento con grava. Se trata de un estudio de caso en una empresa forestal de celulosa del este de Mato Grosso do Sul, con modelización en una hoja de cálculo a partir de la planificación de 2027. Se calcularon escenarios de capacidad de 30.000, 40.000, 50.000 y 60.000 m³, considerando las existencias de seguridad, la precipitación y los costos de implantación y operación. El problema se formuló con el ahorro neto anual como función objetivo y dos rotaciones mensuales como restricción. El patio recomendado, de 60.000 m³, con aproximadamente 24.100 m² y tres grúas, absorbe el 70% de las existencias de seguridad anuales de 1,7 millones de m³ y reduce el costo anual de envío directo de R$ 32,8 millones a R$ 25,4 millones, al evitar la colocación de piedra triturada en parte de los caminos internos. Con una inversión de R$ 5,2 millones, el ahorro neto es de R$ 7,3 millones anuales, con retorno en aproximadamente 8,5 meses. El número de grúas determina el costo de cada tamaño de patio. El análisis de sensibilidad confirmó la viabilidad ante variaciones del 20% en las principales variables y con la estimación más conservadora de productividad de las grúas.

Palabras clave: Logística forestal. Patio intermedio. Gestión de inventarios. Caminos forestales. Modelización de escenarios.

Resumo: No transporte de madeira para fábricas de celulose, os períodos chuvosos comprometem a trafegabilidade das estradas internas das fazendas e obrigam as empresas a cascalhar extensas malhas viárias para garantir o abastecimento. Este trabalho desenvolveu um modelo para dimensionar um pátio intermediário de madeira capaz de reduzir a necessidade de estoque nas fazendas durante a chuva e, com isso, os custos de cascalhamento. Trata-se de um estudo de caso em uma empresa do setor florestal de celulose da região leste de Mato Grosso do Sul, com modelagem em planilha a partir do planejamento de 2027. Foram calculados cenários de 30.000, 40.000, 50.000 e 60.000 m³ de capacidade, considerando estoque seguro, precipitação e custos de implantação e operação. O problema foi formulado com a economia líquida anual como função objetivo e o número de giros mensais fixado em dois como restrição. O pátio recomendado, de 60.000 m³, com cerca de 24.100 m² e três gruas, absorve 70% do estoque seguro anual de 1,7 milhão de m³ e reduz o custo anual de envio direto de R$ 32,8 milhões para R$ 25,4 milhões, ao evitar brita em parte das estradas internas. Com investimento de R$ 5,2 milhões, a economia líquida é de R$ 7,3 milhões por ano, com retorno em cerca de 8,5 meses. O número de gruas define o custo de cada porte de pátio. A análise de sensibilidade confirmou a viabilidade diante de variações de 20% nas principais variáveis e com a estimativa mais conservadora de produtividade das gruas.

Palavras-chave: Logística florestal. Pátio intermediário. Gestão de estoques. Estradas florestais. Modelagem de cenários.

Abstract: In wood transport to pulp mills, rainy periods impair the trafficability of internal farm roads and force companies to gravel extensive road networks to secure supply. This

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

study aimed to develop a model for sizing an intermediate wood yard able to reduce the stock kept on farms during the rainy season and, consequently, graveling costs. It is a case study in a pulp forestry company in eastern Mato Grosso do Sul, Brazil, using spreadsheet modeling based on the 2027 supply plan. Scenarios of 30,000, 40,000, 50,000 and 60,000 m³ of capacity were evaluated, considering safety stock, rainfall, transport, and investment and operating costs. The problem was formulated with annual net savings as the objective function and the number of monthly turnovers fixed at two as a constraint. The recommended yard, with 60,000 m³, an area of about 24,100 m² and three log loaders, absorbs 70% of the annual safety stock of 1.7 million m³ and reduces the annual cost of direct shipment from BRL 32.8 million to BRL 25.4 million by avoiding the placement of crushed stone on part of the internal roads. With an investment of BRL 5.2 million, net savings reach BRL 7.3 million per year, with a payback of about 8.5 months. The study showed that the number of log loaders determines the cost of each yard size. The sensitivity analysis confirmed feasibility under 20% variations in the main variables and with the more conservative loader productivity estimate.

Keywords: Forest logistics. Intermediate wood yard. Inventory management. Forest roads. Scenario modeling.

1. Introducción

El sector de bosques plantados ocupa una posición estratégica en la economía brasileña, y Mato Grosso do Sul se ha convertido en el eje principal de su expansión. Según la Investigación de Producción de Extracción Vegetal y Silvicultura (PEVS) del IBGE, el área silvicultura del estado pasó de 1,459,944 ha en 2024 a 1,902,957 ha en 2025, un crecimiento del 30,3%, de los cuales el 99,7% se cultiva con eucalipto (IBGE, 2026). Este avance está asociado con la instalación de grandes fábricas de celulosa en la región conocida como Valle de la Celulosa, que exigen un flujo continuo y elevado de madera.

En este contexto, la logística de suministro es decisiva para la competitividad de las empresas. El transporte por carretera predomina en el sector y representa una parte significativa del costo de la madera entregada en fábrica, que puede variar entre el 38% y el 66% del costo final de adquisición según la distancia recorrida (SEIXAS; WIDMER, 1993). Además del transporte, las empresas deben garantizar que la red de caminos forestales soporte durante todo el año el tránsito de combinaciones pesadas de vehículos, como los bitrenes y los tritrenes.

Las condiciones de las carreteras son un obstáculo conocido en el estado. Ya en 2017, cuando el área de eucalipto de Mato Grosso do Sul superó un millón de hectáreas, representantes del sector señalaban que las caminos vecinales, junto con la logística de transporte e infraestructura, eran uno de los principales factores de aumento del costo de producción (HADDAD, 2017). El tema es actual: en 2026, la Secretaría Nacional de Tránsito autorizó, como prueba por un año, la circulación de 41 hexatrens, composiciones de hasta 60 m de largo y 250 t de peso bruto, en tramos de carreteras estatales no pavimentadas de la región, lo que demuestra la importancia de las carreteras de tierra para el flujo de madera (OLIVEIRA, 2026).

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

En el sector forestal, la madera recorre dos tipos de vías hasta la fábrica: primero, los accesos externos e internos de las fincas, generalmente sin pavimentar; después, las carreteras pavimentadas. Los caminos de tierra necesitan adecuación y mantenimiento constantes, con aplicación de arcilla y piedra triturada, para soportar las combinaciones pesadas de vehículos, lo que representa un elevado costo de infraestructura para las empresas (LOPES; MACHADO; SOUZA, 2002; MACHADO, 2013). Durante las lluvias intensas, la transitabilidad se deteriora, aumenta el riesgo de que los camiones queden atascados, se dificulta la extracción de madera y peligra el reabastecimiento de las fábricas. En Ribas do Rio Pardo, uno de los municipios del Vale da Celulose, las lluvias de principios de 2023 dejaron tramos de caminos vecinales intransitables, y el ayuntamiento informó que el problema se repite cada verano (MATOS, 2023). Por ello, las empresas deben preparar y mantener una mayor longitud de caminos revestidos, lo que eleva los costos de infraestructura y operación.

Una alternativa para reducir esta dependencia es utilizar un patio intermedio de madera que funcione como centro de distribución entre las áreas de cosecha y la fábrica. En la logística empresarial, estas instalaciones intermedias se utilizan para reducir el costo total del sistema, aunque añaden costos de almacenamiento y manipulación (BALLOU, 2006). Durante los períodos de buena transitabilidad, la madera se extraería anticipadamente de las fincas y se almacenaría en el patio; en el período lluvioso, la fábrica se abastecería de estas existencias mediante vías en mejores condiciones. Así se reduce el volumen que debe extraerse de las fincas durante las lluvias y, por tanto, la longitud de los caminos internos que necesitan revestimiento con grava. Este estudio trata únicamente los accesos internos, ya que reducir el revestimiento con grava en los accesos externos podría comprometer el paso de los camiones.

La literatura aborda por separado los temas implicados en esta decisión: el dimensionamiento y los costos de patios y terminales intermedios (KONS; LA HERA; BERGSTRÖM, 2020; VÄÄTÄINEN et al., 2021), la logística de transporte y suministro de madera (SEIXAS; WIDMER, 1993) y los efectos de la lluvia sobre la transitabilidad y los costos de los caminos forestales (LOPES; MACHADO; SOUZA, 2002; ARRIVABENI, 2021). Sin embargo, son escasos los estudios que integran estas dimensiones para evaluar el patio intermedio como estrategia para reducir la necesidad de revestir con grava los accesos internos durante los períodos lluviosos, especialmente en los bosques de eucalipto del Cerrado de Mato Grosso do Sul. Por ello, este trabajo plantea la siguiente pregunta: ¿qué capacidad de almacenamiento de un patio intermedio permite reducir la necesidad de mantener existencias de madera en las fincas durante los períodos de mayor precipitación, manteniendo el suministro industrial y reduciendo los costos de revestimiento con grava de los caminos internos?

El objetivo general es desarrollar un modelo para evaluar las diferentes alternativas de dimensionamiento de un patio intermedio de madera, teniendo en cuenta las existencias de

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

seguridad, la precipitación, el transporte, la capacidad operativa y los costes de implantación y operación. Los objetivos específicos son:

a) caracterizar el flujo actual de suministro de madera y la estacionalidad de las precipitaciones en la región estudiada;
b) establecer los parámetros operativos y de costes del transporte y del patio intermedio;
c) calcular escenarios de capacidad del patio de 30.000, 40.000, 50.000 y 60.000 m³;
d) estimar, para cada escenario, la superficie necesaria, la flota, los costos de implantación (CAPEX) y de operación (OPEX), y la reducción potencial de los costos de revestimiento con grava;
e) identificar la alternativa mejor relacionada con el coste, la capacidad y el servicio de la fábrica.

Desde un punto de vista práctico, el estudio ofrece a las empresas del sector una herramienta de apoyo a la decisión para planificar el abastecimiento en el período lluvioso. Desde el punto de vista académico, contribuye al área de Logística y Investigación Operativa de la Ingeniería de Producción mediante la aplicación del modelado de escenarios a un problema real de la cadena de suministro forestal.

2. Marco teórico

Este capítulo reúne los conceptos que sustentan el dimensionamiento del patio intermedio. Inicialmente se describe la logística forestal y sus etapas, para situar donde el patio se inserta en el flujo de la madera (sección 2.1). A continuación, se presenta el patio como un centro de distribución, basado en la logística empresarial y en experiencias de terminales intermedios (sección 2.2). Por último, se discute la relación entre la lluvia, las carreteras forestales y las existencias de seguridad, que define el problema tratado en este trabajo (sección 2.3).

2.1 Logística forestal

La logística forestal comprende la planificación y ejecución de los flujos de madera desde la cosecha hasta la unidad de consumo. En las empresas de celulosa, esta cadena tiene que entregar grandes volúmenes continuamente, ya que la fábrica opera sin interrupciones y cualquier falta de materia prima compromete la producción. Generalmente, el flujo de la madera sigue los siguientes pasos:

a) cosecha: corta de los árboles y procesamiento en trozas dentro del rodal;
b) saca: extracción de las trozas desde el interior del rodal hasta el borde de los caminos;
c) almacenamiento en campo: formación de pilas de madera junto a los caminos, a la espera del transporte;

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

d) carga: colocación de las trozas en los camiones mediante grúas forestales;
e) transporte principal: desplazamiento de la madera por las carreteras interiores, accesos exteriores y carreteras hasta la fábrica;
f) recepción: pesaje, descarga y almacenamiento en el patio de la fábrica.

En Brasil, el transporte principal de madera se realiza casi exclusivamente en camiones. Seixas y Widmer (1993) señalan que el costo de ese transporte, en empresas de celulosa y tableros del estado de São Paulo, oscilaba entre el 38% y el 66% del costo final de la madera entregada en fábrica, para distancias medias de 45 a 240 km. Los autores también destacan que las restricciones de los caminos, como pendientes y tramos intransitables con lluvia, modifican la elección de vehículos y el costo total de la operación. El patio intermedio propuesto en este trabajo se sitúa entre el almacenamiento en campo y el transporte a la fábrica.

2.2 Centros de distribución y patios intermedios de madera

En la logística empresarial, el almacenamiento permite equilibrar la oferta y la demanda cuando no se producen al mismo ritmo. Ballou (2006) considera el costo logístico total como resultado de compensaciones entre transporte, inventario y nivel de servicio: una instalación intermedia aumenta los costos de almacenamiento y manipulación, pero puede reducir los de transporte o los riesgos de desabastecimiento. Por ello, crear un punto de almacenamiento exige evaluar el costo total del sistema, y no solo el costo individual de cada actividad. En el caso de la madera, este centro de distribución adopta la forma de un patio: un área preparada para recibir, apilar y expedir trozas, con accesos adecuados para el tráfico pesado y equipos de carga.

Los patios o terminales intermedios son puntos de almacenamiento situados entre las zonas de cosecha y la fábrica. En Finlandia y Suecia, se utilizan justamente para hacer frente a períodos de baja transitabilidad: durante el derretimiento y las lluvias, cuando las carreteras y los suelos pierden capacidad de soporte, la madera debe permanecer almacenada por más tiempo y se lleva de antemano a los terminales para garantizar el suministro continuo de la industria (VÄÄTÄINEN et al., 2021).

El dimensionamiento de estas existencias implica compensaciones. Al simular el patio de madera de una fábrica sueca de celulosa, Kons, La Hera y Bergström (2020) mostraron que ampliar el almacenamiento auxiliar a aproximadamente 89.000–99.000 m³ permitiría limitar la edad de las trozas almacenadas y reducir el tiempo de trabajo de las máquinas. Por otro lado, Seixas y Widmer (1993) observaron que, en su estudio, la transferencia mediante patios intermedios no era económica porque los costos y tiempos adicionales de carga y descarga superaban los beneficios. Estos resultados indican que la viabilidad del patio depende de las condiciones específicas de cada operación, lo que justifica el análisis por escenarios.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

Otro aspecto relevante es el tiempo de permanencia de la madera almacenada. Eufrade-Junior et al. (2021) comprobaron que las trozas de eucalipto almacenadas al aire libre durante el período lluvioso presentaban una humedad final mayor (36,4%) que las almacenadas durante el período seco (31,1%), lo que afecta al peso transportado y a la calidad de la materia prima.

2.3 Caminos forestales período lluvioso y existencias de seguridad

Las carreteras forestales son, en su mayoría, sin pavimentación y sin capa selante, lo que las hace más vulnerables a la degradación por el agua y el tráfico pesado (ARRIVABENI, 2021). Para mantener la transitabilidad, se aplica una capa de revestimiento primaria, como piedra triturada, cuya principal ventaja es reducir la frecuencia y el costo de los mantenimientos (MACHADO, 2013).

El estándar de los caminos influye directamente en los costos. Lopes, Machado y Souza (2002) mostraron que, en caminos de doble carril con revestimiento primario, dicho revestimiento representa entre el 35% y el 55% del costo de construcción, y que la velocidad media de los vehículos disminuye de unos 41 km/h en los caminos principales a 24 km/h en los terciarios, lo que tiende a elevar el costo del transporte. Arrivabeni (2021) también comprobó que el tipo de mantenimiento adoptado, con o sin reposición de grava, influye directamente en la flota necesaria para atender la demanda. Estos resultados refuerzan que reducir la longitud de los caminos que deben revestirse con grava para el período lluvioso puede generar un ahorro relevante.

Las existencias de seguridad son la forma habitual de superar temporalmente esta restricción. La gestión de inventarios busca mantener material suficiente para satisfacer la demanda al menor costo posible: las existencias de seguridad son la parte mantenida para absorber incertidumbres de oferta y demanda, mientras que la rotación del inventario indica cuántas veces se renuevan las existencias medias durante un período determinado (BALLOU, 2006). En el suministro a fábricas de celulosa, la principal incertidumbre de oferta está relacionada con el clima. Durante las lluvias se restringe la extracción de madera de las fincas, y la fábrica depende de las existencias acumuladas en campo, en áreas atendidas por caminos revestidos con grava que aun así no garantizan plena seguridad, en el patio de la fábrica o en patios intermedios. Por tanto, el dimensionamiento de las existencias de seguridad debe considerar la duración e intensidad del período lluvioso, el consumo diario de la fábrica y la capacidad de transporte disponible.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

3. Método

En cuanto a la clasificación, esta investigación es aplicada, de enfoque cuantitativo, y adopta el estudio de caso como procedimiento técnico, con el uso de modelado y análisis de escenarios, según las categorías de investigación en Ingeniería de Producción descritas por Miguel (2012). El patio intermedio fue modelado como un centro de distribución, basado en los conceptos de compensación de costes logísticos de Ballou (2006). El caso fue elegido a partir de una empresa del sector forestal de la celulosa ubicada en la región oriental de Mato Grosso do Sul, en la que se realizó la prácticas supervisadas, lo que permitió el acceso a los datos de planificación y costes. Sin embargo, el modelo no depende de las particularidades de esa empresa: ya que se construye a partir de parámetros (volumen mensual, días de lluvia, capacidad del patio, productividad de las grúas y costes unitarios), su aplicación a otra empresa o región solo requiere la sustitución de estos parámetros. Por cuestiones de confidencialidad, se omitió el nombre de la empresa y de las explotaciones, y parte de los valores de volumen y costo se ajustaron por factores de proporcionalidad. Este procedimiento no altera las relaciones entre las variables ni las conclusiones del estudio.

El trabajo siguió las etapas de modelización en investigación operativa descritas por Hillier y Lieberman (2013): definición del problema, recopilación de datos, definición de parámetros, construcción del modelo, cálculo de escenarios, análisis de resultados y análisis de sensibilidad. La investigación operativa aplica métodos cuantitativos para apoyar decisiones en sistemas complejos. Entre sus técnicas, el análisis de escenarios permite comparar alternativas bajo los mismos supuestos, mientras que el análisis de sensibilidad verifica cómo cambian los resultados cuando varían parámetros inciertos.

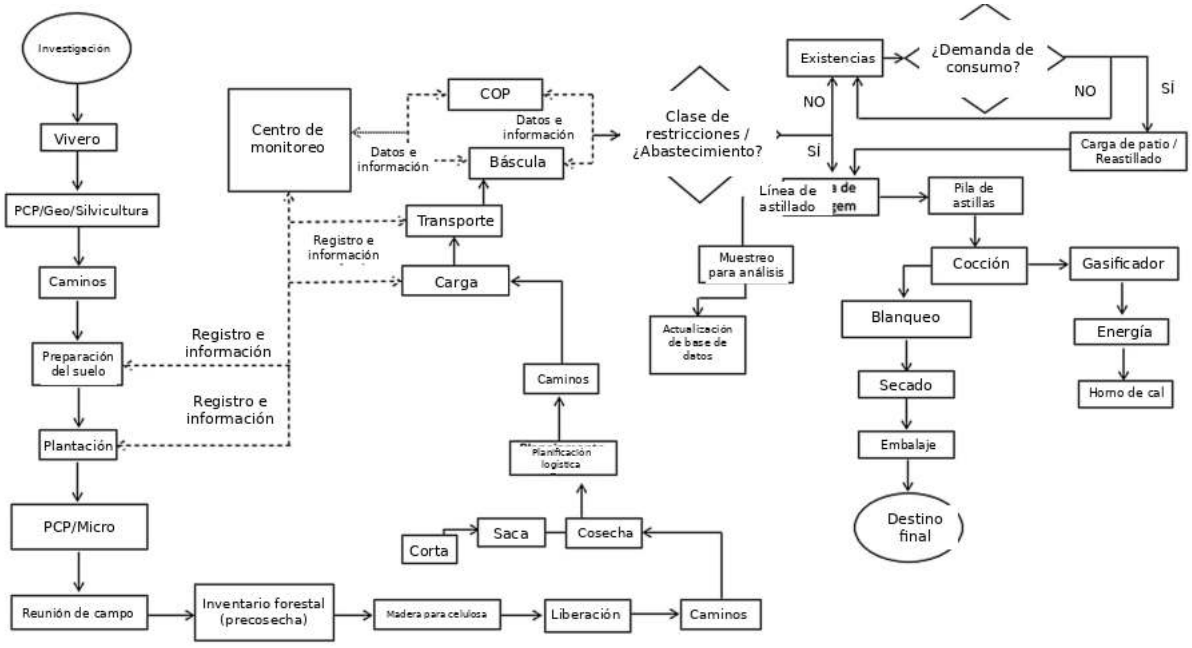
3.1 Caracterización del problema

El flujo de madera desde las fincas estudiadas hasta la fábrica es continuo, entre 14.400 y 18.600 m³ diarios, según el mes. Como la empresa todavía no dispone de una instalación industrial en el estado, la madera se transporta a largas distancias hasta la fábrica, y el volumen analizado corresponde a la parte del suministro procedente de las fincas de la región. En los días lluviosos, la extracción de madera de los rodales depende de caminos internos revestidos con piedra triturada, denominados en este trabajo caminos revestidos con grava. En el modelo actual, todo el volumen necesario para abastecer la fábrica en días de lluvia, denominado existencias de seguridad, se almacena en las fincas, y la empresa debe revestir con grava los caminos que permiten acceder a esas existencias. La figura 1 presenta la cadena de suministro de madera de la empresa, desde la producción de plántulas en el vivero hasta la llegada de la madera a la fábrica y su procesamiento.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

Figura 1 – Fluxograma de la cadena de suministro de madera de la empresa estudiada



Fuente: elaborado por la autora (2026).

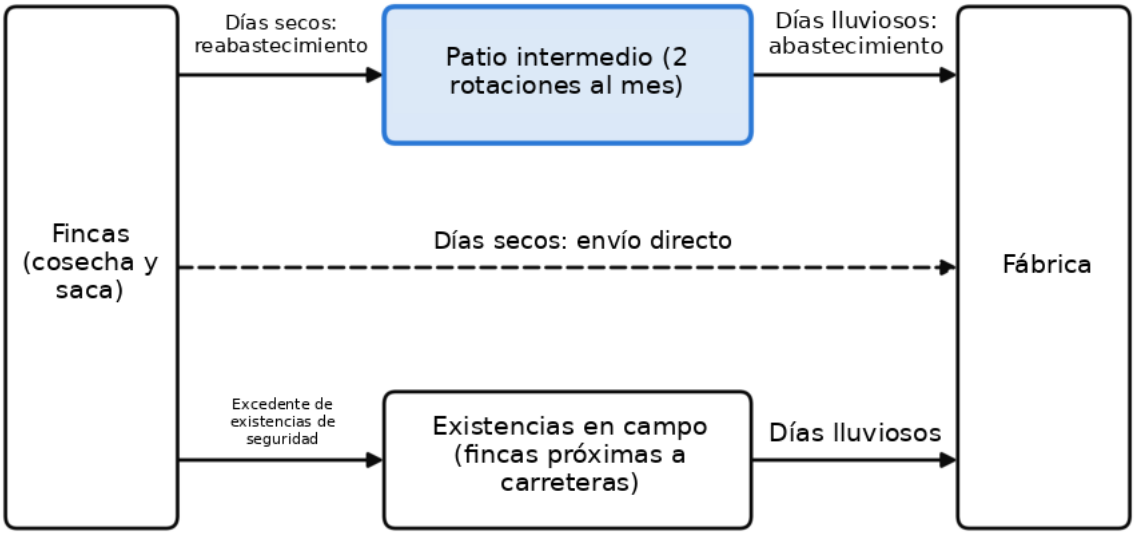
En la planificación de la carga, cada área de cosecha dispone de alternativas operativas para el período seco y el lluvioso. En los días de lluvia se priorizan las áreas con caminos completamente revestidos con grava, para garantizar la transitabilidad y la continuidad del suministro. Para mantener esos caminos, la empresa utiliza técnicas como la incrustación de áridos en la superficie, el refuerzo del suelo con arcilla, el refuerzo con piedra triturada y las mezclas de suelo y piedra triturada, con material extraído de yacimientos próximos a las áreas de operación.

La alternativa propuesta es transferir parte de esa reserva a un patio intermedio, abastecido en los días secos y vaciado en los días lluviosos, reduciendo el volumen que permanece en el campo y, por lo tanto, la extensión de caminos que deben revestirse con grava. La figura 2 muestra cómo el patio se inserta en el flujo de abastecimiento: en los días secos, la madera sigue directamente a la fábrica o se lleva al patio; en los días lluviosos, la fábrica se abastece por el patio y, cuando su capacidad no es suficiente, por el stock que permanece en el campo.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

Figura 2 – Flujo de suministro propuesto con el patio intermedio



Fuente: elaborado por la autora (2026).

3.2 Recopilación de datos

Los datos se obtuvieron de los posibles escenarios de la planificación de abastecimiento de la empresa para el año 2027 y de las estimaciones internas de costes. Se recogieron y se adaptaron: el volumen mensual de madera a entregar a la fábrica, el número de días lluviosos y secos por mes, la capacidad de carga de los vehículos, el número de viajes, los costos por kilómetro de carretera y los costos de implantación y operación del patio.

Además, se utilizó la información obtenida en una visita técnica a las operaciones forestales y a la unidad industrial de la empresa realizada en abril de 2026, que incluyó las áreas de planificación estratégica, microplanificación, carreteras, cargas, centro de seguimiento y patio de madera.

3.3 Parámetros del modelo

El volumen total considerado en este estudio para el año 2027 es de 6.045.788 m³, transportado en composiciones con caja de carga de 65 m³, lo que resulta en unos 93.000 viajes al año, entre 221 y 287 por día.

La proporción de lluvia de cada mes corresponde a la proporción entre los días lluviosos y el total de días del mes, y varía del 8% en julio al 54% en enero. El inventario de seguridad mensual es el volumen que debe estar disponible para los días lluviosos, según la ecuación 1:

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

$$ES_m = V_m \times DC_m / D_m \quad (1)$$

donde ESm son las existencias de seguridad del mes m, en m³; Vm es el volumen que debe entregarse a la fábrica, en m³; DCm es el número de días lluviosos; y Dm es el número de días del mes. La suma de los doce meses da unas existencias de seguridad anuales de 1.693.190 m³.

Los costos de los caminos se calcularon por kilómetro de acceso interno, con un ancho de 4 m, y se adaptaron para este estudio. El costo de envío directo, que consiste en preparar el camino para que los camiones extraigan la madera de las fincas en días lluviosos, es de R$ 87.105/km y tiene dos componentes. El primero, de R$ 37.949/km, corresponde al camino básico, sin piedra triturada, necesario tanto con patio como sin él. El segundo, de R$ 49.156/km, corresponde a la colocación de piedra triturada, necesaria únicamente cuando las existencias para la lluvia permanecen en el campo. En el modelo actual, mantener las existencias de seguridad requiere unos 376 km de caminos revestidos con grava, equivalentes a aproximadamente 4.500 m³ de existencias de seguridad por kilómetro. Así, los costos pueden expresarse por metro cúbico de existencias de seguridad: R$ 8,43 para el camino básico, R$ 10,92 para la colocación de piedra triturada y R$ 19,36 para el costo total de envío directo. Como el camino básico sigue siendo necesario, el ahorro del patio corresponde solamente a la piedra triturada que deja de colocarse. No se consideraron los accesos externos, más anchos, porque siguen siendo necesarios para el paso de los camiones.

El patio se vacía en los días lluviosos y se reabastece en los días secos, llamados en este trabajo ventanas de abastecimiento. Cada ciclo completo de vaciamiento y reabastecimiento se llama giro, y la capacidad de movimiento mensual del patio corresponde a la capacidad física multiplicada por el número de giros.

El número de rotaciones se fijó en dos por mes para todos los escenarios. Después de cada período lluvioso es necesario esperar a que el suelo se seque para que los camiones entren en las fincas sin riesgo de quedar atascados ni necesidad de mantenimiento de emergencia de los caminos. Un tercer reabastecimiento mensual reduciría ese intervalo y exigiría más horas de operación de máquinas y camiones, además del uso de piedra triturada para garantizar el acceso y reabastecer el patio, lo que no es la intención del estudio. También aumentaría el consumo de combustible y reduciría la productividad, comprometiendo el flujo de suministro a la fábrica. Por ello, en los meses en que las existencias de seguridad superann el doble de la capacidad física del patio, el volumen excedente permanece en el campo. Estas existencias deben planificarse en fincas próximas a carreteras pavimentadas, que la empresa ya posee para atender este tipo de situación, de modo que los camiones recorran tramos más cortos de caminos internos en días lluviosos, reduciendo los riesgos de atasco y los problemas de transitabilidad.

La manipulación de la madera en el patio se realiza mediante cargadores forestales de tipo log loader equipados con garra, denominados grúas en este trabajo. Su productividad se

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

calculó a partir del tiempo del ciclo operativo, utilizando datos de un estudio interno. Cada ciclo, que comprende la recogida de madera de la pila, el giro con carga, la descarga y los movimientos auxiliares, dura 63,2 segundos, equivalentes a unos 57 ciclos por hora. Para trozas de 7 m de largo y diámetro medio de 102 mm, cada carga de la garra mueve aproximadamente 3,64 m³. La eficacia global del equipo (OEE) es del 81%, resultado de una disponibilidad mecánica del 90% y una eficiencia operativa del 90%.

El estudio interno aplica el OEE cuatro veces a lo largo del cálculo, sobre el número de ciclos y sobre las horas de trabajo, lo que resulta en 65,205 m³/mes por máquina, una estimación conservadora. En el extremo opuesto, aplicar la OEE una sola vez sobre la capacidad teórica resultaría en 122,695 m³/mes, una estimación optimista. En este trabajo se adoptó una posición intermedia: el OEE se aplicó una vez sobre el número de ciclos, que pasa a 46,1 ciclos por hora, y una vez sobre las horas de trabajo, que pasa a 19,44 horas diarias efectivas. Se obtuvo una productividad de 168 m³/h, 3.265 m³/día y 99.383 m³/mes por máquina. Las estimaciones conservadoras y optimistas se evaluaron en el análisis de sensibilidad.

3.4 Construcción del modelo

El modelo fue construido en una hoja de cálculo. Para cada mes, el volumen absorbido por el patio es el menor valor entre las existencias de seguridad y la capacidad de movimiento (ecuación 2); el resto permanece en el campo (ecuación 3):

$$VP_m = \text{mín}(ES_m; g \times C) \quad (2)$$

$$VC_m = ES_m - VP_m \quad (3)$$

donde VPm es el volumen absorbido por el patio en un mes, en m³; C es la capacidad física del patio, en m³; g es el número de rotaciones mensuales; y VCm es el volumen que permanece como existencias en el campo, en m³.

La superficie necesaria para el patio se dimensionó a partir de su capacidad física. La superficie ocupada por las pilas (ecuación 4) considera el factor de apilamiento y la longitud de las trozas; la superficie total (ecuación 5) reserva un 30% para la circulación y las maniobras de los camiones, de modo que las pilas ocupen el 70% del patio:

$$A_p = C \times f / L \quad (4)$$

$$A_t = A_p / 0{,}7 \quad (5)$$

donde Ap es la superficie de las pilas, en m²; f es el factor de apilamiento de la madera, de 1,97; L es la longitud de las trozas, de 7 m; y At es la superficie total del patio, en m².

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

El número de grúas necesario en cada mes se obtuvo dividiendo el volumen mensual manipulado por la productividad de una máquina (ecuación 6). La manipulación corresponde al doble del volumen absorbido por el patio, ya que cada metro cúbico se descarga al entrar y se carga al salir. El resultado siempre se redondeó al entero inmediatamente superior. Como la necesidad calculada rara vez es un entero exacto, este criterio garantiza que la flota cubra la manipulación de todos los meses y proporciona capacidad disponible: cuando una máquina se detiene para mantenimiento, las demás asumen la operación con menor sobrecarga y menos filas de camiones. La flota de cada escenario corresponde a la mayor necesidad mensual.

$$G_m = \lceil 2 \times VP_m / Pg \rceil \quad (6)$$

donde Gm es el número de grúas en el mes m, ⌈ ⌉ indica el redondeo al entero inmediatamente superior y Pg es la productividad mensual de una grúa, de 99.383 m³/mes.

El modelo se verificó mediante un cálculo diario del mes más crítico, enero. En los días lluviosos, el suministro de la fábrica, de cerca de 15.000 m³/día, se dividió entre el patio y el stock de campo; en los días secos, la fábrica fue abastecida por las áreas secas, y el patio fue reabastecido. El cálculo confirmó que el saldo del patio permanece entre cero y su capacidad física durante el mes.

La decisión de dimensionamiento se formuló como un problema de optimización. La variable de decisión es la capacidad física del patio, C, y la función objetivo consiste en maximizar el ahorro neto anual (ecuación 7), que corresponde al costo de colocación de piedra triturada evitado por el volumen absorbido en el patio, descontado el costo anual de operación:

$$\text{Máx. } E = (\Sigma VP_m) \times cc - OPEX, \text{ con } m = 1, \ldots, 12 \quad (7)$$

donde E es el ahorro neto anual, en reales; cc es el costo de colocación de piedra triturada por metro cúbico de existencias de seguridad, de 10,92 reales/m³; y OPEX es el costo anual de operación del patio, en reales, que depende de la flota de grúas. La función objetivo está sujeta a las siguientes restricciones:

a) el volumen absorbido por el patio en cada mes no podrá superar las existencias de seguridad del mes: $VPm \leq ESm$;
b) el volumen absorbido no puede superar la capacidad de movimiento del patio: $VPm \leq g \times C$;
c) el número de giros es fijo en dos por mes: $g = 2$;
d) la flota de grúas deberá cumplir con el movimiento mensual, según la ecuación 6;
e) la capacidad física se elige entre las alternativas evaluadas: $C \in \{30.000; 40.000; 50.000; 60.000\}$ m³.

Como la capacidad asume pocos valores posibles, el problema fue resuelto por enumeración, calculando la función objetivo para cada alternativa. El retorno de la inversión fue medido por el simple payback (ecuación 8):

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

$$Payback = CAPEX / E \quad (8)$$

donde CAPEX es la inversión de implantación del patio, en reales.

3.5 Escenarios y análisis de sensibilidad

Se calcularon cuatro escenarios de capacidad física del patio: 30.000, 40.000, 50.000 y 60.000 m³. Los costos de cada escenario se calcularon a partir de los costos unitarios de implantación y operación obtenidos en la empresa para un patio con tres conjuntos de máquinas. Los elementos que dependen del número de máquinas, como los equipos, el mantenimiento, el combustible y los operadores de grúa, se ajustaron proporcionalmente a la flota de cada escenario. Los demás, como la báscula, la infraestructura, la tecnología de la información, los operadores logísticos y el alquiler del terreno, se mantuvieron constantes. En el análisis de sensibilidad, los costos de piedra triturada, OPEX, CAPEX y las existencias de seguridad variaron un 20% al alza y a la baja, y se probaron las estimaciones optimista y conservadora de productividad de las grúas.

4. Resultados

4.1 Comparación de los escenarios de capacidad

El volumen absorbido aumenta con la capacidad del patio, pero a un ritmo decreciente (Tabla 1). Pasar de 30.000 a 40.000 m³ añade 180.667 m³/año absorbidos; de 40.000 a 50.000 m³, 170.169 m³; y de 50.000 a 60,000 m³, 131.783 m³. Esto se debe a que, en los meses secos, las existencias de seguridad ya son menores que la capacidad de movimiento, y el espacio adicional queda ocioso.

Tabla 1 – Resultados por escenario de capacidad del patio

Capacidad física (m³)	Manipulación máxima (m³/mes)	Volumen absorbido (m³/año)	Proporción de existencias de seguridad (%)	Existencias en campo (m³/año)	Utilización del patio (%)
30.000	60.000	704.265	41,6	988.925	97,8
40.000	80.000	884.932	52,3	808.258	92,2
50.000	100.000	1.055.101	62,3	638.089	87,9
60.000	120.000	1.186.884	70,1	506.306	82,4

Fuente: elaborado por la autora (2026).

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

La superficie y la flota de grúas de cada escenario se presentan en la tabla 2. Los patios de 30.000 y 40.000 m³ operan con 2 grúas, y los de 50.000 y 60.000 m³ con 3. En el patio de 50.000 m³, la necesidad calculada en el pico es de 2,01 grúas, lo que deja prácticamente una máquina entera disponible; en el de 60.000 m³ es de 2,41, con una disponibilidad restante de aproximadamente 0,6 máquinas.

tabla 2 – Tamaño físico del patio por escenario

Capacidad física (m³)	Superficie de las pilas (m²)	Superficie total (m²)	Grúas calculadas en el pico	Flota de grúas
30.000	8.443	12.061	1,21	2
40.000	11.257	16.082	1,61	2
50.000	14.071	20.102	2,01	3
60.000	16.886	24.122	2,41	3

Fuente: elaborado por la autora (2026).

4.2 Resultados económicos de los escenarios

Todos los escenarios son económicamente viables (tabla 3 y figura 3). Los patios de 50.000 y 60.000 m³ tienen la misma inversión y el mismo costo de operación, porque utilizan la misma flota de 3 grúas. Sin embargo, el de 60.000 m³ absorbe 131.783 m³ adicionales al año y, por ello, presenta el mayor ahorro neto, de R$ 7,33 millones anuales, frente a R$ 5,89 millones del patio de 50.000 m³. El patio de 40.000 m³ tiene el mismo período de retorno que el de 60.000 m³, de 0,71 años, pero, al absorber menos volumen, genera R$ 1,72 millones menos de ahorro anual.

Tabla 3 – Resultado económico por escenario

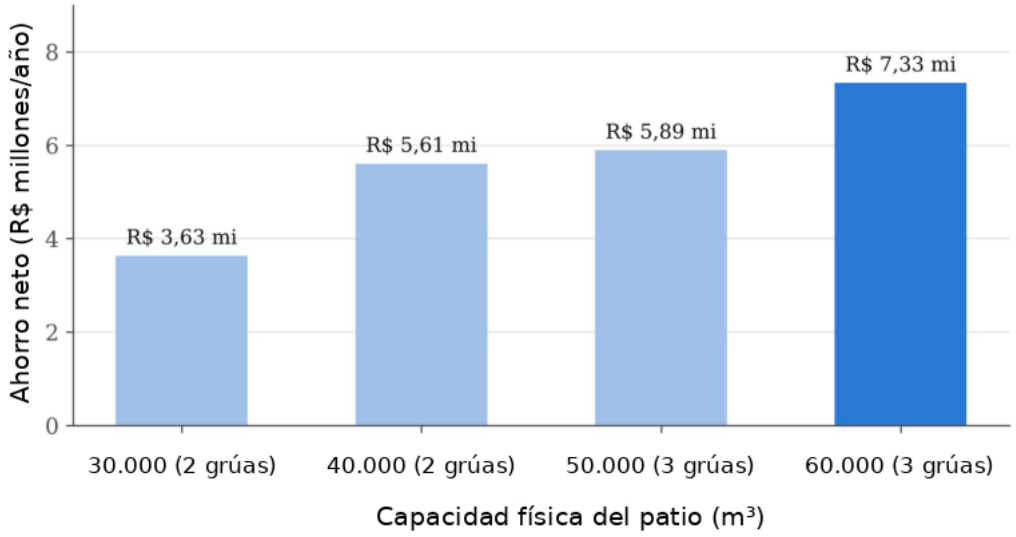
Capacidad física (m³)	Flota de grúas	CAPEX (miles de R$)	OPEX (miles de R$/año)	Costo evitado de piedra triturada (miles de R$/año)	Ahorro neto (miles de R$/año)	Período de retorno (años)
30.000	2	3.994	4.061	7.693	3.632	1,10
40.000	2	3.994	4.061	9.667	5.605	0,71
50.000	3	5.194	5.635	11.525	5.891	0,88
60.000	3	5.194	5.635	12.965	7.330	0,71

Fuente: elaborado por el autor a partir de datos adaptados de la empresa (2026).

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

Figura 3 – Economía neta anual por capacidad física del patio



Fuente: elaborado por la autora (2026).

Como el ahorro neto es la función objetivo del modelo, el patio de 60.000 m³ se seleccionó como la alternativa recomendada, y sus resultados se detallan a continuación.

4.3 Distribución mensual de las existencias de seguridad en el escenario recomendado

En el patio de 60.000 m³, el volumen que permanece en el campo cae de 1.693.190 m³ a 506.306 m³ por año (Tabla 4). De abril a septiembre, el patio solo atiende todas las existencias de seguridad. De octubre a marzo, las existencias de seguridad superan la capacidad de movimiento de 120.000 m³/mes, y el superávit continúa en las granjas, llegando a 121.817 m³ en enero.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

tabla 4 – Distribución mensual dlas existencias de seguridad en el patio de 60.000 m³

Mes	Volumen entregado (m³)	Lluvia (%)	Existencias de seguridad (m³)	Absorbido por el patio (m³)	Mantenido en campo (m³)	Número de grúas
Ene	451.948	54	241.817	120.000	121.817	3
Feb	411.143	49	203.110	120.000	83.110	3
Mar	445.245	36	161.383	120.000	41.383	3
Abr	505.206	22	110.108	110.108	0	3
May	546.152	17	90.169	90.169	0	2
Jun	552.293	11	60.667	60.667	0	2
Jul	569.579	8	45.719	45.719	0	1
Ago	577.652	10	58.546	58.546	0	2
Sep	543.141	19	101.675	101.675	0	3
Oct	489.306	38	185.269	120.000	65.269	3
Nov	472.127	41	194.695	120.000	74.695	3
Dic	481.996	50	240.032	120.000	120.032	3
Total	6.045.788	30	1.693.190	1.186.884	506.306	–

Fuente: elaborado por el autor a partir de datos adaptados de la empresa (2026).

Las 3 grúas son necesarias de septiembre a abril. De mayo a agosto bastan 2, y en julio solamente 1. Las máquinas disponibles durante este período pueden destinarse al mantenimiento preventivo programado o cederse temporalmente a otras operaciones de la empresa, como la carga en campo, aumentando el aprovechamiento de la flota durante el año.

4.4 Inversión costos y resultados económicos del patio recomendado

La inversión para instalar el patio de 60.000 m³ es de R$ 5,19 millones, del cual el 69% corresponde a los equipos de movimiento (Tabla 5). El costo de operación anual es de R$ 5,63 millones, con el mantenimiento del equipo que corresponde a un 48% (Tabla 6).

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

tabla 5 – Inversión de implantación (CAPEX) del patio de 60.000 m³

Categoría	Elementos	Valor (miles de R$)	Proporción (%)
Equipos	3 conjuntos de grúa forestal (máquina base y grúa con garra)	3.599	69
Infraestructura	Báscula para camiones y semirremolque	1.243	24
Instalación de la báscula	Mano de obra materiales y pintura	300	6
Tecnología de la información	Computadoras impresora e infraestructura de red	52	1
Total		5.194	100

Fuente: elaborado por el autor a partir de datos adaptados de la empresa (2026).

tabla 6 – Costo anual de operación (OPEX) del patio de 60.000 m³

Categoría	Elementos	Valor (miles de R$/año)	Proporción (%)
Mantenimiento	Mantenimiento de las grúas	2.685	48
Mano de obra	11 operadores de grúa y 4 operadores de logística	1.528	27
Combustible	Grúas y vehículo de apoyo	1.017	18
Otros	Alquiler del terreno alimentación internet y transporte	405	7
Total		5.635	100

Fuente: elaborado por el autor a partir de datos adaptados de la empresa (2026).

La tabla 7 compara el costo anual del modelo actual, de envío directo de las fincas a la fábrica, con el del modelo con patio. En el modelo actual, el costo de envío directo es de R$ 32,77 millones anuales, de los cuales R$ 14,28 millones corresponden al camino básico y R$ 18,50 millones a la colocación de piedra triturada. Con el patio, el camino básico sigue siendo necesario, pero el costo de piedra triturada se reduce a R$ 5,53 millones. Sumado el costo de operación del patio, el costo total es de R$ 25,44 millones anuales. El ahorro neto es de R$ 7,33 millones al año, y la inversión se recupera en 0,71 años, aproximadamente 8,5 meses.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

Tabla 7 – Comparación entre el modelo actual y el modelo con un patio de 60.000 m³

Indicador	Modelo actual (envío directo)	Modelo con patio
Existencias de seguridad en campo (m³/año)	1.693.190	506.306
Existencias de seguridad en el patio (m³/año)	0	1.186.884
Camino básico sin piedra triturada (miles de R$/año)	14.279	14.279
Colocación de piedra triturada (miles de R$/año)	18.496	5.531
OPEX del patio (miles de R$/año)	–	5.635
Costo total anual (miles de R$/año)	32.774	25.444
Ahorro neto (miles de R$/año)	–	7.330
CAPEX del patio (miles de R$)	–	5.194
Período de retorno simple (años)	–	0,71

Fuente: elaborado por el autor a partir de datos adaptados de la empresa (2026).

Por metro cúbico, el costo de operar el patio es de R$ 4,75, menos de la mitad del costo de piedra triturada que evita, de R$ 10,92. El ahorro neto equivale a R$ 6,18 por metro cúbico almacenado en el patio.

4.5 Análisis de sensibilidad

El patio sigue siendo viable en todas las variaciones probadas (tabla 8 y figura 4). El resultado es más sensible al costo de piedra triturada: una reducción del 20% disminuye el ahorro neto a R$ 4,74 millones anuales, y el proyecto solo dejaría de ser viable si ese costo cayera aproximadamente un 57%, por debajo de R$ 4,75 por metro cúbico. El OPEX y las existencias de seguridad, que reflejan el número de días lluviosos, tienen efectos menores. El aumento de las existencias de seguridad tiene un efecto limitado porque, en los meses más lluviosos, el patio ya opera al límite de su capacidad de manipulación y el excedente permanece en el campo. El CAPEX no modifica el ahorro anual, sino únicamente el período de retorno, que permanece por debajo de un año. Con la estimación optimista de productividad, la flota se reduce a 2 grúas y el ahorro neto aumenta a R$ 8,90 millones anuales; con la estimación conservadora del estudio interno, la flota aumenta a 4 grúas y el ahorro neto disminuye a R$ 5,76 millones anuales, con retorno en poco más de un año.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

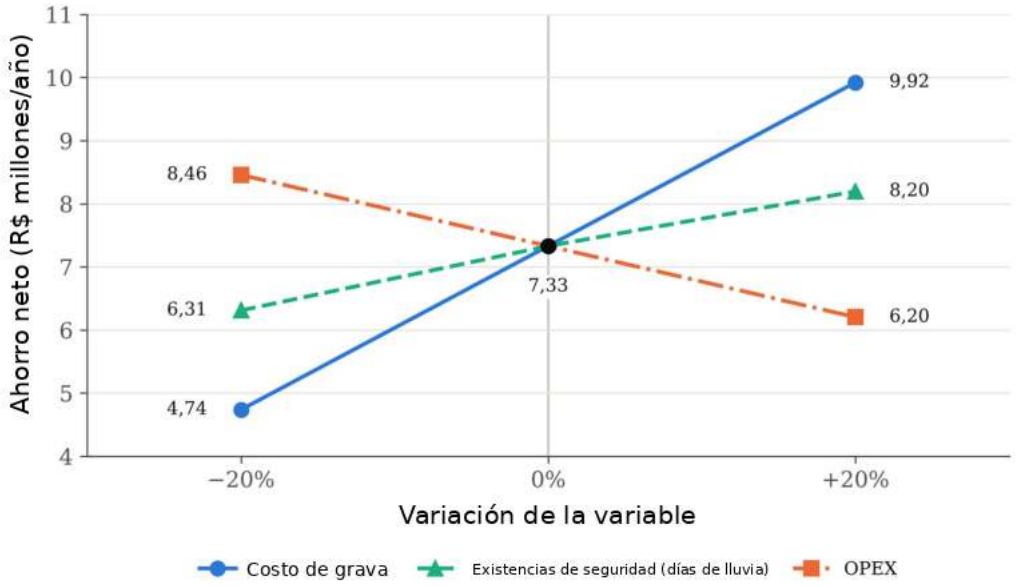
Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

Tabla 8 – Sensibilidad de el ahorro neto y el pago (capacidad de 60.000 m³)

Variación	Ahorro neto (miles de R$/año)	Período de retorno (años)
Escenario recomendado	7.330	0,71
Costo de piedra triturada −20%	4.737	1,10
Costo de piedra triturada +20%	9.923	0,52
Existencias de seguridad −20%	6.310	0,82
Existencias de seguridad +20%	8.196	0,63
OPEX -20%	8.457	0,61
OPEX +20%	6.203	0,84
CAPEX -20%	7.330	0,57
CAPEX + 20%	7.330	0,85
Productividad optimista de las grúas (2 grúas)	8.904	0,45
Productividad conservadora de las grúas (4 grúas)	5.756	1,11

Fuente: elaborado por la autora (2026).

Figura 4 – Sensibilidad de el ahorro neto a las principales variables (capacidad de 60.000 m³)



Fuente: elaborado por la autora (2026).

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

5. Discusión

Los resultados confirman que el patio intermedio es una alternativa económicamente viable para reducir la dependencia de caminos revestidos con grava durante el período lluvioso. Con una capacidad de 60.000 m³ y dos rotaciones mensuales, el patio concentra el 70% de las existencias de seguridad y genera un ahorro neto de R$ 7,33 millones al año, con recuperación de la inversión en aproximadamente ocho meses y medio. Este resultado concuerda con el uso de terminales intermedias en Finlandia y Suecia para garantizar el suministro durante períodos de baja transitabilidad (VÄÄTÄINEN et al., 2021).

El estudio de Seixas y Widmer (1993), por otra parte, encontró que los patios intermedios eran inviables debido a los costos adicionales de carga y descarga. La diferencia reside en lo que compara cada estudio: allí, el patio se evaluaba únicamente como punto de transferencia en el transporte; aquí sustituye un costo de infraestructura, la colocación de piedra triturada en los caminos internos, que supera el doble del costo de operar el patio por metro cúbico. Esto refuerza la visión de Ballou (2006) de que las decisiones logísticas deben considerar el costo total del sistema.

La lógica del patio intermedio ya se ha adoptado en la propia fábrica, cuyo patio principal contiene más de 270.000 m³ de madera y cuenta con patios alternativos utilizados como soporte en paradas operativas y períodos lluviosos. La propuesta de este trabajo lleva esta estrategia más cerca de las zonas de cosecha.

La comparación entre escenarios muestra que el costo del patio depende de la flota de grúas, definida por el volumen manipulado en el patio. Este volumen resulta, a su vez, de la capacidad física y de las existencias de seguridad de cada mes, que dependen de los días lluviosos considerados en la planificación. Por ello, el costo aumenta por escalones, en lugar de hacerlo continuamente con la capacidad. Como los patios de 50.000 y 60.000 m³ utilizan la misma flota de 3 grúas, el de 60.000 m³ aprovecha mejor esa flota y absorbe más volumen con el mismo costo de operación. Los patios de 30.000 y 40.000 m³ requieren menos inversión, pero dejan más existencias en el campo y, por tanto, más caminos que deben revestirse con grava.

El criterio de redondear siempre hacia arriba el número de grúas se adoptó porque la necesidad calculada rara vez es un entero exacto y la operación del patio no puede depender de máquinas que trabajen al límite. En el patio de 60.000 m³, la necesidad máxima es de 2,41 grúas; con 3 máquinas, si una se detiene para mantenimiento, las otras dos todavía cubren aproximadamente el 83% de la manipulación máxima y, en los meses restantes, toda la manipulación. En los meses con menos días lluviosos, esta capacidad disponible también permite ceder máquinas a otras operaciones de la empresa. Además, reduce la sobrecarga de las máquinas y las filas de camiones, preocupación que también explica el cálculo conservador de productividad del estudio interno, que aplica el OEE más de una vez para considerar

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

posibles paradas. Como la flota depende del volumen manipulado, que varía con los días lluviosos previstos, el tamaño y los costos de cada escenario deben recalcularse siempre que se actualice la planificación de lluvias y confirmarse con presupuestos específicos antes de una decisión final.

El análisis de sensibilidad también muestra que el resultado es robusto frente a los supuestos adoptados. Incluso con un costo de piedra triturada un 20% menor, el período de retorno queda apenas por encima de un año, y con un OPEX un 20% mayor permanece por debajo de un año. La productividad de las grúas se estimó en una posición intermedia entre el estudio interno utilizado en la empresa, que aplica el OEE cuatro veces, y el cálculo que lo aplica una sola vez; incluso con la estimación más conservadora, que exige 4 grúas, el patio se amortiza en poco más de un año. El cálculo considera únicamente la piedra triturada evitada en los accesos internos: el camino básico sigue siendo necesario, al igual que los accesos externos, para garantizar la transitabilidad y el suministro a la fábrica. Además, como las existencias excedentes pueden concentrarse en fincas próximas a carreteras pavimentadas, la longitud de los caminos que deben revestirse con grava tiende a ser aún menor que la considerada en el cálculo, lo que indica que el ahorro estimado es conservador.

En la empresa, el inventario de seguridad se define en la planificación a largo plazo, con un horizonte de hasta unos 21 años, desplegado en planes anuales traspasados al PCP. Se está desarrollando una planificación táctica con un horizonte significativamente menor. El modelo propuesto encaja en este nivel táctico, ya que apoya una decisión de infraestructura que afecta a varios años de abastecimiento.

El estudio tiene limitaciones. El modelo trabaja con promedios mensuales de días lluviosos, sin tener en cuenta la variabilidad entre años; no incluye el costo de transporte adicional entre finca, patio y fábrica ni el costo de oportunidad de capital; y no evalúa la pérdida de calidad de la madera almacenada por más tiempo, efecto observado por Eufrade-Junior et al. (2021) en el período lluvioso.

6. Consideraciones finales

Este trabajo desarrolló un modelo para dimensionar un patio intermedio de madera con el objetivo de reducir los costos de revestimiento con grava de los caminos internos en una empresa forestal de celulosa. En respuesta a la pregunta de investigación, un patio con capacidad física de 60.000 m³ y dos rotaciones mensuales absorbe el 70% de las existencias de seguridad anuales, mantiene el suministro a la fábrica y reduce las existencias en campo de 1,69 millones a 0,51 millones de m³. Para ello, el patio necesita una superficie total de aproximadamente 24.100 m² y una flota de 3 grúas.

La inversión de R$ 5,19 millones reduce el costo anual de envío directo de R$ 32,77 millones a R$ 25,44 millones, un ahorro neto de R$ 7,33 millones por año, y se paga en

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

aproximadamente 8,5 meses. La comparación entre escenarios mostró que el número de grúas define el costo de cada patio y que el de 60.000 m³ maximiza el ahorro neto, por aprovechar mejor la flota de 3 grúas, que también ofrece tiempo libre para el mantenimiento. El análisis de sensibilidad indicó que el proyecto sigue siendo viable incluso con variaciones del 20% en las principales variables y con la estimación más conservadora de la productividad de las grúas.

Para la empresa, el modelo sirve como herramienta de apoyo a la decisión, fácil de actualizar con cada nueva planificación anual. Para la Ingeniería de Producción, el estudio muestra cómo la modelación de escenarios puede integrar logística, gestión de inventario e infraestructura en una sola decisión.

Como trabajos futuros se sugiere incluir la variabilidad de la lluvia mediante modelos estocásticos; medir en campo la productividad real de las grúas en el patio; confirmar mediante presupuestos los costos estimados para cada tamaño de patio; incorporar el costo de transporte adicional y el valor del dinero en el tiempo, con VAN y TIR; y optimizar la ubicación del patio con respecto a las fincas y la fábrica.

Declaración de uso de inteligencia artificial

De conformidad con la Política de Inteligencia Artificial de la UFMS (Resolución n.º 455-COUN/UFMS, de 1 de diciembre de 2025), se declara que este trabajo utilizó la herramienta de inteligencia artificial generativa Claude, modelo Opus 5.5, desarrollada por Anthropic, en las siguientes etapas:

a) investigación bibliográfica: apoyo en la búsqueda de artículos sobre el tema, posteriormente comprobados por la autora en las fuentes originales;
b) redacción: apoyo en la organización de las secciones y edición de sus textos preliminares, posteriormente revisados y reescritos por la autora;
c) cálculos: apoyo en la organización y modificación de los datos para el cálculo de escenarios y el análisis de sensibilidad, comprobados por la autora.

El problema de investigación, el modelo del patio intermedio, los datos y los supuestos fueron desarrollados por la autora durante sus prácticas en la empresa estudiada. Todo el contenido fue revisado, validado y reescrito por la autora, quien asume plena responsabilidad por el texto, los datos y las conclusiones. La herramienta no se considera coautora de este trabajo.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

Referencias

ARRIVABENI, B. S. Análise técnica, econômica e socioambiental da manutenção de estradas não pavimentadas utilizando o Digital Twin. 2021. 110 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021. Disponible en: https://locus.ufv.br/bitstreams/4ddac648-03ba-4c52-ac5a-f11e2d304f23/download. Acceso: 7 nov. 2026.

BALLOU, R. H. Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

EUFRADE-JUNIOR, H. J.; RODRIGUES, S. A.; SPADIM, E. R.; GUERRA, S. P. S.; BALLARIN, A. W. Predição do teor de umidade de toras longas de madeira de Eucalyptus urophylla estocadas em pilhas ao ar livre. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 49, n. 130, e3461, 2021. Disponible en: https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr130/2318-1222scifor-49-130-e3461.pdf. Acceso: 7 nov. 2026.

HADDAD, R. V. Em 2017, plantações de eucaliptos em MS passam de 1 milhão de hectares. Campo Grande News, Campo Grande, 5 set. 2017. Disponible en: https://www.campograndenews.com.br/rural/ms-ultrapassa-um-milhao-de-hectares-deeucaliptos-plantados-este-ano. Acceso: 16 nov. 2026.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. Introdução à pesquisa operacional. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

IBGE. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2025. Rio de Janeiro: IBGE, 2026. Dados para Mato Grosso do Sul divulgados em: https://correiodoestado.com.br/economia/area-de-florestas-plantadas-e-valor-da-producaobatem-novo-recorde-em/473264/. Acceso: 7 nov. 2026.

KONS, K.; LA HERA, P.; BERGSTRÖM, D. Comparison of alternative pulpwood inventory strategies and machine systems at a log-yard using simulations. Forests, Basel, v. 11, n. 4, 373, 2020. DOI: 10.3390/f11040373.

LOPES, E. S.; MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P. de. Classificação e custos de estradas em florestas plantadas na região sudeste do Brasil. Revista Árvore, Viçosa, v. 26, n. 3, p. 329-338, 2002.

MACHADO, C. C. Construção e conservação de estradas rurais e florestais. Viçosa: SIF, 2013.

MATOS, G. Com estradas intransitáveis, alunos ficam sem ir à escola em Ribas do Rio Pardo. Campo Grande News, Campo Grande, 16 mar. 2023. Disponible en: https://www.campograndenews.com.br/cidades/interior/com-estradas-intransitaveis-alunosficam-sem-ir-a-escola-em-ribas-do-rio-pardo. Acceso: 17 nov. 2026.

MIGUEL, P. A. C. (org.). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

OLIVEIRA, I. de. Hexatrens de até 250 toneladas são autorizados em rodovias de Mato Grosso do Sul. A Crítica de Campo Grande, Campo Grande, 30 jul. 2026. Disponible en: https://acritica.net/geral/hexatrens-250-toneladas-rodovias-mato-grosso-do-sul/. Acceso: 16 nov. 2026.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Ano VII, v.1 2026 | submissão: 09/11/2026 | aceito: 16/11/2026 | publicação: 21/11/2026

SEIXAS, F.; WIDMER, J. A. Seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira utilizando-se de programação linear não inteira. IPEF, Piracicaba, n. 46, p. 107-118, 1993.

VÄÄTÄINEN, K. et al. Roundwood and biomass logistics in Finland and Sweden. Croatian Journal of Forest Engineering, Zagreb, v. 42, n. 1, p. 39-61, 2021.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.