

# **HERRAMIENTAS DE *DECISION INTELLIGENCE* PARA EL DISEÑO ESTRATÉGICO Y PLANIFICACIÓN TÁCTICA DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE AGENTES DE SOSTÉN PARA OPERACIONES NO CONVENCIONALES**

María Antonella Solis - Nonlinear Tecnología - [masolis@nonlinear.com.ar](mailto:masolis@nonlinear.com.ar)

María Josefina Fiorini - Nonlinear Tecnología - [jfiorini@nonlinear.com.ar](mailto:jfiorini@nonlinear.com.ar)

Agustín Francisco Montagna - Nonlinear Tecnología - [agumontagna@nonlinear.com.ar](mailto:agumontagna@nonlinear.com.ar)

## **Sinopsis**

El presente trabajo aborda el diseño estratégico y la planificación táctica de la cadena de suministro de agentes de sostén para operaciones no convencionales, utilizando soluciones basadas en optimización matemática desde una perspectiva jerárquica. Se analizan una serie de propuestas para los niveles de decisión estratégico, táctico y operativo. Se enfatizan y priorizan las decisiones de alto nivel y a largo plazo ya que la logística de agentes de sostén para fractura es, por un lado, una actividad crítica para asegurar la continuidad de las operaciones y evitar los tiempos no productivos en el *set* de fractura, y por otro, implica un verdadero desafío logístico estratégico ante la expansión acelerada de la actividad prevista para los próximos años en Vaca Muerta. El objetivo de la optimización estratégica es encontrar configuraciones que minimicen las inversiones y los costos operativos, así como también entender integralmente un proceso de abastecimiento que es, masivo por su volumen, y complejo por las variables intervinientes.

A nivel estratégico se analizan diferentes diseños de la cadena de suministro, con diferentes grados de complejidad. A partir de un cronograma de fractura por reservorio para un horizonte plurianual, pueden proponerse diversas configuraciones logísticas y tecnologías de transporte para mejorar la eficiencia, los costos de los flujos y optimizar el nivel de servicio a las locaciones. Los elementos fundamentales de esta cadena abarcan: (1) nodos de acopio, (2) plantas de procesamiento con distintas tecnologías, (3) modos y tecnologías de transporte (*sandboxes*, camiones volcadores, silos móviles, a granel etc.), y (4) puntos de acopio intermedios cercanos a los yacimientos. Estos últimos pueden cambiar dinámicamente su ubicación según el centro de gravedad de la demanda, buscando minimizar los costos de transporte y mejorar el nivel de servicio.

A nivel de planificación táctica, se presenta una solución basada en simulación de Montecarlo y Eventos Discretos, *machine learning* y optimización matemática. El objetivo es dar soporte al dimensionamiento de flota para el abastecimiento de agentes de sostén a partir del modelado estadístico de los procesos utilizando registros de GPS, buscando consolidar los procesos de toma de decisiones en horizontes de mediano plazo (3 a 12 meses). Esto se vuelve clave cuando una operadora o gestora logística tiene por responsabilidad gestionar la provisión de agentes de sostén a múltiples locaciones, siendo clave la gestión eficiente de múltiples recursos.

Por último, focalizando en el nivel operativo de la gestión de la cadena de suministro, se presentan los fundamentos de una herramienta de gestión en tiempo real del abastecimiento, facilitado por tecnologías de IoT/GPS. Esto permite en tiempo real dar soporte a decisiones como la reasignación de vehículos ante cambios en las velocidades de fractura o eventos climáticos y disruptivos; así como también el balanceo de los kilómetros asignados a los vehículos.

## Introducción

En la última década, el sector de *Oil & Gas* en Argentina ha evidenciado una expansión sostenida en la explotación de recursos no convencionales, impulsada fundamentalmente por el desarrollo del yacimiento Vaca Muerta. En la actualidad, el país se posiciona como el segundo mayor productor mundial de petróleo no convencional [1] y ocupa el quinto lugar en términos de reservas comprobadas. En lo que respecta al gas no convencional, Argentina se ubica en el tercer puesto tanto en volúmenes de producción como en reservas técnicamente recuperables [2, 3].

Actualmente la producción diaria en barriles de petróleo para el yacimiento asciende a aproximadamente trescientos mil barriles diarios, la cual crece año a año a medida que se valida su potencial productivo y se consolidan las inversiones en infraestructura. Las proyecciones estiman que se podría más que triplicar el valor actual, alcanzando una producción de un millón de barriles por día para finales de esta década, lo que significa un aumento de un 300% de la producción. Alcanzar este objetivo dependerá, no solo de la disponibilidad de recursos claves como los *rigs* de perforación o *sets* de fractura, sino de la coordinación de las actividades logísticas tanto *inbound* como *outbound*. En particular, la gestión de agentes de sostén, *proppants*, es clave, ya que es el recurso que permite ejecutar la fractura de la roca madre y sin el cual no existiría la actividad.

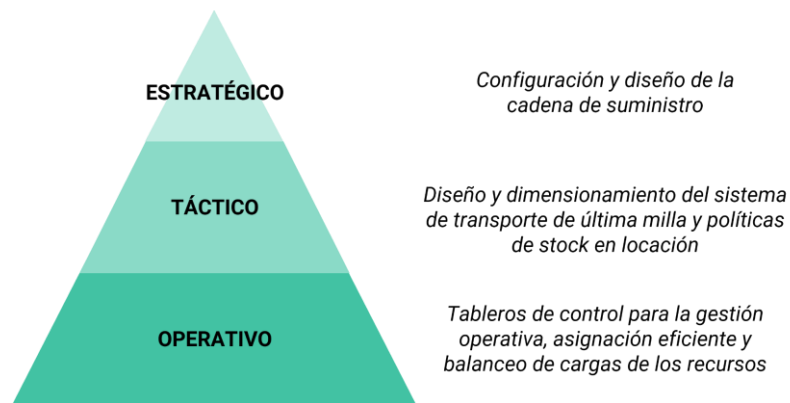
Más detalladamente, para la extracción de petróleo y gas en los yacimientos no convencionales se utiliza la técnica del *fracking*, en dónde se inyectan agentes de sostén (arenas normalmente) y agua a alta presión dentro de un pozo previamente perforado, generando fracturas dentro de la roca que permiten la comunicación entre los poros en dónde se encuentran almacenados el gas y el petróleo, los cuales son liberados hacia la superficie. Debido a que los equipamientos utilizados en esta actividad, también conocidos como *sets* de fractura, tienen costos muy elevados, se precisa que estén en continuo funcionamiento para evitar ociosidad o tiempos no productivos, que tornarían la actividad más ineficiente y menos rentable. En este sentido, para mantener un ritmo de producción sin interrupciones, es necesario que los insumos requeridos para la operación estén en el lugar y en el momento en que son necesarios.

En términos cuantitativos, para cada una de las etapas de fractura se estima una necesidad de aproximadamente 240 toneladas de agentes de sostén, el cual puede estar en su modalidad *dry* (arena seca) o *wet* (arena húmeda). Considerando que una locación no convencional puede tener entre 4 a 6 pozos, y cada uno de ellos alrededor de 50 etapas, la demanda de arena para la fractura está entre 48.000 y 72.000 toneladas de arena, las cuales se consumen en un período de aproximadamente 30 días. Si asumimos que un camión medio puede transportar 30 toneladas, el requerimiento logístico está en torno a los 2400 viajes solo para una locación. Durante el 2024, la demanda total de arena en el yacimiento fue de 4 millones de toneladas, y se prevé que este número se duplique en los próximos años.

Es por esto que la gestión de la cadena de abastecimiento de agente de sostén toma especial relevancia en el marco de la expansión de la actividad productiva que se está evidenciando en Argentina. La cadena de suministro debe ser optimizada tanto desde una mirada estratégica, considerando el diseño y configuración de la *supply chain*, en términos de nodos involucrados, conexión entre ellos y tecnologías disponibles, pasando por un nivel táctico en dónde es necesario la revisión de políticas y decisiones en un mediano plazo a partir del cronograma y proyección de fractura de los próximos meses, hasta un nivel más operativo dónde es necesario

tener una asignación eficiente de flota que pueda responder antes alertas y cambios en la actividad que se dan en el día a día.

En el presente trabajo se discuten y presentan herramientas para la toma de decisiones o *decision intelligence*, basadas en optimización matemática, simulación y *machine learning*, entre otros, para dar soporte a la toma de decisiones en la cadena de suministro de agentes de sostén tanto en los niveles estratégico, táctico y operativo, tal como se muestra en el esquema de la Figura 1.



**Figura 1.** Esquema general de los niveles jerárquicos y sus correspondientes decisiones.

### **Diseño estratégico de la cadena de suministro de agentes de sostén**

El crecimiento de la explotación de Vaca Muerta, como se mencionó anteriormente, ha implicado una expansión notable en términos de inversión, infraestructura y operación. En este marco, los actores involucrados en la cadena requieren que se brinden respuestas ágiles y sostenibles ante el crecimiento exponencial que está teniendo la actividad. En este sentido, las decisiones estratégicas que se toman a nivel de la gestión de la cadena de suministros, desde los proveedores logísticos hasta las empresas operadoras, son la clave para garantizar tanto la eficiencia operativa como la viabilidad a largo plazo del desarrollo.

En términos estratégicos, se identifican dos grandes puntos a analizar: (I) el impacto del diseño de diferentes configuraciones de la red y (II) la incidencia de las decisiones sobre la modalidad de fractura en vista de alcanzar niveles de producción más altos y el efecto de esto sobre las políticas de *stock*.

#### *Configuraciones estratégicas de la red*

En cuanto al primer punto, en la Figura 2 se presenta un esquema conceptual de la cadena de suministros de agente de sostén. Como puede observarse, el recurso es transportado desde diferentes canteras o nodos de producción, luego se acopia en lugares dentro de la zona de explotación, como pueden ser zonas cercanas a la localidad de Añelo en Argentina, y por último desde estos lugares de acopio, en donde pueden existir procesos adicionales de refinación, acondicionamiento y control de calidad de la arena, se transporta hacia los nodos de demanda del recurso, es decir, las locaciones o *pads* en donde se efectúa la fractura de los pozos propiamente dicha.

Tal como se ilustra en el esquema, la cadena logística analizada se estructura en torno a tres grandes conjuntos de nodos, lo que da lugar a dos principales tipos de flujos. El primero se

extiende desde los nodos generadores del material —en este caso, las canteras— hasta la planta de acondicionamiento y acopio de arena, lo que se denomina *primera milla*. El segundo flujo, comprendido entre dicha planta y las locaciones de operación, es denominado en adelante como *última milla*.



**Figura 2.** Esquema general de la cadena de suministro de agentes de sostén.

En primer lugar, cabe señalar que las decisiones relativas al modo de transporte empleado en el tramo que conecta las canteras con la planta no forman parte del alcance del presente trabajo. No obstante, su consideración resulta relevante en el contexto de una eventual reconfiguración integral de la red logística. Actualmente, este tramo es cubierto predominantemente mediante transporte carretero por camiones, aunque se están evaluando alternativas como el uso de ferrocarril (incluso en E.E. U.U. se están instalando algunos arenoductos), con el propósito de reducir la congestión vial, incrementar la eficiencia logística y garantizar la continuidad en el abastecimiento de materiales. Por su parte, las decisiones relacionadas con el transporte en la última milla se abordan específicamente en la sección dedicada al nivel táctico de análisis.

A la hora de analizar las distintas configuraciones de la cadena de abastecimiento, es clave considerar los siguientes puntos críticos y *trade-off* existentes:

1. *Proceso de abastecimiento de última milla:* como se detalla en secciones subsiguientes, es necesario comprender cada etapa del proceso de abastecimiento. En particular y a grandes rasgos: (a) carga de agentes de sostén, (b) transporte y (c) descarga en locación, las cuales se esquematizan en la Figura 3. Cada una de estas etapas debe ser estudiada individualmente para reducir el impacto en el proceso global.
2. *Fuentes de variabilidad:* cada una de las etapas del proceso no es un proceso determinístico sino con su propia incertidumbre y variabilidad (Figura 3). Estudiar la cadena de suministro con sus propias incertidumbres en los procesos arrojará siempre un resultado más robusto y una mejor comprensión del impacto de dicha variabilidad en el funcionamiento del sistema. Cabe mencionar que, el estudio de los tiempos de cada una de las etapas de los procesos, es viable mediante el análisis de los datos obtenidos a través del monitoreo de vehículos con sistema GPS, los cuales permiten la detección de eventos de entrada y salida a los lugares de interés, como han de ser la planta y los *pads*, así como el análisis de velocidades en diferentes tramos de los caminos transitados. El análisis de múltiples eventos, permiten la obtención de distribuciones de probabilidad asociados a las diferentes etapas del proceso. Adicionalmente, en el nodo final, no sólo se presenta la variabilidad en los tiempos de descarga de arena, sino que también, hay variabilidad presente en la demanda que tienen de agente de sostén, debido a que el

ritmo de fractura por día es variable y dependiente de varios factores, entre los cuales se puede mencionar: la modalidad de fractura y las características constructivas de los pozos. Más adelante, se observará y detallará cómo la variabilidad, por ejemplo, en los tiempos de transporte o en la demanda de agentes de sostén, puede afectar los niveles de flota requerida, así como también puede ser absorbida por políticas de *stock* acordes.



**Figura 3.** Esquema del ciclo de abastecimiento y su variabilidad natural.

3. *Nivel de servicio*: nos referimos con el nivel de servicio como la probabilidad de cobertura de la demanda de agentes de sostén que se quiere contar en cada nodo de la red durante un período concreto. Cuanto mayor el nivel de servicio que se quiera brindar, la cadena de suministro deberá contar con algunas de las siguientes estrategias: (a) mayor *stock* en locación para amortiguar variabilidades en los tiempos o en la demanda, (b) mayor nivel de flota asociada, (c) contar con puntos de abastecimientos más cercanos que aseguren menor tiempo de ciclo, y/o (4) mejores procesos de carga y descarga. Estas políticas robustecen el proceso de abastecimiento y reducen la probabilidad de quiebre de *stock*.

4. *Trade-off económico*. El balance económico a realizar tiene que ver con la competencia entre el costo de ruptura de *stock* (costos por NPT asociados al *set* de fractura y pérdidas de producción) y el costo de incorporar algunas de las políticas que mejoren el nivel de servicio asociado. El balance entre dichas alternativas y la minimización del riesgo de quiebre, buscando el punto de equilibrio de menor costo, es el objetivo del diseño estratégico y táctico de la cadena de suministro.

#### *Decisiones de diseño del abastecimiento*

A continuación, antes de estudiar las configuraciones alternativas de la cadena de suministro, se listan las posibles variables de decisión que se pueden alterar sobre el diseño de la red, cada una de las cuales impactará en distinta manera sobre el funcionamiento del sistema.

1. *Stock en locaciones*: un punto clave para amortiguar las variabilidades del proceso tiene que ver con el nivel de *stock* de seguridad en locaciones. A mayor *stock*, menor probabilidad que eventos lentos de carga-transporte-descarga, o eventos de mayor demanda en el *pad*, generen un quiebre de *stock* y sus correspondientes NPT. Este mayor *stock* tiene su costo asociado, tanto en su gestión como en los equipos, espacio e infraestructura necesaria en la locación.

2. *Descentralización del inventario*: la instalación de nodos de almacenamiento de agentes de sostén que estén más cerca de los puntos de demanda puede ayudar, a través de la reducción de los tiempos de ciclo, a mejorar el nivel de respuesta y el nivel de servicio. Esto claramente tiene su costo, asociado a la gestión de un nuevo nodo y nuevos puntos de manejo del material, aunque puede impactar mucho en la performance de todo el sistema. La ubicación de estos nodos, así como su movilidad a lo largo del escenario, acompañando la demanda, es una decisión clave de diseño.

3. *Stock en nodos intermedios*: al igual que el punto previo, el nivel de inventario de seguridad en las plantas de abastecimiento y los nodos intermedios es clave para balancear y poder responder ante la variabilidad del sistema.

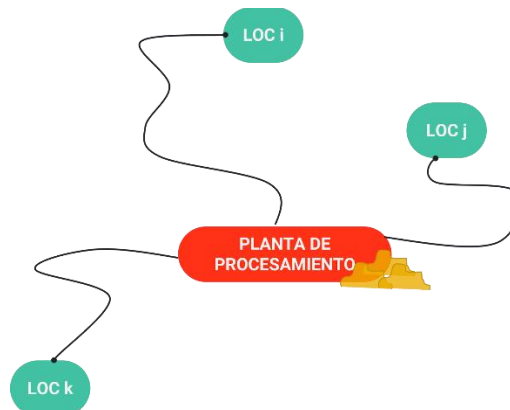
4. *Tecnologías de transporte*: variar los modos de transporte puede impactar significativamente en el funcionamiento de la red, tanto así por las capacidades de las unidades, sus velocidades de transporte o los tiempos de carga y descarga del material. Existen experiencias muy diversas en torno al uso de cargas a granel, *sandboxes*, camiones tolva, entre otros.

5. *Nivel de flota*: por último, el nivel de flota general es otra variable clave. Contar con mayor nivel de vehículos puede ayudar a dar respuesta a la variabilidad de los procesos con mayor rapidez y no requerir de mayores niveles de *stock* o de la descentralización de las operaciones.

A partir del esquema inicial, que permite identificar los elementos fundamentales de la red, se proponen a continuación diferentes configuraciones logísticas, destacando los puntos de mejora y los compromisos (*trade-offs*) asociados a cada una. A continuación, se ejemplifican algunas configuraciones de cadena de suministro que, justamente, alternan algunas de las variables de diseño antes mencionadas.

#### *Configuración A: Estrategia centralizada*

La Figura 4 presenta la **Configuración A**, caracterizada por un esquema de distribución directa y centralizada desde la planta de procesamiento hacia las locaciones. Esta opción requiere que las operaciones de carga en planta sean lo suficientemente ágiles y coordinadas como para soportar un alto flujo de camiones, dado que todos los vehículos implicados en la operación deben cargar el agente de sostén en dicho establecimiento, asegurando así la continuidad del proceso operativo.



**Figura 4.** Configuración A propuesta.

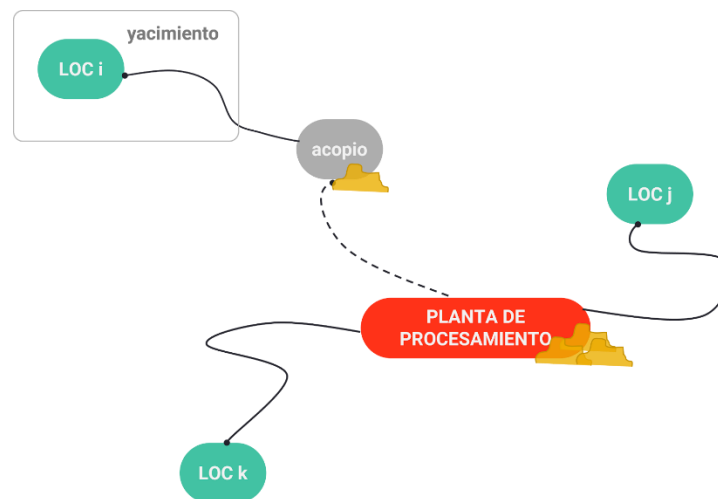
Entre las ventajas de esta configuración se destaca la centralización de la base de despacho, lo que facilita un mayor control tanto sobre la actividad de transporte como sobre el inventario disponible para abastecer los *pads*. Sin embargo, entre sus limitaciones se encuentra el hecho de que dicha planta representa un punto fijo, potencialmente alejado de los sectores activos de explotación. Esto implica mayores distancias de viaje y, por ende, la necesidad de una mayor cantidad de camiones para satisfacer la demanda en locaciones remotas.

Otro de los puntos a considerar es la gestión del *stock* de arenas tanto en la planta centralizada como en las locaciones. En la Configuración A, se puede esperar un requerimiento mayor de

*stock* de arenas en locación para hacer frente a las fuentes de variabilidad de todo el proceso de abastecimiento, como se menciona previamente y tal como se detalla en las próximas secciones. Al estar más alejadas en promedio las locaciones de la fuente de arena, este inventario de seguridad deberá ser mayor dado el mayor tiempo de ciclo y tiempo de respuesta para reponerse a eventos inesperados. Sin embargo, desde el punto de vista del *stock* centralizado en la planta, su gestión es más eficiente y permite mayores niveles de decisión en el seguimiento de los procesos globales que se están ejecutando en simultáneo en varias locaciones.

#### *Configuración B: Descentralización Intermedia*

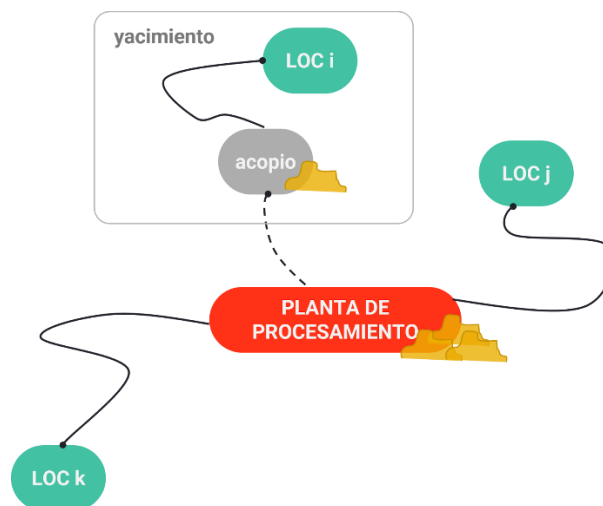
La **Configuración B**, ilustrada en la Figura 5, propone un punto de almacenamiento intermedio estratégicamente ubicado entre la planta de procesamiento y las locaciones. Esta configuración tiene como objetivo reducir los tiempos de traslado en la última milla, mejorando la capacidad de respuesta ante la demanda de agente de sostén, siendo un punto amortiguador que permita dar respuesta rápida a pesar de inconvenientes que pudiesen surgir en la planta o en los caminos entre los nodos. Al reducirse el tiempo de ciclo y estar más cerca de los puntos de demanda, la respuesta ante la variabilidad es mejor y el nivel de servicio de la provisión de agentes de sostén a la locación se incrementa. No obstante, este punto intermedio también debe ser abastecido desde la planta, por lo que el dimensionamiento de la flota debe considerar ambos tramos logísticos, y en términos de niveles de *stock* de todo el sistema, el mismo es mayor. Esto último se debe a que ese mayor nivel de servicio se consigue al descentralizar los inventarios y estar más cerca de la demanda, lo cual tiene como desventaja un mayor inventario inmovilizado global y su correspondiente costo.



**Figura 5.** Configuración B propuesta.

#### *Configuración C: Descentralización Completa*

En la Figura 6 se introduce la **Configuración C**, que constituye una variante de la alternativa anterior, en donde se propone un lugar de almacenamiento intermedio en un emplazamiento dentro de la zona de yacimiento que se decide abastecer para la fractura, es decir, muy cerca de la demanda final. Esta alternativa permite reducir significativamente los tiempos de viaje de la última milla y por ende una disminución en la flota necesaria para el abastecimiento de la locación. Sin embargo, como se menciona en el caso de la Configuración B, debe estudiarse el nivel de flota de la *milla intermedia*, así como el incremento en los *stocks* totales requeridos para contar con la mejora del nivel de servicio a locación.



**Figura6.** Configuración C propuesta.

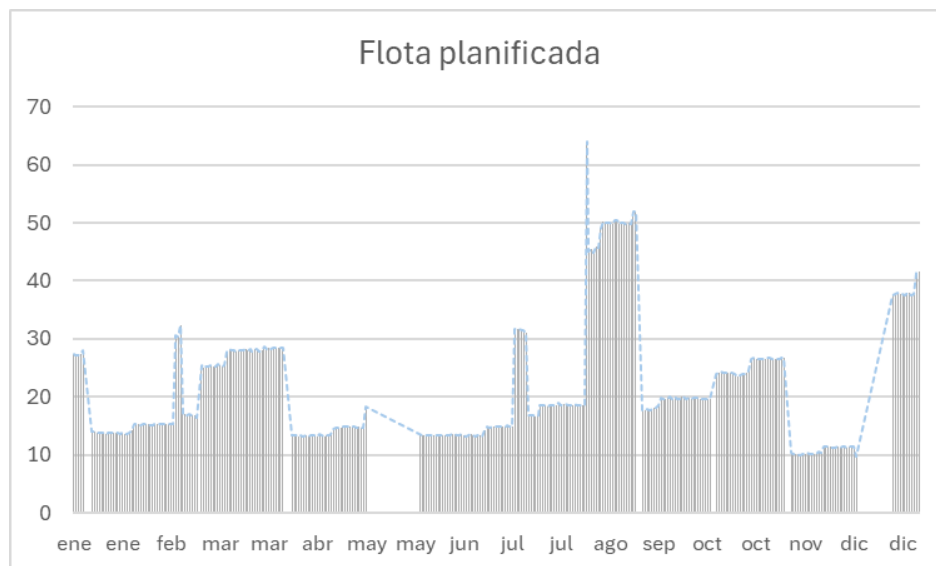
#### *Diseño dinámico de la red: Puntos de Acopio Móviles*

Adicionalmente, tanto en la Configuración B como en la C, se contempla la posibilidad de que la instalación de estos puntos de acopio sean móviles, es decir, que su ubicación pueda ajustarse dinámicamente en función de la demanda de las distintas áreas de operación. Esta estrategia permitiría establecer el centro de gravedad operativo de forma adaptable y dinámica con el tiempo, optimizando los costos y garantizando un nivel de servicio conforme a los estándares establecidos para la actividad.

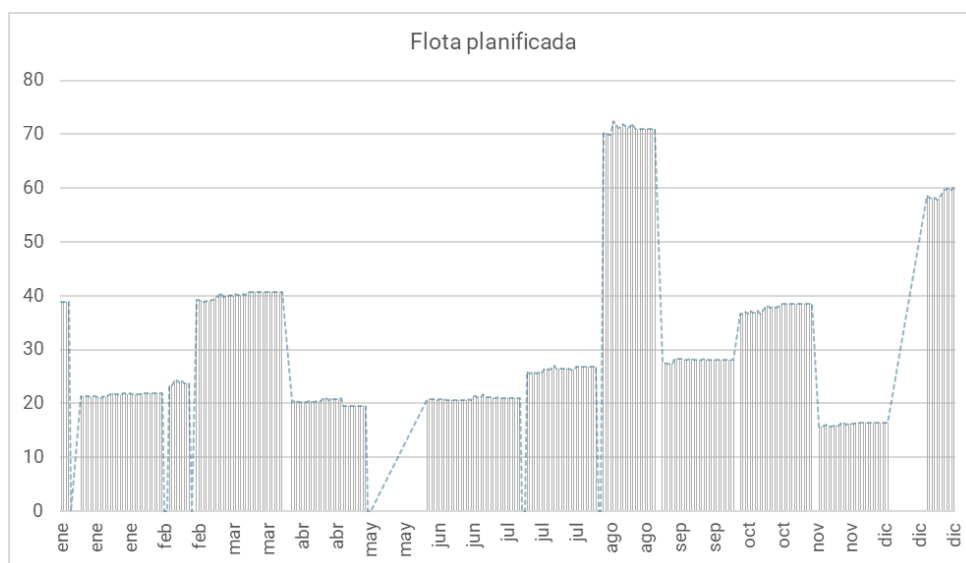
#### *Impacto de la modalidad de fractura*

En relación con el segundo aspecto abordado —la influencia de las decisiones sobre la modalidad de fractura—, resulta factible evaluar su impacto mediante herramientas de planificación estratégica. Estas permiten estimar la necesidad de flota día a día, a lo largo del horizonte temporal planificado, en función del ritmo de fractura esperado para cada locación. Este ritmo operativo se modela como una distribución de probabilidad de etapas por día, definida a partir de las características constructivas de los pozos que integran cada pad. Dicha distribución puede derivarse del análisis estadístico de datos históricos de operaciones de fractura, segmentados según las condiciones operativas de cada caso particular.

Como caso de estudio, se analiza un horizonte de planificación anual en el cual se proyecta la operación de 12 locaciones utilizando un *set* de fractura. Estas locaciones se encuentran distribuidas en el área de interés, con distancias que varían entre 12 km y 170 km respecto de la planta de procesamiento del agente de sostén. Bajo un esquema operativo que contempla la modalidad de fractura *ZipperFrac*, y considerando un ritmo promedio de 10,1 etapas por día en pozos con ramas horizontales de 3000 a 5000 metros, y de 8,9 etapas por día en profundidades mayores, se estima una demanda total anual de aproximadamente 760 mil toneladas de arena. En este escenario, el dimensionamiento de la flota presenta variabilidad a lo largo del año, en función del conjunto de *locaciones* programado para cada momento, con un requerimiento que oscila entre un mínimo de 10, una media de 23 y un máximo de 64 camiones. El comportamiento esperado de la flota a lo largo del horizonte puede observarse en la Figura 7.



En contraposición, si se considera el mismo cronograma operativo, pero adoptando la modalidad de fractura *SimulFrac* —la cual permite fracturar dos pozos en forma simultánea, incrementando el ritmo promedio a aproximadamente 14 etapas por día—, se produce una modificación significativa en el requerimiento de flota. En este caso, la demanda de camiones presenta una mínima de 16, una máxima de 73, y una media anual en torno a los 32 camiones, como se ilustra en la Figura 8.



### Conclusiones sobre el diseño estratégico de la red

En conclusión, los distintos esquemas tienen sus propias ventajas y desventajas en términos de la configuración de toda la operación de abastecimiento. En todos los casos, se deben analizar en términos cuantitativos los distintos componentes de costos de la operación y los beneficios esperados en cada caso en términos de nivel de servicio, buscando establecer el punto óptimo que garantice una provisión efectiva con eficiencia.

Es importante concluir que, además de todo el diseño de la cadena de suministro, estudiar el impacto de la intensidad de la demanda en las locaciones es clave dado el efecto que tiene en la necesidad de flota. Asimismo, como se puede observar, las operaciones *SimulFrac* al ser más intensivas en su demanda de agentes de sostén, son más propensas a ser afectadas por desvíos y variabilidades de todo el proceso, con lo cual seguramente sea necesario absorber esto a partir de distintas estrategias: (1) nodos de abastecimiento cercanos a locación, (2) mayor nivel de flota de reserva, o (3) mayores niveles de *stock* en locación.

### **Análisis y toma de decisiones tácticas en la cadena de suministro de agentes de sostén**

En el nivel de jerarquía táctica de la planificación de la cadena de suministro de agentes de sostén para las operaciones no convencionales, las decisiones se enmarcan en horizontes de mediano plazo, típicamente un año de cronograma de operaciones. Se busca garantizar la continuidad operativa dentro de este horizonte optimizando la gestión de los recursos disponibles, sin entrar aún en el detalle operativo diario. En este nivel, las principales decisiones involucran: (a) el dimensionamiento del sistema de transporte desde los nodos de acopio hasta las locaciones operativas, y (b) el diseño de las políticas de inventario a mantener en las mismas. Estas dos verticales de decisión son fuertemente interdependientes, y pensando el problema de planificación con un enfoque de optimización integral, deben analizarse de manera conjunta.

La interacción entre las decisiones de dimensionamiento del sistema de transporte y las políticas de *stock* determinan el nivel de riesgo operativo al que se está expuesto, asociado a las ociosidades o tiempos de espera de los recursos de fractura. Estos recursos, considerados cuello de botella dentro del enfoque fabril de construcción de pozos, representan uno de los activos más críticos y costosos del proceso. Por lo tanto, es esperable de una planificación táctica óptima que encuentre el equilibrio entre el nivel de servicio del sistema de abastecimiento y sus costos logísticos frente al riesgo y el impacto económico de la inactividad de los equipos de fractura. Este balance resulta clave para garantizar operaciones estables y eficientes en contextos de alta exigencia de productividad operativa como el de Vaca Muerta.

#### *Diseño y dimensionamiento del sistema de transporte*

El sistema de transporte de agentes de sostén es un eslabón crítico en las operaciones, principalmente por la dispersión geográfica de las locaciones, las condiciones variables de los caminos y la necesidad de abastecimiento continuo en ventanas de tiempo muy ajustadas. Asimismo, la variabilidad innata de todo el proceso estocástico, como se menciona en secciones previas, afecta notablemente la respuesta y el funcionamiento del sistema en su conjunto.

A nivel táctico, las decisiones están relacionadas a: (1) la selección del modo de transporte (vehículos a granel, cargas modulares tipo *sandbox* o bolsas, silos móviles, entre otros); (2) la unidad de carga y su formato, que principalmente condiciona la complejidad de las operaciones de carga y descarga, los tiempos de manipulación y la necesidad de equipos de manejo de materiales más o menos complejos; (3) la capacidad útil de carga por viaje, según la configuración de los vehículos y sus restricciones de carga en términos de peso y volumen; y (4) bajo todas estas condiciones, la cantidad de unidades de transporte necesarias para cumplir con los niveles de servicio definidos en función de la demanda de la actividad de fractura.

Un posible esquema de transporte y que, probablemente resulte el más sencillo, refiere al transporte a granel en unidades tipo tolva. Esta configuración permite maximizar el aprovechamiento volumétrico del transporte, y probablemente minimizar las operaciones de manipulación reduciendo los tiempos de carga y descarga. Sin embargo, los operadores logísticos han implementado una variedad de esquemas basados en unidades de carga discretas, como contenedores tipo *sandbox*, big bags o silos móviles. Estos formatos, si bien es esperable que conlleven mayores tiempos de manipulación y menor eficiencia en el uso del volumen de carga, pueden aportar mayor modularidad al sistema y representar una mejor solución frente a determinadas restricciones constructivas y operativas de las locaciones, así como entornos con climatología compleja.

#### *Diseño de las políticas de stock en locación*

Las políticas de inventario en locación buscan garantizar la disponibilidad de agentes de sostén en el momento y lugar precisos donde son requeridos. Es natural pensar en la función de este tipo de inventario como un amortiguador frente a la variabilidad natural que el sistema logístico posee.

En uno de los extremos, se encuentra el enfoque *Just in Time* (JIT), que plantea operar con inventario tendiente a cero en locación, posibilitado por la coordinación perfecta entre las velocidades de consumo de agentes de sostén por la actividad y la velocidad de entrega que ofrece el circuito de abastecimiento. Si bien este modelo minimizaría los costos de operación y manipulación en locación, es sumamente sensible a cualquier tipo de desbalance en el sistema. Su implementación en contextos donde existen múltiples fuentes de variabilidad representa un desafío considerable.

Otro tipo de estrategias refieren a la adopción de políticas de *stock* de seguridad en locación, que consisten en mantener un volumen optimizado de agente de sostén en el pad para cubrir posibles descoordinaciones o demoras en la reposición. El dimensionamiento de este *stock* depende principalmente de la variabilidad en los tiempos de ciclo logísticos, la variabilidad en el ritmo de demanda de la operación de fractura, el nivel de exposición al riesgo que se considere aceptable y las limitaciones físicas de la locación. Estas políticas podrían diferenciarse por locación, según la lejanía de las mismas al punto de abastecimiento. Sería natural pensar que locaciones más lejanas a los puntos de acopio de agentes o con mayor dificultad de acceso, pueden requerir niveles de *stock* más altos para asegurar la continuidad de las operaciones, mientras que las locaciones más cercanas podrían operar con buenos niveles de servicio manteniendo inventarios mínimos. En relación a esto, se ven los beneficios que pueden tener la implementación de *stock* intermedio o *buffers* móviles ubicados estratégicamente, como se desarrolló en el apartado anterior.

#### *Aplicación de herramientas de simulación avanzada*

Las decisiones expuestas sobre transporte e inventario están íntimamente vinculadas y su resolución integral es esencial para comprender el comportamiento global del sistema. La necesidad de mantener mayores o menores niveles de inventario en locación dependerá del grado de incertidumbre al que el sistema esté expuesto: a menor predictibilidad, mayor necesidad de amortiguación para sostener el nivel de servicio. En directa relación a ello, estará el nivel de flota a mantener durante el ciclo de vida de la locación para garantizar el nivel de servicio, en un escenario donde al transcurrir los días desde el inicio de la fractura la

probabilidad de alcanzar una mayor velocidad de operación se incrementa. Esta condición impacta sobre el dimensionamiento de la flota: el nivel adecuado del recurso de transporte debe considerar no solo la demanda diaria con su variabilidad, sino también su evolución a lo largo del tiempo. Así, la planificación del nivel de flota debe asegurar que la misma pueda acompañar esa aceleración en las operaciones.

Dada la complejidad del sistema logístico, caracterizado por múltiples fuentes de incertidumbre y una fuerte interdependencia entre sus variables, el uso de herramientas avanzadas de simulación se configura como un recurso clave para una planificación táctica robusta. En particular, los modelos basados en simulación de Montecarlo y eventos discretos permiten representar con la variabilidad inherente de los procesos, ofreciendo una visión realista del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación, posibilitando la evaluación cuantitativa de alternativas de configuración del sistema. Además, posibilita el estudio sistemático de políticas de inventario en locación dado un cierto nivel de flota, permitiendo identificar aquellas que minimizan el riesgo de quiebre sin incurrir en sobre costos por exceso de *stock* o sobredimensionamiento de flota, orientando la toma de decisiones hacia configuraciones logísticas resilientes y con costos mínimos.

#### *Desarrollo de modelo de simulación*

En este contexto, se desarrolló una herramienta de simulación híbrida que combina metodologías de simulación de eventos discretos y de Montecarlo, para modelar el ciclo completo de abastecimiento de un *pad* o locación. Esta herramienta permite dar soporte a las decisiones de dimensionamiento de flota de última milla, complementada por la estimación de ciertos indicadores, como el impacto de la flota en los niveles de stock y el riesgo de posibles quiebres de *stock*.

Para lograr esto, se brinda una serie de *inputs* o datos de entrada, entre los que destacan: (1) datos de tiempos administrativos en locación y en planta para la carga y descarga, (2) tiempos de carga y descarga según tecnología de transporte utilizada y lugar de carga, (3) velocidades mínimas, medias y máximas para cada tipo de tramo considerado (según el tipo de camino), (4) configuración de cada tramo logístico entre el punto de acopio de agente y locaciones, (5) datos relativos a la demanda de agentes de sostén en locación para cada fractura (volumen y tipo de malla), (6) predicción del volumen de etapas por día, y (7) niveles de *stock* inicial y críticos en cada punto de control.

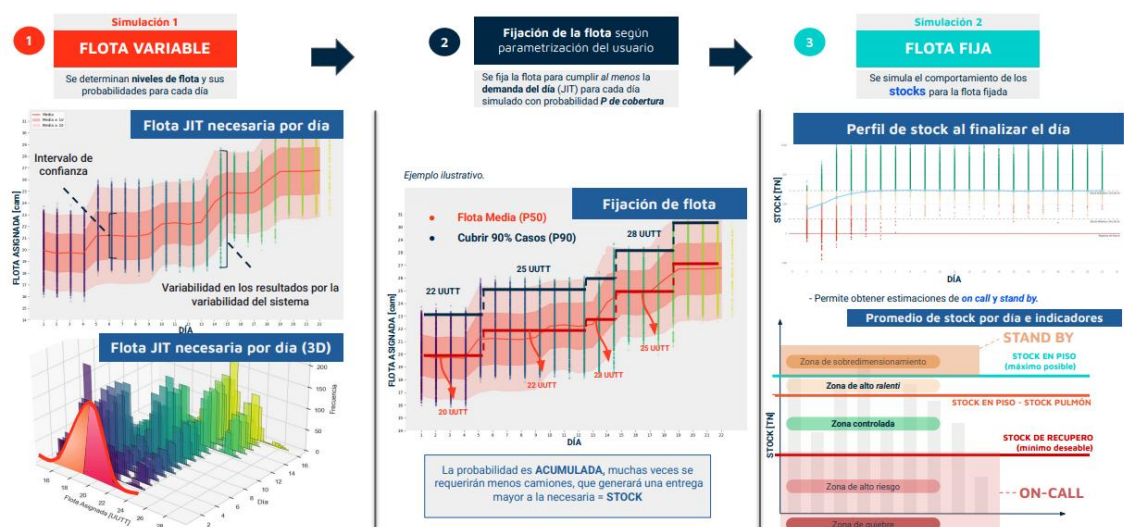
Como puede verse, los puntos (1) a (3) son resultados del análisis de grandes volúmenes de datos obtenidos mediante tecnología IoT/GPS de una flota de última milla de una operadora en específico. A partir de ellos, se obtuvieron las distribuciones estadísticas de los tiempos de procesos y velocidades. Por otra parte, los puntos (4) a (7) son parámetros propios del escenario y que el usuario deberá definir para cada instancia.

Para un dado escenario, se simula la operación de una locación o de un conjunto de locaciones completas. Esto es, para cada día de operación, se simula la demanda de agente de sostén que debe ser satisfecha de acuerdo con las características operativas del *set* de fractura. Asimismo, se simulan todos los tiempos involucrados en las actividades que participan en el ciclo de abastecimiento de la misma. Esto se puede ver representado en el esquema de la Figura 9, donde para cada etapa de la secuencia se le asocia una distribución de probabilidad con la que se estiman los tiempos. Cumplimentado un día, se pasa al siguiente y se efectúa el mismo

procedimiento, el cual se repite sucesivamente hasta cubrir la demanda total de las locaciones intervinientes en la simulación (es decir, hasta que todas las etapas de fractura se hayan realizado). De esta manera, para cada día, según los tiempos y demanda simulada, es posible calcular la flota necesaria para sostener el ritmo de fractura estimado. Se ejecutan mil iteraciones del proceso de simulación, dando como resultado la distribución de flota necesaria para satisfacer a todo el ciclo de abastecimiento, incorporando la variabilidad inherente al proceso estocástico simulado. Este método de ejecución se denomina “Simulación con flota variable”. El objetivo es encontrar el dimensionamiento de flota tal que cumpla con los requerimientos impuestos en forma rigurosa sin permitir la ruptura de *stock*, es decir, cumpliendo exactamente con la demanda de arena día a día.

Por otra parte, se desarrolló una segunda configuración del simulador, designada como “Simulación con flota fija”. En esta variación se propone simular el abastecimiento a una locación con una cantidad fija de unidades de transporte definidas como una probabilidad de cobertura de la flota variable determinada anteriormente. El nuevo objetivo en este caso es evaluar la variabilidad en los niveles de *stock* de la locación y el impacto que tiene el tamaño de la flota sobre el mismo, analizando con rigurosidad el riesgo potencial de agotamiento del agente en locación y la consecuente discontinuidad en la actividad de fractura.

A continuación, en la Figura 9 se presenta una representación esquemática del proceso completo de simulación, que incluye ambas modalidades de simulación y cómo las mismas se relacionan.



**Figura 9.** Representación del proceso de simulación basado en dos instancias: “Flota variable” y “Flota fija”.

A partir de los resultados obtenidos en ambas instancias de simulación, se generan reportes dinámicos de la solución, que incluyen principalmente el dimensionamiento de flota por locación para el cronograma considerado, además de una variedad de indicadores como la probabilidad de quiebres de stock, las bandas de criticidad de la esperanza del nivel de stock medio diario, los kilómetros a recorrer, los tiempos de ciclo del circuito de abastecimiento, estimación de costos totales de la actividad logística en el horizonte de planificación, determinado por los costos operativos normales, los costos de requerir flota adicional y los costos de *stand by* ante situaciones de sobredimensionamiento de la flota.

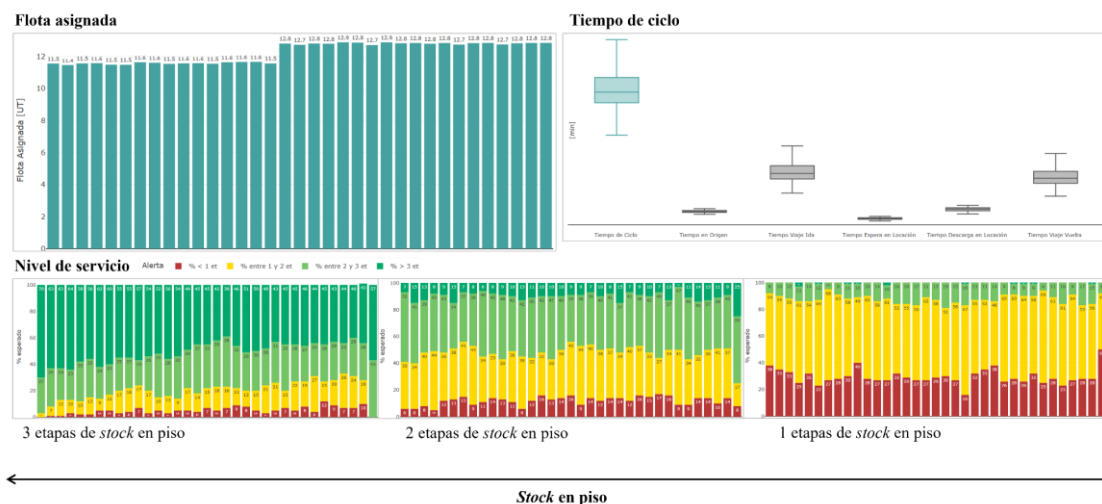
Una vez desarrollada la herramienta, se comparó su comportamiento ante casos reales, comprobando la validez de los resultados entregados por el simulador. Esta etapa de validación es clave para la adopción y *tuning* de la herramienta, como en todo proyecto basado en simulación.

A partir de esta herramienta, se desarrolló una serie de experimentos de simulación orientados a estimar los requerimientos de flota para abastecer agente de sostén a la actividad de fractura bajo diferentes configuraciones logísticas. Todos los casos analizados corresponden a locaciones modelo de seis pozos, con una longitud promedio de rama horizontal de 3.500 metros, que se traducen en 350 etapas totales aproximadamente. La demanda diaria se modeló como una distribución por tramos según la profundidad del avance de la operación, con una media de 9,5 etapas para los tramos más profundos y de 11,5 etapas para los menos. A modo de ejemplo, se consideran dos locaciones tipo: la locación A, ubicada a una distancia relativamente corta del punto de acopio (27 Km), y la locación B, situada a una distancia mayor (59 Km).

### *Experimento 1: comparación del impacto de las políticas de stock en locación*

En un primer experimento (Figura 10) se evaluó el impacto que tiene el nivel de inventario en locación sobre la probabilidad de quiebre o agotamiento del agente de sostén, lo que impide la continuidad de la actividad. Simulando la operación en la Locación A, se obtuvo un nivel de flota que varía desde 11,5 hasta 12,8 unidades conforme avanza la operación. Se observa que mantener un *stock* en piso de tres etapas permite sostener una probabilidad media de quiebre del orden de 5%, medida como la proporción de simulaciones en las que el inventario resultó menor a una etapa al término del día simulado. Al reducir el *stock* a dos etapas, dicha probabilidad asciende a 12%, evidenciando un crecimiento significativo en el riesgo operativo. Esta tendencia se intensifica aún más al mantener solo una etapa de *stock*, donde la probabilidad de quiebre alcanza un promedio del 29% (una probabilidad de quiebre casi seis veces superior a la observada en el escenario inicial).

Locación A / Cercana / Modalidad Tolva 35 Ton



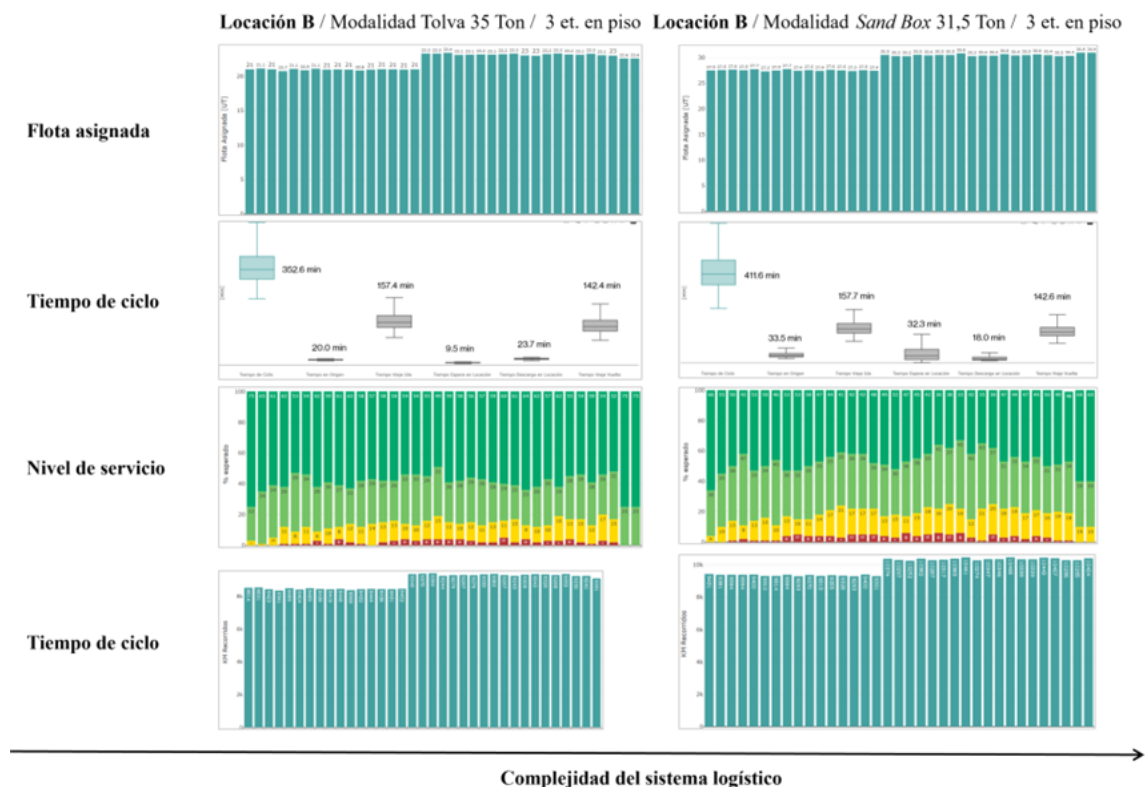
**Figura 10.** Experimento de simulación comparativo de tres políticas de stock en locación.

Estos resultados indican que, al contar con menos stock en locación, la capacidad de amortiguar la variabilidad de la demanda y de los tiempos de ciclos se reduce. La herramienta,

en estos casos recupera el nivel de stock mediante flota *on-call* con su correspondiente costo asociado.

### *Experimento 2: comparación del impacto de la complejidad de la tecnología de transporte*

En un segundo experimento (Figura 11), se analizó el efecto que tiene la modalidad de transporte sobre el comportamiento del sistema logístico, manteniendo constante el nivel de inventario en locación. Se compararon dos configuraciones: una basada en transporte a granel mediante camiones tolva de 35 toneladas de capacidad, y otra utilizando cargas unitarias tipo *sand box* de 10,5 toneladas, transportadas en camiones con capacidad para tres cajas. A pesar de que ambas configuraciones permiten mantener un nivel de servicio comparable, las diferencias operativas son significativas. En el primer caso, la flota asignada evoluciona desde 21 hasta aproximadamente 23 unidades, con un recorrido promedio diario entre 8.500 y 9.200 kilómetros. El tiempo de ciclo total se estima en 352,6 minutos (5,87 horas), de los cuales las tareas de carga, descarga y esperas representan en promedio 53,2 minutos, es decir, un 15% del tiempo total. En cambio, bajo la segunda modalidad, el requerimiento de flota se incrementa a valores iniciales de 27,5 unidades, alcanzando cerca de 31 unidades al final de la operación. Esto implica entre 7 y 8 unidades adicionales diarias, y un aumento estimado del 11% en los kilómetros recorridos. Asimismo, el tiempo de ciclo asciende a 411,6 minutos (6,86 horas), con tareas de manipulación que representan un 21% del total (83,8 minutos). Estas diferencias resaltan cómo la elección tecnológica en el transporte impacta en el uso eficiente de los recursos y en el dimensionamiento de la flota.



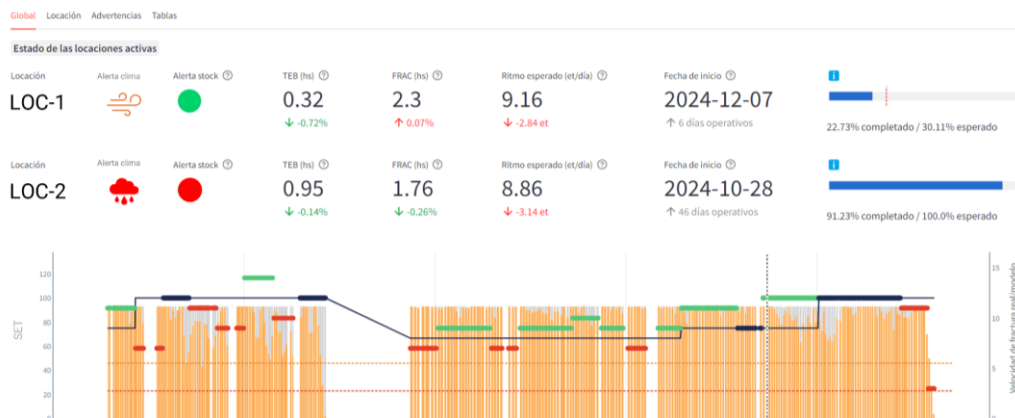
**Figura 11.** Experimento de simulación comparativo de dos tecnologías de transporte.

### **Optimización operativa y en tiempo real del abastecimiento de agentes de sostén**

Como se ha mencionado previamente, el diseño y la gestión de la cadena de suministro del agente de sostén, desde una perspectiva jerárquica, abarca el análisis de tres niveles de

decisión: estratégico, táctico y operativo. En relación con este último, se propone la incorporación de herramientas que permitan respaldar la toma de decisiones operativas diarias, facilitando una asignación eficiente de recursos y brindando capacidad de respuesta frente a imprevistos o eventos disruptivos que puedan surgir respecto a lo previamente planificado.

Con el objetivo de atender esta problemática, se plantea complementar la gestión operativa mediante la implementación de un tablero de control que permita el monitoreo en tiempo real del nivel de *stock* de agente de sostén en las distintas locaciones. Esta herramienta tiene la finalidad de emitir alertas ante situaciones cercanas a umbrales críticos, advirtiéndolo al usuario sobre la necesidad de actuar para prevenir eventuales quiebres de *stock*, los cuales podrían derivar en la detención de los equipos y, consecuentemente, en tiempos improductivos. La Figura 12 presenta una vista del tablero, donde se observa cómo el sistema emite una señal de alerta ante una caída abrupta en los niveles de *stock*, habilitando al usuario a tomar decisiones de forma oportuna.



**Figura 12.** Vista del tablero de control operativo.

Adicionalmente, el tablero incorpora un indicador que refleja el ritmo real de fractura alcanzado en comparación con el ritmo planificado. Este indicador constituye una herramienta complementaria que permite al usuario anticipar acciones correctivas o de ajuste frente a desviaciones operativas, ya sea por una aceleración o desaceleración en la velocidad de ejecución de las etapas de fractura previstas para un determinado *pad*.

Es clave acá remarcar que las alertas no solo son reactivas, sino predictivas. Esto significa que, ante el cambio en las velocidades de fractura y en los tiempos de ciclo, se pueden predecir problemas en el abastecimiento con el tiempo suficiente para accionar sobre el sistema y evitar los quiebres de stock. Es clave esta anticipación, más aún en ciclos de abastecimiento largos donde el impacto en las decisiones lleva su tiempo. Estas herramientas predictivas se construyen con modelos de *forecast* y *machine-learning*.

De manera complementaria a lo expuesto previamente, el tablero de control incorpora indicadores vinculados a eventos climáticos y posibles demoras o inconvenientes en los trayectos utilizados por la flota. A través del análisis de datos recolectados mediante el sistema de monitoreo GPS de los vehículos, es posible estimar y estudiar las velocidades promedio de circulación en cada segmento del ruteo asignado. Dicho análisis, permite evaluar y determinar el estado de los mismos, a partir del cual se emiten alertas cuando se llegue a ciertos puntos

críticos predefinidos, facilitando una respuesta oportuna ante potenciales disrupciones en el sistema.

#### *Asignación óptima de flota y balanceo de kilometraje en el abastecimiento de última milla*

En el nivel operativo coexisten múltiples *sets* de fractura que operan en simultáneo, lo que implica una alta complejidad logística por la necesidad de coordinar un gran número de viajes diarios, que son atendidos por el mismo conjunto de recursos de transporte. Esta competencia por los recursos vuelve un desafío la planificación logística diaria, que debe garantizar el cumplimiento de la demanda en ventanas de tiempo ajustadas maximizando la utilización de los recursos disponibles. Resulta indispensable realizar una asignación eficiente y dinámica de los vehículos a las locaciones para optimizar el rendimiento operativo y asegurar una distribución equilibrada de la carga de trabajo entre las unidades de transporte.

Uno de los problemas operativos frecuentemente detectados es, justamente, la desigual distribución de los kilómetros recorridos entre las unidades de transporte. Si una unidad en específico realiza sistemáticamente el mismo circuito de abastecimiento a una locación cercana al punto de acopio, entonces la distancia recorrida tendrá una representación menor en el tiempo de ciclo completo, en comparación con una unidad que abastece a una locación lejana, donde los tiempos de carga y descarga son relativamente menores. Por lo tanto, los primeros vehículos tenderán a recorrer en promedio menos kilómetros dadas las mismas horas operativas. Esta desproporción en la asignación puede afectar los acuerdos contractuales con los diferentes contratistas, que usualmente incluyen cláusulas de kilometrajes mínimos y distribución homogénea de las cargas. Para abordar este problema, es posible desarrollar herramientas basadas en optimización matemática que den soporte al balanceo y asignación inteligente de viajes, distribuyendo los kilómetros de manera equitativa y minimizando el costo operativo.

Una función objetivo tentativa para este modelo, podría verse de la siguiente manera:

$$\min \sum_{i,j,k} c_{i,j,k} \cdot x_{i,j,k} + \lambda \cdot z_{max}$$

Donde el primer término representa los costos totales a través de  $x_{i,j,k}$  que representa la asignación del viaje de abastecimiento  $j$  a la locación  $i$  al camión  $k$ ,  $c_{i,j,k}$  el costo logístico asociado a esa asignación, y el segundo término representa la penalización al desbalance en la asignación de kilómetros a través del parámetro de ponderación  $\lambda$  y la variable  $z_{max}$  que representa el máximo de kilómetros totales recorridos entre todas las unidades.

Donde para todo  $k$ :

$$z_k \leq z_{max}$$

$$z_k = \sum_{i,j} d_i \cdot x_{i,j,k}$$

Siendo  $d_i$  la distancia desde el punto de abastecimiento a la locación  $i$ . Observar que la variable  $z_{max}$  es siempre más grande que la distancia total recorrida por cualquier de los vehículos, pero que al mismo tiempo debe ser minimizada. Esta función objetivo lo que consigue es generar un balance en las distancias recorridas, minimizando aquellos valores máximos en ciertas unidades.

Otras restricciones de este modelo representan la asignación unívoca de viajes a camiones, el cumplimiento total de la demanda de agentes, la capacidad de carga de las unidades de transporte, el número de recursos y las ventanas de tiempo dentro de las cuales los mismos se encuentran operativos, así como también la estimación de tiempo total de tiempo de trabajo de cada unidad, considerando tanto los viajes como las actividades de espera, carga y descarga.

## Conclusiones

Este trabajo aborda de forma integral el diseño estratégico, la planificación táctica y la gestión operativa de la cadena de suministro de agentes de sostén para operaciones no convencionales, con foco en el yacimiento de Vaca Muerta. A través de una combinación de modelos conceptuales de cadenas de suministro, optimización matemática, simulación de eventos discretos y análisis de datos, se desarrollaron herramientas que permiten tomar decisiones informadas en distintos niveles jerárquicos: desde el diseño de configuraciones logísticas eficientes y resilientes, hasta el dimensionamiento óptimo de flota y el monitoreo operativo en tiempo real.

El trabajo demuestra que decisiones acertadas en infraestructura, diseño de la red, políticas de inventario y asignación de recursos pueden traducirse en una mejora en la eficiencia de las operaciones y la reducción de costos operativos dentro de la provisión de un insumo clave en una actividad crítica para el futuro del yacimiento y las explotaciones no convencionales.

Además, se presentó una solución que, combinando técnicas rigurosas y datos reales, permite simular escenarios complejos, analizar riesgos y brindar soporte a la toma de decisiones. La herramienta desarrollada, validada en casos reales, facilita la planificación logística con un enfoque dinámico y predictivo, reduciendo la dependencia de tareas manuales y promoviendo una gestión más ágil, eficiente y rigurosa. Este enfoque representa un paso concreto hacia la digitalización avanzada de las operaciones logísticas, así como a la introducción de herramientas de *decision intelligence* en el sector.

De cara al futuro, resulta fundamental continuar perfeccionando estas herramientas para acompañar el crecimiento sostenido de la actividad no convencional en Vaca Muerta. La evolución del contexto operativo, las restricciones de infraestructura y los desafíos ambientales exigen soluciones cada vez más flexibles, predictivas y orientadas a la toma de decisiones en tiempo real. Integrar nuevas fuentes de datos, incorporar inteligencia artificial y reforzar la interoperabilidad con otros sistemas serán pasos clave para consolidar una cadena de suministro inteligente, eficiente y alineada con los objetivos de productividad y sostenibilidad del desarrollo energético argentino.

## Bibliografía

[1] A. Ramos-Peon, Argentina Oil & Gas Outlook: The Path to >1 MMbpd in Vaca Muerta, presentación en el evento H24 organizado por el IAPG, mayo 2024. Accedido el 9 de mayo de 2025.

[2] M. G. Drouven, D. C. Cafaro, I. E. Grossmann, Mathematical programming models for shale oil & gas development: a review and perspective, *Computers & Chemical Engineering* 177 (2023) 108317.

[3] U.S. Energy Information Administration, “*Shale oil and shale gas resources are globally abundant*” <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=11611>

#### **Breve CV:**

Nombre y apellido: **María Antonella Solis**

Título y lugar de estudio: Ingeniera Industrial, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral (U.N.L).

Trayectoria: Participación en proyectos basados en simulación y optimización matemática, aplicados en el área de planificación de operaciones logísticas y productivas, en la industria manufacturera y en *Oil & Gas*, durante mi experiencia en la consultora de base tecnológica *Nonlinear Tecnología*.

Cargo actual en la empresa: Ingeniera de soluciones de simulación y optimización

Nombre y apellido: **María Josefina Fiorini**

Título y lugar de estudio: Ingeniera Industrial, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral (U.N.L).

Trayectoria: Participación en proyectos de optimización, simulación e investigación operativa, con aplicación en el diseño de herramientas de *decision intelligence* en *Nonlinear Tecnología*, en particular para la industria del O&G, especialmente en operaciones no convencionales.

Cargo actual en la empresa: Ingeniera de soluciones de simulación y optimización

Nombre y apellido: **Agustín Francisco Montagna**

Título y lugar de estudio: Doctor en Ingeniería Industrial (UTN – FRSF). Ingeniero Industrial (FIQ – UNL)

Trayectoria: Dirección general en *Nonlinear Tecnología*. Seguimiento de proyectos de optimización. Participación en variados proyectos de aplicación de herramientas de *decisión intelligence* para la industria del O&G, en particular en operaciones no convencionales.

Cargo actual en la empresa: Dirección de proyectos de *decision intelligence*