

**INTEGRACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DESPACHOS EN UNA PLANTA DE
CONCRETO**

**JUAN CARLOS CARRILLO GUERRERO
KEVIN SEBASTIAN NARVAEZ QUIÑONES**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE BUGA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2020**

**INTEGRACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DESPACHOS EN UNA PLANTA DE
CONCRETO**

TRABAJO DE GRADO

**JUAN CARLOS CARRILLO GUERRERO
KEVIN SEBASTIAN NARVAEZ QUIÑONES**

**DIRECTOR
Msc. JUAN PABLO OREJUELA CABRERA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE SEDE BUGA
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2020**

Resumen

En el siguiente trabajo de grado se presenta una propuesta para una integración de la producción y despachos en una empresa productora de concreto usando un método de programación entera mixta. Para esto se realiza una caracterización desde lo teórico y práctico en los procesos de programación de la producción y despachos del concreto premezclado, lo cual implica una búsqueda en el estado del arte del tema propuesto, por otra parte, se define los aspectos particulares como sus medidas de desempeño. Después se realiza la propuesta del modelo matemático con la literatura correspondiente y la selección del lenguaje donde se desarrolla, en este caso el solucionador AMPL, la finalidad del modelo es integrar la programación de la producción y despachos de tal manera que permita la optimización de la flota de vehículos. Por último, se valida el modelo matemático en el caso de estudio con su respectivo análisis de resultados, donde se definen escenarios de sensibilidad y también se realiza un análisis del impacto en el modelo de acuerdo con variaciones en los parámetros.

PALABRAS CLAVE: Concreto premezclado, VRPTW, programación lineal, despachos, producción, programación integrada.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO 1: PROBLEMA DEL TRABAJO DE GRADO	9
1.1 Planteamiento del problema.....	9
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo general.....	11
1.2.2 Objetivos específicos	11
1.3 Antecedentes	12
1.4 Propuesta metodológica.....	15
CAPÍTULO 2: PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DESPACHOS	
ASPECTOS GENERALES	16
2.1 Programación de la producción y despachos	16
2.1.1 Programación de operaciones	16
2.1.2 Despachos.....	17
Problema del VRPTW	18
2.2 Planeación, programación, control y despacho de la producción de concreto ...	20
2.2.1 Planeación y programación de la producción de concreto	20
2.2.1.1 Control y almacenamiento de materiales.....	21
2.2.1.2 Dosificación de materiales.....	21
2.2.1.3 Mezclado de concreto	21
2.2.2 Transporte de concreto.....	21
2.3 Caracterización del proceso de programación de la producción y despacho caso de estudio.	24
2.3.1 Planeación.....	24
2.3.2 Programación de las operaciones.....	24
2.3.3 Producción del concreto	25
2.3.4 Despachos.....	25
2.4. Indicadores de desempeño	27
2.4.1 Producción.....	27
2.4.2 Despachos.....	27
CAPÍTULO 3: MODELO MATEMÁTICO DE INTEGRACIÓN DE LA	
PROGRAMACIÓN Y DESPACHO DE LA PRODUCCIÓN DEL CONCRETO	29

3.1 Integración de la producción y despachos.....	29
3.2 Formulación matemática	30
3.2.1 Formulación verbal	30
3.2.2 Descripción del modelo matemático	33
CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RESULTADOS.	37
4.1 Caso de estudio	37
4.2 Análisis sensibilidad y resultados	41
4.2.1 Caso 1: 3 clientes, ventana de tiempo reducida y aumento de demanda....	41
4.2.2 Caso 2: 4 clientes	42
4.2.3 Caso 3: 5 clientes	43
4.2.4 Caso 4: 6 clientes	44
4.2.5 Caso 5: 7 clientes	45
4.2.6 Caso 6: variación de parámetros	49
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	53
ANEXOS	55
Anexo 1. Código en AMPL – Caso de estudio.....	55
Anexo 2. Enfoques de investigación para el problema de entrega de concreto	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Factores y sub-factores que afectan el cronograma.....	23
Tabla 2. Solicitud de programación de pedido	37
Tabla 3. Programación día laboral	38
Tabla 4 Programación AMPL	40
Tabla 5. Utilización vehículos – AMPL	40
Tabla 6. Utilización vehículos Caso de estudio	41
Tabla 7. Programación 3 clientes – Caso 1.....	42
Tabla 8. Programación 4 clientes – Caso 2.....	43
Tabla 9. Programación 5 clientes – Caso 3.....	44
Tabla 10. Programación 6 clientes – Caso 4.....	45
Tabla 11. Programación 7 clientes – Caso 5.....	46
Tabla 12. Ventas de concreto	48
Tabla 13. Indicadores	49
Tabla 14. Variación parámetros	49
Tabla 15. Variación de la ventana de tiempo final – clientes.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Producción y colocación del concreto	23
Figura 2. Procesos para la fabricación de concreto	26
Figura 3. Esquema de recorrido de un vehículo.....	31
Figura 4. Esquema del modelo matemático	32
Figura 5. Ubicación sitios de construcción	39
Figura 6. Solución AMPL	39
Figura 7. Variación de ventas	48

INTRODUCCIÓN

La determinación de los factores de competitividad debido al constante crecimiento de las empresas para afrontar y adaptarse a los cambios que se presentan en el entorno implica producir bienes o servicios a costos bajos, con estándares de calidad y tiempos de entrega apropiados, lo que conlleva a la satisfacción del cliente y a su vez genera una ventaja competitiva, además de mayores utilidades para la organización.

Entre los principales sectores que impulsan el crecimiento de la economía del valle del cauca se destaca el de la construcción, el aumento del área total aprobada para dicha actividad se encuentra en relación con un mayor consumo de cemento premezclado, lo cual se evidencia en un crecimiento porcentual del 8,8%, dicho producto tiene como principal destino de uso la construcción de viviendas, edificaciones y obras civiles(Colombia. Camara de Comercio de Cali 2019),por tal motivo es importante hacer énfasis en las plantas de concreto lo cual permitirá contribuir a su eficacia, precisión y flexibilidad.

La industria manufacturera de concreto premezclado tiene una característica notable considerando que se enfrenta a las mayores barreras de transporte, así este tipo de problema se debe a que el concreto tiene una baja relación valor/peso y es altamente perecedero; es necesario descargarlo del camión antes de que se endurezca (Syverson 2008), la relación que se menciona previamente es una medida del valor monetario que un producto tiene por kilogramo o libra. De este modo la programación de la producción y coordinación de los despachos en una planta de concreto son fundamentales para que el producto llegue al cliente en un tiempo adecuado, así su integración determina un factor trascendental en la cadena de suministro del concreto.

En contraste con el problema de transporte, cabe mencionar que los camiones de entrega de concreto también tienen una restricción de capacidad que limita el alcance de su servicio, estos parámetros deben tenerse en cuenta cuando se despachan los camiones (Yan y Lai 2007),desde otro punto de vista se presentan tiempos improductivos cuando no se dispone de los camiones, ya que el proceso de producción no puede comenzar, pues una vez que el mezclador combine todos los elementos del concreto debe proceder a vaciar el producto al vehículo, sin embargo la capacidad limitada por la disponibilidad de una sola máquina mezcladora como lo es en el caso de estudio, genera tiempos de espera para la entrega del concreto.

La fase de planificación en la gestión del transporte es significativa en el ambiente de la industria de concreto premezclado, por lo que es un proceso de entrega como etapa final después de terminada la producción que influye en los ingresos de la empresa. Lo cual conlleva que al mejorar la eficiencia del proceso de entrega, planificación y programación se logre un proceso flexible y preciso que permita responder a diferentes situaciones que surjan; potencializando la competitividad en la industria de concreto, mediante la integración del proceso de despacho y producción procesos que trabajan en conjunto para el ciclo de desarrollo del concreto (K Thawongklang y Tanwanichkul 2016).

La producción y distribución son tipos de procesos en la cadena de suministro que están plenamente relacionados, por lo que el despacho del producto es una etapa que inicia cuando la producción completa su tarea. A lo largo de los años este proceso se ha tratado de forma separada y de manera secuencial, lo que conlleva a ignorar elementos y restricciones de cada etapa. Esta separación conduce a soluciones subóptimas, por lo que la integración entre la producción y distribución puede llevar a obtener una mejora entre el 5% y el 20% comparada con un enfoque sin coordinación, en ciertos casos se puede realizar la mejora y llegar a un 40%. El enfoque integrado suministra:

1. La asignación de los pedidos de los clientes a los recursos;
2. La hora de inicio y finalización de cada pedido;
3. La asignación de los pedidos completados a los vehículos de entrega;
4. Rutas de entrega;
5. Tiempo de entrega del pedido.

El resultado es un plan de producción y distribución específico, entregando información del tiempo exacto de cada pedido individual, con el objetivo de satisfacer las demandas de los clientes a tiempo (Moons et al. 2017).

CAPÍTULO 1: PROBLEMA DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 Planteamiento del problema

La cadena de suministro y la logística se definen como un grupo de actividades funcionales que incluyen el control de inventarios, transporte, producción, etc. Donde se repite un ciclo de flujo constante, en el cual la materia prima se transforma en producto terminado y se le agrega valor para el consumidor final. Un servicio o producto carece de valor si no está disponible en el momento y lugar oportuno, en el tiempo que una organización emprende una acción de mover un producto hasta el consumidor o de tener un inventario para satisfacer las necesidades oportunas del cliente, está generando valor a su producto (Ballou et al. 2004).

Por ende, la coordinación de la cadena de suministro es un factor de suma importancia, ya que ayuda a mejorar todas las etapas de la cadena y aumentar las utilidades totales de la cadena de suministro (Chopra et al. 2008).

Esta coordinación requiere que cada etapa de la cadena tenga en cuenta el impacto de las decisiones que se producen en otras etapas. La carencia de coordinación está dada a los diferentes objetivos que se contraponen, motivo por el cual la información que fluye por cada etapa se retrasa o distorsiona. Los objetivos contradictorios de las diferentes etapas de la cadena se originan porque cada una de las etapas tiene un designado diferente. Esto genera que en cada etapa de la cadena se trate de maximizar las propias utilidades, acciones que reducen la utilidad total y el desempeño de la cadena (Chopra et al. 2008).

Por lo tanto, la cadena de suministro debe tener una integración y cada elemento velar por la consecución de los objetivos, reducción de los costos y plazos de entrega. A fin de evitar estos costos, la producción y los procesos de logística deben estar integrados en toda la línea de la cadena de suministro (Ehm y Freitag 2016). Según Arshinder, Kanda, y Deshmukh (2008) en la coordinación de la producción y distribución nacen ciertos conflictos que se enumeran en los siguientes:

- La producción tiene un enfoque meramente operativo lo que conlleva a manipular el producto en un lugar determinado; esto agrega valor de uso al producto, a diferencia de la distribución que se interesa en agregar valor con respecto a la posición y el tiempo.
- Diferencias en las métricas de rendimiento, como calidad, reducción en el costo y mejoras de nivel de servicio, donde cada métrica puede generar conflictos.
- La producción está preocupada, con la fabricación de bajo costo, con tamaños de lotes grandes y programas uniformes. Mientras que la distribución se basa en un enfoque de servicio al cliente, tamaños de lotes pequeños y cumplimiento de órdenes.

De tal forma que se presentan problemas en la integración de los procesos de producción y los procesos logísticos, como es el caso analizado de una planta manufacturera de concreto ubicada en el municipio de Yumbo. El producto final que se obtiene puede incluirse como un artículo perecedero, es decir no se puede almacenar en una bodega durante un determinado tiempo, ya que tiene restricciones de endurecimiento, pues cada tipo de concreto bajo ciertas especificaciones está relacionado con un intervalo en el que se solidifica.

Así la producción se limita a los pedidos de requerimiento de concreto por parte de las obras de construcción, de igual manera es importante resaltar que dicho proceso no puede iniciar sin que los camiones estén disponibles, además se cuenta con una capacidad de carga homogénea para los 5 vehículos que tiene la empresa, dicha capacidad es de $9m^3$, por otro lado es posible realizar una entrega a la vez debido a que la planta solo dispone de una máquina mezcladora, esta con una tasa de producción de $1m^3$ cada 2 minutos en promedio, por último es fundamental mencionar que se cuenta con un factor limitante para almacenamiento de la arena debido al espacio disponible.

Con el fin de obtener las materias primas con anterioridad, se realiza una programación semanal, de tal modo que el miércoles el jefe de producción recibe las órdenes de trabajo, por otra parte, los procesos de programación de la producción y despacho de vehículos se realizan de manera convencional, lo que genera incumplimiento en los tiempos estipulados con las obras de construcción. Todos los factores y datos con respecto al proceso de producción de concreto son suministrados por el Director Técnico (A. Escandón, comunicación personal, 15 de enero 2019).

El problema se incrementa dada la complejidad de integrar producción y la programación de los vehículos, pues si no se cumple con los tiempos de entrega se genera un costo adicional en relación con el personal, es decir las horas extra; se debe agregar que en algunos casos en los cuales el camión no llegue a tiempo, el concreto podría no ser utilizado debido a las características de endurecimiento, además si un vehículo no se encuentra disponible en la planta no se puede iniciar con la producción, lo que conlleva a un tiempo ocioso en dicho proceso. Con base en lo anterior se busca dar respuesta a la siguiente pregunta:

¿Cómo integrar la programación de la producción y despachos en una planta de concreto de tal manera que permita la optimización de la flota de vehículos?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Proponer una estrategia metodológica para la integración de la programación y despacho de la producción en una empresa productora de concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los procesos de programación de la producción y despacho en la industria del concreto.
- Formular un modelo matemático que permita integrar la programación y despacho de la producción de concreto.
- Validar el modelo matemático propuesto en el caso de estudio con su respectivo análisis de resultados.

1.3 Antecedentes

La integración entre la producción y distribución puede generar un ahorro sustancial en los costos globales y a una mejora en el servicio relevante mediante el aprovechamiento de las economías de escala de producción y transporte, equilibrando los lotes de producción y las cargas de vehículos (Arshinder, Kanda, y Deshmukh 2008)

De este modo los autores Thawongklang y Tanwanichkul (2016) resaltan la importancia de aumentar la eficiencia para ser más competitivos en el entorno de las empresas productoras de concreto, por ende este artículo tiene como propósito incrementar la eficiencia del proceso de entrega por medio del uso de un modelo de la programación de la producción y envío de los camiones, de tal modo su desarrollo se basa en dos reglas de prioridad, la fecha de vencimiento más temprana primero (EDD) y primero en llegar primero en ser servido (FCFS) lo cual aporta una mayor exactitud y precisión en la entrega del concreto.

Los datos de entrada que se quieren para esta investigación son: el tiempo de viaje, el vertido de concreto, el volumen de concreto, la capacidad del camión y la fecha y hora de vencimiento; cabe resaltar que el primer dato mencionado se determinada mediante el uso del software GIS–Geographic Information Systems (ArcGIS), lo que a su vez proporciona información acerca de la velocidad media de los camiones y distancias, es preciso señalar que el modelo se aplica a una empresa que cuenta con una sola máquina mezcladora.

De acuerdo con los autores se utiliza Visual Basic para el procesamiento de datos, el cual proporciona como resultado la secuenciación de trabajos, el lugar de entrega, la capacidad de carga por ciclo, el tiempo de arranque y retorno del camión a la planta, además el modelo podría usarse para calcular la tardanza total de los planes de despacho de camiones y un número correcto de estos.

Otro caso lo presentan los autores Liu et al. (2017) en el que proponen un modelo de red de espacio-tiempo como solución a la programación de la producción y despachos de los camiones, además se tiene en cuenta el envío de las bombas a los diferentes sitios de construcción que las requieren, con el propósito de ayudar a la fundición e incluso el uso de múltiples mezcladores, los anteriores aspectos determinan el modelo como una clasificación NP-hard en términos de optimización.

Al considerar la dificultad del problema los autores desarrollan un algoritmo heurístico con base en reglas de prioridad, lo que proporciona una solución a la problemática. De modo que el conjunto de reglas establecido se presenta de la siguiente manera: reglas para la programación de la producción, el despacho de camiones, el despacho de bombas y la programación del mezclador, es necesario resaltar que el modelo incluye costos de penalización, costos de producción, costos de los camiones y de las bombas. Las penalizaciones se

asumen cuando el tiempo de llegada del camión excede el tiempo de operación de la obra de construcción, dicho costo es el resultado de la espera por parte del personal y equipo en la obra.

Para la evaluación del modelo los autores deciden realizarlo bajo cuatro casos: sitios de descentralización y más pedidos (caso 1), sitios de descentralización y pocos pedidos (caso 2), sitios de concentración y más órdenes (caso 3) y por ultimo sitios de concentración y pocas pedidos (caso 4), para ello las variables que se tienen en cuenta hacen referencia a las posiciones geográficas de los sitios de construcción y la cantidad de pedidos, donde este último se clasifica bajo la siguiente norma, si son más de 15 pedidos, se encontrara en la categoría de más pedidos, por otro lado el grado de congestión de cada sitio se multiplica por la distancia (km) entre el sitio de construcción y la planta, si su resultado es mayor a 22 se considera como sitios de descentralización. Finalmente, como resultado se obtiene que los tiempos de viaje de los vehículos bajo varios conjuntos de reglas se ven afectados en un grado significativamente mayor por la ubicación de los sitios de construcción que por la cantidad de pedidos.

Es posible que al no entregar el cemento premezclado a tiempo se pueden producir demoras posteriores en la construcción o incluso inutilizar el concreto si el límite de tiempo para el endurecimiento del concreto se ha excedido de acuerdo a Park et al. (2011) por tal razón los autores desarrollan un modelo de simulación dinámica para tratar este tipo de problema; se debe agregar que se enfocan en el periodo entre el despacho del camión y el tiempo de espera en el sitio de descarga, de manera que para el flujo de trabajo dentro de la planta de procesamiento el modelo solo considera el flujo de arena y agregados a través de la tolva de pesaje y el mezclador, pues otros materiales o procesos influyen poco en el rendimiento de la planta, mientras tanto para el ciclo de los camiones mezcladores se considera 8 etapas, desde que el vehículo se encuentra en espera hasta que regresa a la planta.

Entre las variables que determinan el flujo del modelo en la investigación se encuentran: tiempo medio para suministrar material en la tolva, tiempo promedio de posicionamiento, tiempo promedio para cargar la mezcla, tiempo real de transporte, entre otros. Así la estructura del modelo se pone a prueba por medio de la reproducción de datos de rendimiento obtenidos de encuestas de expertos, al considerar las características de las operaciones del concreto premezclado se obtiene como resultado que es posible estimar el tiempo de espera de los camiones mezcladores y tiempo de entrega, por lo cual dicha información sería útil para los procesos de toma de decisiones involucrados en la planificación.

Devapriya, Ferrell, y Geismar (2017) involucran un caso aplicado de una instalación de producción que tiene una capacidad limitada y produce un producto perecedero, donde su entrega requiere el viaje a diferentes sitios antes de que expire el producto. Para el problema se considera una planta, que solo produce un producto en particular y su demanda es conocida. El principal objetivo de la investigación se centra en determinar la cantidad de camiones, rutas y la programación de la producción que minimice el costo total de la

distribución. Por lo cual proponen un modelo de programación lineal entera mixta que para problemas pequeños puede generar una solución óptima, el modelo fue desarrollado en un software de optimización llamado CPLEX, el optimizador resolvió el problema con 4 clientes de manera óptima en menos de 0.01 horas, pero no pudo resolver ningún problema mayor a 4 clientes en un buen tiempo, por lo cual tomó alrededor de 20 horas en encontrar una solución. Por ende, se recurrió a métodos heurísticos como es el método de rutear primero- asignar después, obteniendo buenas soluciones aproximadas a problemas de tamaño realista.

Sa y Maghrebi (2018) examinan las implicaciones que tiene la inexactitud del método espacial para los cálculos del tiempo de viaje. Por lo que proponen un procedimiento para obtener el tiempo de viaje, mediante la utilización de datos reales dados por la API de Google Maps. La metodología utilizada fue un modelo de programación con restricciones, donde su objetivo es minimizar el costo total de transporte, cubriendo el mayor número de clientes. El proceso para integrar la API y el modelo consta de cinco pasos. Donde inicia con los datos de la ubicación geográfica de los clientes, almacenes, puntos de inicio y finalización, estos se organizan en Matlab y se colocan en un formato compatible con la API. Después la información de enrutamiento para cada par de origen-destino es requerida por la API donde esta devuelve la respuesta con un archivo de intercambio de datos. La información suministrada por la API es analizada por Matlab y guardada en una matriz, la matriz generada se utiliza como datos de entrada para el modelo de optimización. Los autores indican que el caso de estudio analizado en una planta de concreto de Australia, los resultados que obtuvieron fue que el costo total, utilizando la nueva propuesta fue 21,3% mayor que el que se obtuvo en el modelo de tiempo espacial, por lo que la diferencia refleja de que el tiempo de viaje real es mayor al espacial y tiene un fuerte impacto en los resultados.

Liu, Zhang, y Li (2014) presentan un enfoque para optimizar las operaciones de la producción y entrega en plantas de concreto, donde aplican un método de flujo de red y la entrega del concreto se realiza con camiones y bombas por lo que la distribución está sujeta a ventanas de tiempo. Para abordar la integración utilizan un modelo matemático, con el objetivo de minimizar el costo total de las plantas y los sitios de construcción, también realizan la solución al problema mediante un algoritmo genético, que tiene como cromosomas los sitios de construcción, el orden de entrega y la ID del vehículo. Donde la generación aleatoria de soluciones iniciales para el algoritmo genético condujo a mejores resultados, la investigación realiza diferentes análisis de sensibilidad con respecto al tamaño de la flota de los vehículos, las tasas de costo y las ventanas de tiempo a los sitios de construcción, cada análisis da como resultado parámetros que ayudan a tomar decisiones a nivel estratégico.

1.4 Propuesta metodológica

El desarrollo de la estrategia metodológica se divide en tres etapas, de manera precisa se encuentra las siguientes etapas y subdivisiones:

ETAPA 1: Caracterizar desde lo teórico y práctico los procesos de programación de la producción y despacho en la industria del concreto

- Buscar en el estado del arte trabajos en relación con los procesos de programación de la producción y despacho.
- Realizar una caracterización del proceso de programación de la producción y despacho con base en el caso de estudio.
- Identificar diferencias entre el proceso de planeación, programación, control y despacho de la producción.
- Definir los aspectos particulares del proceso de producción del concreto.
- Definir los aspectos particulares del proceso de despacho.
- Determinar las medidas de desempeño en el proceso de producción y despacho.

ETAPA 2: Proponer un modelo matemático que permita la integración de la programación y despacho de la producción del concreto

- Revisar la literatura correspondiente
- Seleccionar atributos particulares.
- Seleccionar lenguaje de modelación y solver
- Realizar el proceso de modelación

ETAPA 3: Validar el modelo matemático propuesto en el caso de estudio con su respectivo análisis de resultados

- Definir escenarios de sensibilidad
- Identificar el comportamiento del modelo ante variaciones.
- Analizar y concluir los resultados.

CAPÍTULO 2: PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN Y DESPACHOS ASPECTOS GENERALES

A continuación, se tratarán los temas con relación a los procesos de programación de la producción y despacho, tanto en el caso de estudio como las diferentes investigaciones realizadas. Como punto de partida se presenta un entorno en la industria convencional, seguido de la industria del concreto, esto con el fin de identificar sus principales particularidades y diferencias, así mismo determinar los elementos del proceso de producción del concreto que influyen en la programación de la producción y los elementos del proceso de despacho que determinan la entrega, como también las medidas de desempeño que permiten evaluar a una empresa en distintos aspectos, lo anterior se realiza con el propósito de dar cumplimiento al primer objetivo.

2.1 Programación de la producción y despachos

2.1.1 Programación de operaciones

De acuerdo a Krajewski, Ritzman, y Malhotra (2008), la programación es un pilar de gran importancia en la industria, teniendo siempre presente los diferentes aspectos cruciales al momento de realizar una, tales como, estudios previos del plan de mercado, identificando los segmentos nuevos y los ya existentes que se necesitan para seguir siendo competitivo en la industria.

Se puede emplear modelos de optimización para diseñar programas genéricos a costo mínimo que cubra todas las rutas y tengan presente el cumplimiento de las restricciones; sin embargo, la programación no termina con la estructuración de rutas y personal, ya que no se está exento de que se presenten fallas mecánicas y demás factores externos que pueden alterar la programación inicial, es necesario ágilmente encontrar la solución al costo más bajo posible.

La programación eficaz es esencial para las operaciones exitosas, en esta se estructura, se asigna y se presupuestan recursos con fines específicos, se diseñan procesos formando cadenas de valor y las principales técnicas de planificación para operarlas con eficiencia.

El diseño y planificación debe estar bien estructurado, ser flexible, tecnologías, bajo costo, localizar en zonas estratégicas los centros de despacho, maquinaria, alianzas y/o convenios, contar con personal idóneo, coordinar programas eficientes de trabajo entre personal y proveedores, para así lograr asegurar que la totalidad de las restricciones se cumplan.

En la actualidad la programación es trascendental en cualquier sector de la economía, la programación de la demanda y la fuerza de trabajo son técnicas útiles en la industria de los servicios, en los procesos de manufactura se benefician de las mismas técnicas adicionando las operaciones.

En la administración de cadenas de valor se tiene en cuenta la estrategia de la cadena de suministro, localización, administración de inventarios, pronósticos, planificaciones de ventas y operaciones, planificación de recursos y la programación.

Es significativo identificar las medidas de desempeño que se van a utilizar en los programas, dentro de las cuales se encuentra:

- El tiempo de flujo del trabajo, siendo este la cantidad de tiempo que un trabajo pasa en el servicio o sistema manufacturero.
- Lapso de fabricación, el cual es el tiempo necesario para completar un grupo de trabajo.
- Retraso, se evidencia cuando la cantidad de tiempo en que un trabajo no fue entregado en la fecha establecida.
- Inventario de trabajo en proceso, es cualquier trabajo que este en fila de espera.
- Inventario total, es la medida de desempeño que se usa para medir la eficacia de los programas para procesos manufactureros.
- Utilización, es el porcentaje de tiempo de trabajo empleado productivamente.

Los programas de operaciones hoy en día son herramienta de máxima efectividad que nos ayuda en diferentes áreas, pero especialmente en la administración de organizaciones, éstos son planes a corto plazo con el fin de implementar el programa maestro de producción, se centra en el volumen y tiempo de producción de productos, la utilización de la capacidad de las operaciones y establecimiento de un equilibrio entre los productos y la capacidad entre los distintos niveles para lograr competir adecuadamente.

2.1.2 Despachos

El despacho de los bienes se trata como un servicio en un instante de tiempo, con un conjunto de clientes y vehículos que se encuentran en los depósitos o plantas y realizan sus viajes utilizando un entramado de rutas. Para determinar el conjunto de rutas para satisfacer el servicio, se abarca el enrutamiento de vehículos, donde un vehículo tiene un punto de inicio y final, este caso en el depósito o planta asignado, con el objetivo de cumplir las entregas y minimizar el costo total (Toth y Vigo 2001).

La literatura considera los problemas relacionados con distribución de bienes entre depósitos y clientes, llamados como problemas de enrutamiento, o programación de vehículos. Los VRPs se dividen en: rutas con vehículos capacitados (CVRP), vehículos con Backhauls, vehículos con recogida y entrega y vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW); este tipo de programación

determina el orden en que cada vehículo debe visitar a sus clientes con el objetivo de minimizar los costos de transporte. El VRPTW es una extensión del CVRP, donde se tienen restricciones de capacidad y cada cliente i tiene asociado un intervalo de tiempo $[a_i, b_i]$ denominado ventana de tiempo. El modelo de enrutamiento con ventanas de tiempo, en términos generales permite encontrar una colección exactamente K de circuitos simples con un mínimo costo para cumplir:

- Cada circuito llega a un nodo deposito o planta
- Cada nodo cliente es visitado exactamente por un solo circuito
- La suma de las demandas de los nodos visitados por un circuito no exceda la capacidad del vehículo
- Para cada cliente i , el tiempo de servicio inicia dentro de la ventana de tiempo y el vehículo está detenido por ese instante

Problema del VRPTW

El modelo describe un grafo $G = (V, A)$, compuesto por $V = \{0..n\}$ que es el conjunto de vértices y A como el conjunto de arcos (i, j) . Los vértices corresponden a los clientes, donde el nodo 0 representa el depósito, como también se puede representar con el nodo $n + 1$. $\Delta_k + (i)$ se refiere al conjunto de vértices j tal que el arco (i, j) se pueda alcanzar desde i . $\Delta_k - (i)$ es el conjunto de los vértices j tal que el arco (j, i) pueda acceder directamente a i . Se define como la red $G = (V, A)$ donde el deposito es representado por los nodos 0 y $n + 1$. Para toda ruta de vehículos factibles que corresponde a G , inician desde el nodo 0 y terminan en el nodo $n + 1$. Las ventanas de tiempo están asociadas con los nodos 0 y $n + 1$, $[a_0, b_0] = [a_{n+1}, b_{n+1}] = [E, L]$, E y L representan la salida más temprana posible del depósito y la última llegada posible. Se define una demanda nula y tiempos de servicio nulos para estos dos nodos $d_0 = d_{n+1} = s_0 = s_{n+1} = 0$. Solo existen soluciones factibles cuando $a_0 = E \leq \min_{i \in V \setminus \{0\}} b_i - t_{0i}$ y $b_{n+1} = L \geq \min_{i \in V \setminus \{0\}} a_i + s_i + t_{ij} > b_j$.

La representación matemática, define dos tipos de variables, una es $x_{ijk} (i, j) \in A$ la cual toma el valor de uno, si el arco (i, j) es usado por el vehículo k , sino toma el valor de cero. La segunda variable, es de tiempo, que indica el momento que inicia el servicio en el nodo, cuando es atendido por un vehículo k (Toth y Vigo 2001).

$$2.1 \quad \min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk}$$

$$2.2 \quad \sum_{k \in K} \sum_{j \in \Delta_k + (i)} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N$$

$$2.3 \quad \sum_{j \in \Delta_k^+(0)} x_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K$$

$$2.4 \quad \sum_{i \in \Delta_k^-(j)} x_{ijk} - \sum_{i \in \Delta_k^+(j)} x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K, j \in N$$

$$2.5 \quad \sum_{i \in \Delta_k^-(n+1)} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K$$

$$2.6 \quad x_{ijk}(w_{ik} + st(i) + t(i,j) - w_{jk}) \leq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in A$$

$$2.7 \quad a_i \sum_{j \in \Delta_k^+(i)} x_{i,j,k} \leq w_{ik} \leq b_i \sum_{j \in \Delta_k^+(i)} x_{i,j,k} \quad \forall k \in K, i \in N$$

$$2.8 \quad E \leq W_{ik} \leq L \quad \forall k \in K, i \in \{0, n+1\}$$

$$2.9 \quad \sum_{i \in N} d_i \sum_{j \in \Delta_k^+(i)} x_{ijk} \leq C \quad \forall k \in K$$

$$2.10 \quad x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, (i,j) \in A$$

$$2.11 \quad x_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in A$$

La función objetivo 2.1 indica la minimización del costo total, la restricción 2.2 asigna una ruta de vehículo a un solo cliente. La restricción 2.3-2.5 se caracterizan por el flujo que debe tomar el vehículo K , tanto si parte del nodo inicial, como a un punto final de recorrido. La restricción 2.6, 2.7, 2.8 y 2.9 garantizan la factibilidad de la programación con respecto a la capacidad C como al tiempo y al cumplimiento de las ventanas de tiempo.

2.2 Planeación, programación, control y despacho de la producción de concreto

2.2.1 Planeación y programación de la producción de concreto

Según Richmond (2011), la planeación de la producción en la planta de concreto programa con una semana de anticipación las solicitudes de concreto para las distintas obras, asegurando así el abastecimiento de las materias primas, lo que se emplea para la solicitud es una boleta de “solicitud de concreto”, en la cual se indica la fecha de trámite, lugar de obra, cantidad en m^3 de concreto solicitada y despachada, el diseño del concreto que es requerido, fecha que se pretende utilizar, hora y fecha del despacho, de igual manera anotar la cuenta a la que se carga la solicitud de producción controlando así los costos de las actividades.

Para la adquisición del cemento, se realiza licitación o se invita a participar a industrias cementeras, se realiza un proceso de estudios técnicos en el cual eligen la mejor opción, cuando ya se cuenta con el proveedor se realiza una compra general para los frentes de trabajo que lo requieran y se realiza el despacho del cemento en sacos de la planta de producción.

El encargado de la planta es quien coordina la logística y despachos de concreto, el inspector de control de producción y costos es quien lleva la documentación del tiempo laborado de los equipos, salida de concreto, entrada y salida de materias primas, además de la planilla de la planta, así las solicitudes de cemento a granel se deben realizar con una semana de anticipación y cemento por sacos con un día de antelación.

El flujo de concreto detalla el diseño de mezcla requerido para cada obra; de manera que, dependiendo de los diseños, se estiman las cantidades de las materias primas principales para la elaboración del concreto.

Es necesario implementar con rigurosidad el mantenimiento preventivo de cada una de las plantas de concreto para así prever posibles fallas y detectarlas antes de que generen un problema mayor.

La capacidad de las máquinas de concreto premezclado parece ser una limitación, ya que el concreto solo se puede mezclar y luego ser entregado en lotes, un vehículo a la vez, por lo tanto una combinación entre los horarios de producción y despacho de camiones en la secuencia de construcción es esencial para aumentar la capacidad operativa de la planta, ya que la mezcla parece ser un cuello de botella en todo el proceso de planificación, esto genera tiempo de espera para el camión de reparto en colas (Kittipong Thawongklang y Pitaksringkarn 2016).

El proceso de fabricación del concreto comprende en la preparación de la mezcla, por medio de los procesos de dosificación y mezclado, bajo los lineamientos indicados por el diseño de mezclas. Por la naturaleza de la mezcla esta no puede ser almacenada y tiene que ser transportada en una ventana de

tiempo. El tipo de operación de almacenamiento, dosificación y mezclado de los ingredientes se pueden efectuar dentro de la obra o puede realizarse fuera de ella, donde es necesario el transporte de la mezcla a la obra Figura 1.

2.2.1.1 Control y almacenamiento de materiales

Para el manejo del cemento en el sistema de producción debería tener un tipo de manejo a granel. El transporte de este material se realiza en camiones tipo silo y es descargado por diferentes herramientas, los silos para almacenamiento deben estar protegidos y tener un grado de ventilación para evitar la humedad. Los silos utilizados tienen que definirse para cada tipo de marca de cemento e igualmente contar con mecanismos que controlen y permitan un flujo. Para el almacenamiento de agua, se debe tener un sistema que permita la captación, la demanda de agua está ligada al tipo de planta, el sistema de mezclado como a condiciones ambientales. Los agregados tienen que tener un espacio que permita la circulación y operación, el patio donde se disponga el material debe permitir que el agregado no se contamine y permita el flujo de vehículos (Sanchez de Guzman 2001).

Por último, para el manejo de los aditivos, se rige bajo los lineamientos del fabricante, normas y especificaciones. Los aditivos en forma líquida su almacenamiento se realiza en tanques tipo herméticos protegidos del ambiente.

2.2.1.2 Dosificación de materiales

Los agregados y la dosificación deben realizarse por peso, para el proceso de medición de los agregados se debe operar de tal forma que se mantenga la granulometría deseada, utilizando el peso de los materiales y su factor de tolerancia para tener un buen diseño de la mezcla donde se disponen equipos de dosificación manual, semiautomática (Sanchez de Guzman 2001) .

2.2.1.3 Mezclado de concreto

El proceso de mezcla de concreto permite cubrir la superficie de todas las partículas del agregado con pasta de cemento, con el objetivo de obtener una masa uniforme. Esta operación inicia con la carga de cada uno de los materiales en la olla mezcladora, el orden sobre la alimentación de los ingredientes a la mezcladora, depende de las características de la mezcladora como también de la mezcla. Frecuentemente el orden de flujo de los materiales, el cemento debe ser introducido con el agregado, y no debe entrar en la mezcladora después de que alrededor del 10% del agregado haya entrado en la olla. El agua es el primer material que debe ser introdujo en la mezcladora, y en un proceso continuo los demás ingredientes se van añadiendo (Sanchez de Guzman 2001).

2.2.2 Transporte de concreto

El transporte de concreto depende de la capacidad, las condiciones de uso, la ubicación del sitio, la mezcla, el tiempo de entrega y otros factores que afectan el proceso. Se debe evitar la separación de la mezcla en el trascurso del viaje, con el objetivo de eliminar las pérdidas de agua por evaporación que pueden llevar a obtener juntas frías. El elemento de hidratación del cemento y su

temperatura son variables críticas en el transporte, según las normas técnicas, indica que el concreto debe tener un lapso de 90 minutos de entrega, esto después de que es introducido en la olla (Sanchez de Guzman 2001).

Diversos factores inciden en la entrega del concreto, pues se requiere que este producto esté disponible en el itinerario y de acuerdo a las requerimientos establecidos por el cliente, para Richmond (2011) se realiza la agrupación de zonas de despacho, con el objetivo de efectuar el cálculo de los acarreos, teniendo en cuenta que cada sub-obra no se aleja una de la otra; primero se determinan las distancias entre los sitios de despacho y el sitio de producción correspondiente, el tiempo de acarreo y retorno son calculados mediante la relación de las distancias y el valor de la velocidad para la auto mezcladora (15 km/h). Al repartir los volúmenes que proveerá cada planta se realiza un flujo de concreto para cada sitio de despacho, se describen los destinos, volumen (m^3), cantidad de ciclos y costo de acarreo.

Desde otro punto de vista, se considera fundamental la capacidad de entrega (Tommelein y Li 1999), pues está determinada por la cantidad de camiones y conductores que prestan el servicio a la planta. Por lo general, una planta de concreto puede tener 25 o 30 camiones y el operador de la planta tratará de mantenerlos ocupados en todo momento, generalmente la capacidad de procesamiento por lotes de una planta es mayor que su capacidad de entrega.

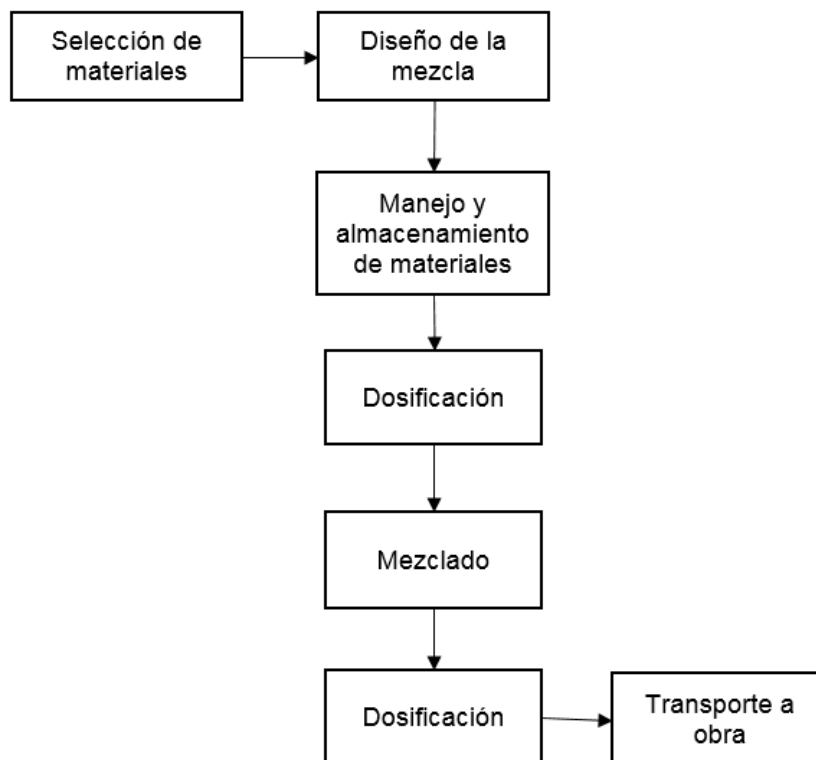
Los autores Afzal y Khan (2018) presentan la Tabla 1, donde hacen referencia a los factores y sub-factores que afectan los itinerarios de entrega del concreto premezclado (Ready-Mixed Concrete) , además agregan que para entregar la mezcla de concreto a tiempo se tiene que planificar la ruta y la programación de los camiones. Los retrasos y lances causados por las condiciones del tráfico, la larga distancia, la división del tiempo y otros factores provocan la pérdida de concreto.

Tabla 1. Factores y sub-factores que afectan el cronograma

Factores que afectan el despacho de RMC(Ready-Mixed Concrete)	Variables que influyen en cada factor
1. Duración del viaje	1. Distancia entre planta y sitio. 2. Velocidad y condición del tráfico.
2. Duración de la descarga	1. Tipo de operaciones de fundición. 2. Número de equipos de descarga y Número de tripulantes en el lugar de trabajo. 3. Velocidad de bombeo.
3. Número de camiones	1. Cantidad de RMC ordenada. 2. Capacidad del camión y rodamiento limitación.

Fuente: (Afzal and Khan 2018)

Figura 1. Producción y colocación del concreto



Fuente: Adaptado de (Sanchez de Guzman 2001)

2.3 Caracterización del proceso de programación de la producción y despacho caso de estudio.

Este trabajo se realiza con base en los procesos de programación de la producción y despacho, para ello se hace énfasis en cada una de las actividades que implica la fabricación del concreto premezclado.

La persona encargada de los procesos mencionados es el residente de planta, que también realiza las actividades del proceso de planeación puesto que inciden en la entrega del producto, los pedidos de concreto premezclado se hacen cada semana con el fin de realizar los requerimientos de material a los proveedores y de más actividades que permiten cumplir con lo solicitado.

En la Figura 2 se presenta un diagrama de flujo, donde se muestran todas las actividades requeridas para la elaboración del concreto, en seguida se realizará la descripción detallada para cada uno de los procesos:

2.3.1 Planeación

Adecuar el sitio de la obra de construcción: como punto de inicio se evalúa las condiciones del sitio, si este no se encuentra de manera adecuada para la entrega del concreto premezclado se exige al cliente las condiciones óptimas, por ejemplo, en circunstancias de descarga por gravedad (canaleta) a profundidad de 1 metro, el vehículo debe tener por lo menos 1 metro horizontal, por otro lado si hay vigas, deben estar a 4 metros de altura, la obra de construcción también debe tener un sitio donde se pueda lavar el vehículo después de terminar la descarga, estas son algunas condiciones que se evalúan.

Solicitud del pedido de concreto: el residente de planta recibe cada miércoles los pedidos por medio de correo electrónico, en el formato se establece los metros cúbicos que requiere el sitio de construcción, tipo de concreto, tipo de descarga, horario y día.

Requerimientos de materia prima: una vez se obtiene la demanda total de concreto por semana, procede a solicitar los materiales, para esto utiliza un formato que permite calcular el uso de cada material de acuerdo con el tipo de concreto.

Inspección de la planta: El operador y ayudante revisan todos los días el correcto funcionamiento de los equipos antes de fabricar el primer lote de concreto.

Calibración de los equipos: Esta actividad se realiza como respaldo para la inspección, ya que se calibran las tolvas de los agregados y la báscula del cemento, por último, se verifica el dosificador de agua y aditivos.

2.3.2 Programación de las operaciones

Programación de producción: Para el desarrollo de la programación diaria se tiene en cuenta las solicitudes de pedido puesto que especifican los días de entrega por parte del cliente, la programación está ligada al inventario que se

tenga de materia prima, es decir la disponibilidad, los materiales de mayor prioridad son el cemento, los agregados y aditivos.

Cálculo de ciclos y rutas: respecto a la demanda de cada cliente se calcula el número de despachos (ciclos) que se deben realizar para cumplir la totalidad del pedido.

Diseño de mezcla: los clientes establecen el tipo de concreto que requieren según el portafolio de la planta, si solicitan un producto diferente, se procede a identificar los materiales necesarios con su respectiva evaluación económica, posteriormente se desarrolla la mezcla en el laboratorio con las pruebas y análisis de resultados necesarios para garantizar la calidad del producto.

2.3.3 Producción del concreto

Ingreso y descarga de materiales: la planta recibe los camiones de grava, arena y cemento y se procede a descargarlos en el lugar de acopio, para el caso del cemento se cuentan con silos de 60 toneladas para su almacenamiento.

Carga a tolvas: este proceso se realiza de forma manual por parte del operador asignado, donde carga los materiales a un sistema de basculas.

Programación de la mezcla: el operario encargado realiza la selección de la fórmula correspondiente de la mezcla a producir en el software y confirma su realización para proceder al proceso de dosificación de materiales.

Dosificación: las basculas realizan un proceso automático de dosificación de los materiales de acuerdo con la formula del producto. Los materiales se transfieren por medio de una banda transportadora a la mezcladora.

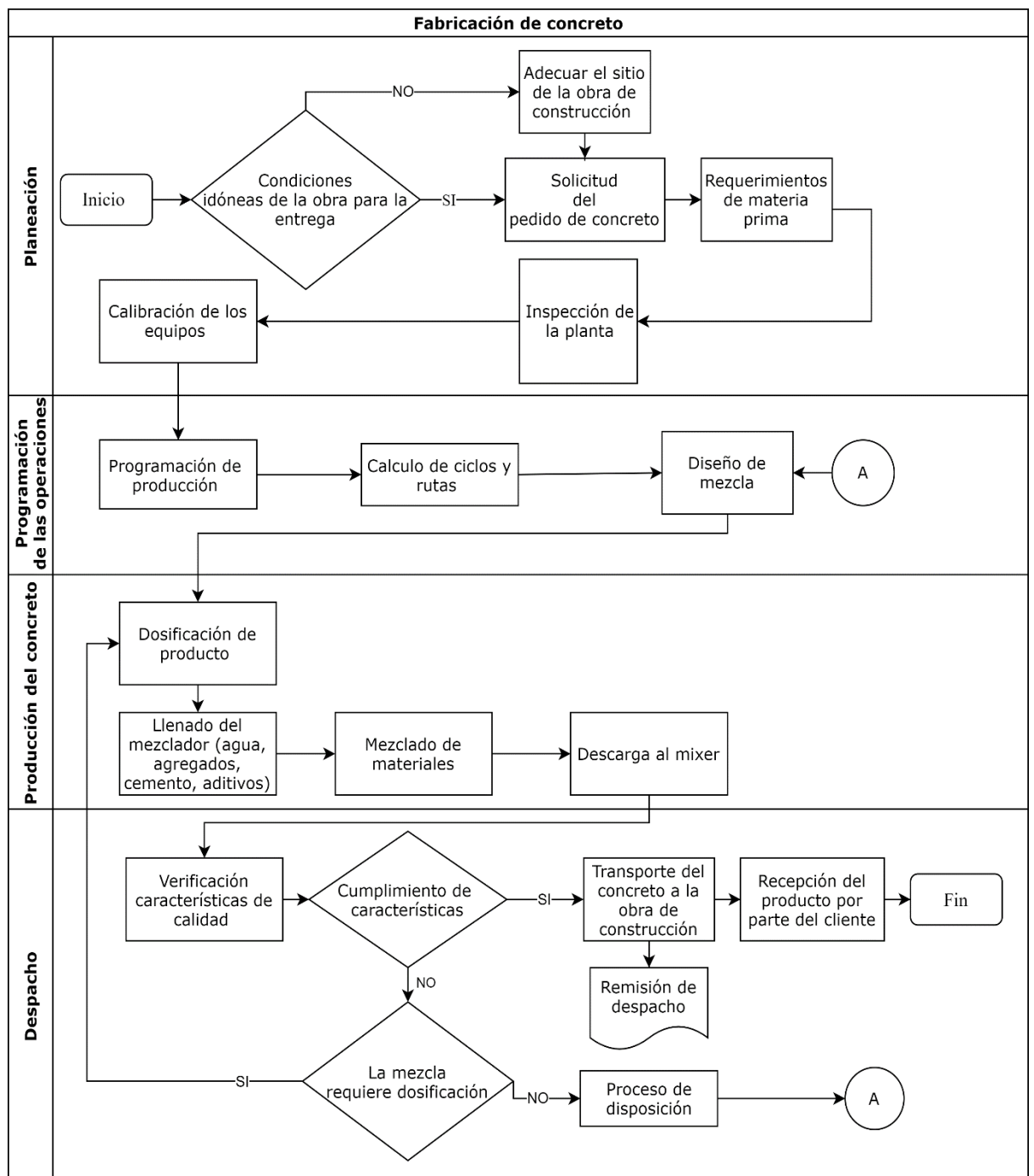
Mezclado y descarga en el camión: los materiales que son transferidos por medio de las bandas transportadoras deben cumplir con un orden para el mezclado. primero sube la grava, después la arena y el agua, cuando se tiene un porcentaje de arena y agua, se empieza a suministrar el cemento y los aditivos. Cuando los materiales toman consistencia en la mezcladora, el operario encargado empieza la descarga al camión.

2.3.4 Despachos

Despacho y calidad de la mezcla: cuando el vehículo está en proceso de descarga, se toma una muestra para analizar la composición, se realiza una prueba de asentamiento, temperatura, peso unitario y contenido de aire. Si la mezcla cumple con las características establecidas por la empresa, se realiza la respectiva orden de despacho a la obra.

No conformidad de la mezcla: cuando la mezcla no cumple con las características establecidas por el cliente se revisa si se requiere del proceso dosificación, con el objetivo de agregar materiales que faltaron en el proceso. Si la mezcla no cumple con las normas de calidad y no puede pasar otra vez por el proceso de dosificación, se realiza un proceso de disposición.

Figura 2. Procesos para la fabricación de concreto



Fuente: Elaboración propia

2.4. Indicadores de desempeño

2.4.1 Producción

El crecimiento de la construcción en el mundo y por ende el crecimiento de la producción de concreto premezclado, principalmente en mega proyectos como proyectos inmobiliarios, proyectos turísticos y proyectos de infraestructura, requieren concreto premezclado de alta calidad, el éxito de la gestión de construcción es completar cualquier proyecto dentro del presupuesto, al menor costo disponible, a tiempo y con alta calidad (Aziz 2018). Por lo tanto, es importante que las plantas de concreto estén relacionadas con estrategias que permitan medir su productividad, los autores presentan la siguiente medida de desempeño:

$$\text{Eficiencia del plan de mercado de la planta} = \frac{\sum \text{Cantidades reales por día}}{\text{Capacidad teórica por día}} \times 100$$

Por otra parte, Hernández y Valderrama (2015) muestran los siguientes indicadores de producción y operaciones en la industria del concreto premezclado.

Eficiencia: Optimizar y mejorar la utilización de las instalaciones, maquinaria y recursos cumpliendo con los objetivos pactados.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Producción (hora)}}{\text{Capacidad Instalada (hora)}}$$

Innovación: El número de pedidos de concretos especiales con requerimientos del cliente que no están dentro del portafolio.

$$\text{Innovación} = \frac{\text{Producción de concretos especiales}}{\text{Producción total de concretos}}$$

Ajuste a la programación (BTS): Para verificar que los volúmenes de metros cúbicos de concreto que se hayan fabricado coincidan con los planes de producción diarios.

$$\text{BTS} = \frac{\text{Producción Real}}{\text{Producción Programada}}$$

2.4.2 Despachos

Mora García (2008) presentan una serie de indicadores para la gestión logística que sirven como objeto de evaluación del desempeño de los procesos. Se presentan a continuación los relevantes en el proceso de estudio.

El indicador tiene como objeto conocer el nivel de efectividad de los despachos en cuanto a los pedidos enviados en un lapso.

$$\text{Nivel de cumplimiento despachos} = \frac{\text{Número de despachos cumplidos a tiempo}}{\text{Número total despachos requeridos}}$$

El siguiente indicador tiene como plan medir la cantidad de pedidos que son entregados completos a los clientes

$$\text{Pedidos completos} = \frac{\text{Número de pedidos entregados completos}}{\text{Total de pedidos}}$$

$$\text{Retrasos en la entrega} = \frac{\text{Tiempo estimado de entrega}}{\text{Tiempo real de entrega}}$$

El desarrollo de este capítulo permite alcanzar diversas perspectivas, por un lado, la industrial convencional lleva a cabo la programación y planeación en horizontes de medio y largo plazo, mientras que la industrial del concreto comprende procesos a corto plazo. Este material puede variar de acuerdo con los requerimientos del cliente, lo cual implica elaborarlo por medio de un pedido.

En el sector industrial el proceso de despacho se realiza al tener en cuenta restricciones como la capacidad del vehículo o medio de transporte, del mismo modo ventanas de tiempo asociadas a cada cliente, a parte de los elementos mencionados, la industria del concreto considera el tiempo de endurecimiento pues se puede definir como un producto perecedero, lo que implica mayor dificultad en la coordinación de los despachos, después de caracterizar los procesos de programación de producción y despacho del concreto, por consiguiente se realizara la revisión de la literatura correspondiente a lo indicado.

CAPÍTULO 3: MODELO MATEMÁTICO DE INTEGRACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN Y DESPACHO DE LA PRODUCCIÓN DEL CONCRETO

Siguiendo el orden y dando cumplimiento a los objetivos propuestos en el trabajo, se aborda el objetivo específico número dos, mediante el estudio bibliográfico de los diferentes autores que realizaron el análisis de integración de la programación y despachos en el ámbito de producción de concreto. Estos estudios y publicaciones se toman como base para encontrar aspectos particulares y de interés que permitan un acercamiento a la problemática planteada y lograr un modelo matemático formal.

3.1 Integración de la producción y despachos

Asbach, Dorndorf, y Pesch (2009) presentan un modelo de programación lineal entera mixta, donde tienen un conjunto de clientes y varios depósitos para la producción de concreto, algunos depósitos pueden suministrar un tipo de concreto en específico. Este modelo implica una cantidad considerable de variables de decisión, por lo que al modelo se le dificulta resolver grandes instancias. Para solventar este problema los autores plantean una combinación de algoritmos de búsqueda local con programación lineal. La idea de esto es comenzar con una solución inicial y en el transcurso mejorar la solución actual mediante una serie de iteraciones, aplicando reglas de vecindario, hasta que cumpla con el criterio de parada.

Kinable, Wauters, y Vanden Berghe (2014) indagan los diferentes métodos y enfoques para la programación y despachos del concreto, realizan comparaciones de los diferentes modelos y estudian heurísticas para mejorar la eficiencia en el cronograma de despacho, también exponen de manera pública un conjunto de datos que permiten identificar la información de referencia y una mejor comparación de todos los enfoques de investigación científica.

Rey, Maghrebi, y Waller (2014) presentan una formulación para atender a un número máximo de clientes, respetando las restricciones inducidas por el enrutamiento y las ventanas de tiempo. La propuesta suaviza las restricciones de programación y proporciona la asignación óptima de los vehículos al cliente para cumplir con los plazos disponibles en cada uno de ellos. El modelo se implementó en instancias realistas que representan un problema de despacho de concreto premezclado en la región de Adelaida, Australia. Los resultados muestran que el modelo puede implementarse en instancias relativamente grandes como pequeñas.

Los resultados muestran que el modelo de programación lineal entera mixta puede resolver de manera eficiente, ya que cada instancia se resuelve en menos de 5 segundos. La instancia analizada por Rey, Maghrebi, y Waller, (2014) es de 8 clientes y 52 entregas.

A continuación, se presenta brevemente algunos datos Anexo 2. Enfoques de investigación para el problema de entrega de concreto en donde los autores presentan diferentes puntos de vista en las investigaciones que se han realizado del problema de entrega de concreto, la tabla muestra los métodos de solución, como las diferentes variables que se tiene en cuenta; se puede encontrar en (Kinable, Wauters, y Vanden Berghe 2014).

3.2 Formulación matemática

3.2.1 Formulación verbal

Función objetivo: Minimizar la utilización de los vehículos.

Restricciones:

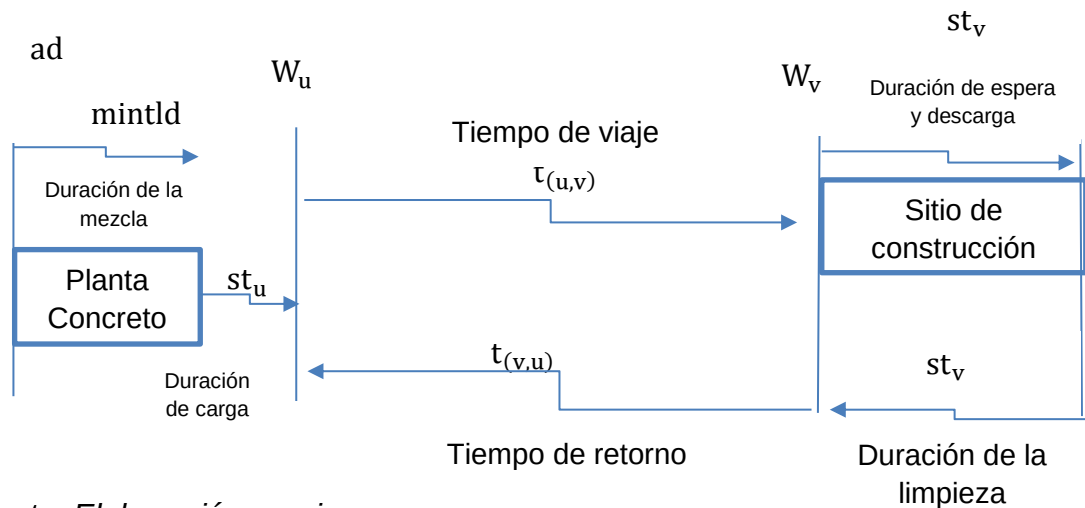
1. Precedencia
Permite que cada nodo entrega, los arcos (u, v) que formen tengan un orden parcial, por lo que obliga a que algunas entregas se realicen antes que otras.
2. Tiempo
Define el momento en que los vehículos realizan el abastecimiento al sitio de construcción, recargan o inician su ruta desde la planta. Las restricciones de tiempo garantizan que todas las entregas se completen antes del tiempo de endurecimiento del concreto.
3. Ventana de entrega
Determina que las entregas se cumplan dentro de la ventana del sitio de construcción, cada entrega debe cumplir esta restricción, si la entrega llega antes del inicio de la ventana de tiempo del sitio, el vehículo debe esperar hasta que el sitio inicie sus labores. Por otra parte, si la entrega se realiza después de la hora finalización del sitio de construcción, se genera una pérdida para el cliente.
4. Trabajo de los vehículos
Cada vehículo solo puede cargar un tipo de concreto, y realizar solo una entrega a la vez. Después de cada descarga el vehículo debe regresar a la planta, para la asignación de la próxima entrega.

El trabajo de los vehículos inicia al momento de la apertura de la planta ad , el vehículo espera para la descarga del concreto st_u , y la variable W_u

indica el tiempo de recarga o el inicio de esta operación descrita. Cuando se cumple el tiempo de servicio st_u el vehículo viaja al sitio de construcción en un tiempo de viaje $t(u, v)$, llega a la obra en un tiempo W_v e inicia su proceso de descarga y limpieza st_v , para después regresar en un tiempo de recorrido $t(v, u)$ para recargar o terminar su trayecto.

Por ende, se tratan restricciones de entrada a los sitios de construcción como también a la planta, en la siguiente figura se presenta el flujo de un vehículo de transporte de concreto:

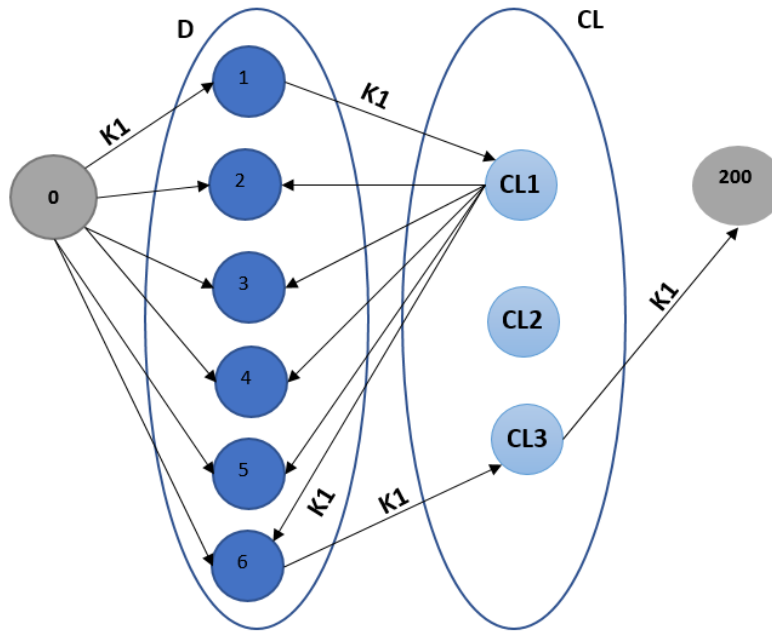
Figura 3. Esquema de recorrido de un vehículo



Fuente: Elaboración propia

La Figura 4 representa un esquema del modelo matemático, se describe un nodo inicial denominado 0 donde los vehículos que son utilizados para la operación comienzan, en este caso un vehículo denominado $K1$, se asigna a un nodo entrega, el cual pertenece al conjunto D que contiene todas las entregas programadas por la planta. El vehículo $K1$ espera el tiempo de servicio estipulado st_u y es asignado al cliente $CL1$, donde tiene un conjunto de entregas llamado CD_{CL} , estas son determinadas de acuerdo con la demanda del cliente, después de llegar al cliente $CL1$ inicia su proceso de descarga, al finalizar regresa nuevamente a la planta. A través del modelo se asigna la siguiente entrega para su respectivo proceso, en este ejemplo es la entrega 6, la cual corresponde al cliente $CL3$, el vehículo $K1$ lleva a cabo la operación antes mencionada, por último, al completar su labor sale del sistema al nodo 200.

Figura 4. Esquema del modelo matemático



Fuente: Elaboración propia

Liu, Zhang, y Li (2014) describe un modelo de programación lineal para las operaciones de producción y entrega de concreto, donde se maneja como objetivo principal la minimización de los costos operacionales de la planta, como el del cliente. Se penaliza los sitios de construcción que tienen que esperar por la primera entrega y se asumen tasas de viaje por vehículo. Para resolver la formulación del problema desarrollan un algoritmo genético, que tiene como objetivo encontrar la secuencia óptima para cada una de las entregas de concreto a los diferentes sitios de construcción; para este caso la flota es heterogénea además se cuenta con una planta de producción y una mezcladora.

Asbach, Dorndorf, y Pesch (2009), propone minimizar simultáneamente los costos que se asumen por los arcos, y una penalización por los clientes que no se atienden. Utilizan una flota heterogénea y múltiples depósitos para la fabricación de concreto. Algunos clientes pueden requerir el suministro de concreto de ciertos depósitos, esto de acuerdo con el tipo de concreto que se fabrique en el depósito, por lo cual se requiere restricciones que permitan el uso de una sola fuente.

Este trabajo tiene como base estos artículos(Liu, Zhang, y Li 2014), (Asbach, Dorndorf, y Pesch 2009) donde se toman aspectos particulares para la aplicación en el caso de estudio, estos autores y Rey, Maghrebi, y Waller, (2014) ponen en evidencia que para pequeñas instancias se puede abordar el problema mediante programación lineal entera mixta de manera eficiente. Los dos artículos, manejan

la misma notación, solo que como se explicó anteriormente, difiere del número de depósitos.

El principal objetivo de estos autores es minimizar el costo asociado al transporte. Por lo que difiere del caso de estudio, donde el objetivo es minimizar la flota de vehículos con capacidad homogénea, cabe resaltar que se utiliza el enfoque de una sola planta donde se elabora el concreto premezclado, además se cuenta con un número limitado de clientes según el historial de la empresa, esto debido a las limitaciones en cuanto a la integración de la producción y despachos, ya que no permite atender un mayor número de clientes con el total de vehículos disponibles, mediante la minimización de la flota se pretende lograr la atención a más clientes con el mismo número de vehículos.

La minimización de los costos de transporte en el caso de estudio no es significativa, por una parte, la flota de vehículos tiene igual capacidad, además las mismas características, lo que implica un costo relativamente equivalente en cuanto al consumo de combustible, por otro lado, el recorrido hacia los clientes es el mismo, por lo que no se trata de un problema de ruteo donde se selecciona la ruta óptima. Lo ideal es encontrar la programación adecuada que permita utilizar de manera óptima la flota de vehículos, cumpliendo con las ventanas de tiempo establecidas.

La notación y formulación se detalla a continuación:

3.2.2 Descripción del modelo matemático

Conjuntos

CL	Conjunto de sitios de construcción
C	Conjunto de entregas a los sitios de construcción
$K: \{k_1, k_2, \dots, k_p\}$	Conjunto de vehículos
$D: \{\bar{d}_1, \dots, \bar{d}_{n(d)}\}$	Conjunto de entregas desde la planta
$n(d): \frac{bd - ad}{mintld}$	Número máximo de recargas posibles de vehículos en el depósito
$V: D \cup C \cup 0 \cup 200$	Conjunto de todos los nodos
$E \subseteq (u, v): u, v \in V$	Conjunto de arcos
$SUCCV_V \subseteq V$	Conjunto de sucesores de los nodos
$PREDV_V \subseteq V$	Conjunto de predecesores de los nodos
$CD_{CL} \subseteq C$	Conjunto de entregas asignadas a cada cliente

Parámetros

$st_u \in V$	Tiempo de servicio para la planta y cada sitio de construcción
$t_{(u,v) \in E}$	Tiempo de viaje de los arcos
q_k	Capacidad del vehículo
γ	Tiempo máximo de endurecimiento del concreto
M	Constante Grande
λ_i	Demanda de cada sitio de construcción
a_i	Ventana de tiempo inicial para cada sitio de construcción
b_i	Ventana de tiempo final para cada sitio de construcción
ad	Ventana de tiempo inicial de la planta
bd	Ventana de tiempo final de la planta
$mintld$	Tiempo mínimo entre dos entregas consecutivas de la planta
$mintlc_{CL}$	Tiempo mínimo de retraso para cada sitio de construcción
$maxtlc_{CL}$	Tiempo máximo de retraso para cada sitio de construcción
$ncc_i \in CL$	Ultimo elemento del conjunto entregas a cada sitio de construcción
0	Nodo inicial
200	Nodo final

Variables

$X_{(u,v) \in E, k \in K}$	Si el vehículo k inicia una entrega u y se mueve a v , recarga en u , o suministra u
$W_{u \in V}$	Tiempo en el cual el vehículo suministra a los clientes, recargan en la planta o finaliza su ruta

Función Objetivo

El objetivo es minimizar el uso de la flota.

Minimizar el número de vehículos

$$3.1 \quad \min VehiculosUtilizados: \sum_{k \in K} \sum_{v \in SUCCV(0)} x_{0vk}$$

Restricciones

Cada vehículo utilizado en los despachos abandona su ubicación de inicio exactamente una vez

$$3.2 \quad \sum_{v \in SUCCV(0)} x_{0vk} \leq 1 \quad \forall k \in K$$

Cada vehículo utilizado en los despachos ingresa a su ubicación final exactamente una vez

$$3.3 \quad \sum_{u \in \text{PREDV}(200)} x_{u200k} \leq 1 \quad \forall k \in K$$

Conservación de flujo para todos los nodos

$$3.4 \quad \sum_{u \in \text{PREDV}(v)} x_{uvk} - \sum_{u \in \text{SUCCV}(v)} x_{vuk} = 0 \quad \forall k \in K, \forall v \in C \cup D$$

La planta puede cargar como máximo un camión cada vez

$$3.5 \quad \sum_{k \in K} \sum_{v \in \text{SUCCV}(u)} x_{uvk} \leq 1 \quad \forall u \in C$$

Si la primera entrega $j + 1$ alcanza el sitio de construcción c_i donde i es cada sitio de construcción, también debe haber una j ésima entrega al mismo sitio

$$3.6 \quad \sum_{k \in K} \sum_{v \in \text{SUCCV}(j+1)} x_{j+1vk} - \sum_{k \in K} \sum_{v \in \text{SUCCV}(j)} x_{jvk} \leq 0 \quad \forall j \in \{1, \dots, \text{ncc}_{(i)} - 1\} \in CL$$

La demanda requerida de todos los sitios debe ser satisfecha cada vez; por lo tanto, las cantidades acumuladas de concreto premezclado que todos los camiones llevan a un sitio deben ser mayores o iguales a su demanda

$$3.7 \quad \sum_{k \in K} \sum_{v \in \text{SUCCV}(u)} \sum_{u \in CD} x_{uvk} q(k) \geq \lambda_i \quad \forall i \in CL$$

Ningún nodo de entregas desde la planta se usa más de una vez

$$3.8 \quad \sum_{k \in K} \sum_{v \in \text{SUCCV}(u)} x_{uvk} \leq 1 \quad \forall u \in D$$

Una entrega al sitio de construcción v debe satisfacer la siguiente restricción de tiempo

$$3.9 \quad -M(1 - x_{uvk}) + st(u) + t(u, v) \leq w_v - w_u \quad \forall (u, v) \in E$$

El concreto premezclado podría endurecerse después de un cierto período. Para garantizar que todas las entregas y tareas de fundición se completen antes del tiempo de endurecimiento, cada entrega debe satisfacer:

$$3.10 \quad M(1 - x_{uvk}) + \gamma + st(u) \geq w_v - w_u \quad \forall (u, v) \in E, \forall k \in K \text{ con } \forall u \in D, \forall u \in C$$

Tanto la planta como los sitios de construcción deben comenzar a funcionar después de la primera ventana de tiempo y terminar de trabajar antes del final de la ventana de tiempo correspondiente

$$3.11 \quad w_j \geq a_i \quad \forall j \in CD, i \in CL$$

$$3.12 \quad w_j \leq b_i \quad \forall j \in CD, i \in CL$$

$$3.13 \quad w_u \geq ad \quad \forall u \in D$$

$$3.14 \quad w_u \leq bd \quad \forall u \in D$$

Por lo general, los camiones realizan más de una entrega por día. El intervalo de tiempo entre dos operaciones de descarga consecutivas en el mismo sitio de construcción i , debe ser mayor que $\text{mintlc}(CL_i)$, para permitir que el sitio se prepare para la próxima tarea de conversión, y menor que $\text{maxtlc}(CL_i)$, para evitar los sitios de espera innecesaria.

$$3.15 \quad w_{j+1} - w_j \geq \text{mintlc}(CL_i) \quad \forall j \in \{1, \dots, \text{ncc}_{(i)} - 1\}, i \in CL$$

$$3.16 \quad w_{j+1} - w_j \leq \text{maxtlc}(CL_i) \quad \forall j \in \{1, \dots, \text{ncc}_{(i)} - 1\}, i \in CL$$

El tiempo entre dos entregas consecutivas en la planta debe ser suficiente para la producción de concreto

$$3.17 \quad w_{j+1} - w_j \geq \text{mintld} \quad \forall j \in \{1, \dots, n(d) - 1\}$$

Realizado el análisis investigativo y al encontrar particularidades en los modelos expuestos anteriormente, se procede a realizar el modelo planteado e identificar las variables, parámetros, restricciones y la función a optimizar. De tal forma que se requiere validar el modelo en el caso de estudio y realizar las respectivas variaciones, para observar el comportamiento del modelo matemático expuesto. Por lo que es necesario el uso de un lenguaje de programación matemática llamado AMPL, permitiendo trasladar de manera cómoda el modelo.

CAPÍTULO 4: CASO DE ESTUDIO, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RESULTADOS.

4.1 Caso de estudio

La empresa ubicada en el sector de yumbo, en el complejo industrial CIC 1, un sitio idóneo por la cercanía a sus clientes, como también a los proveedores. La empresa cuenta con una flota homogénea con capacidad de $9 m^3$, silos de almacenamiento de cemento con una capacidad de 65-70 toneladas y una mezcladora.

Para el caso de análisis se toma la programación de un día laboral, además de otros clientes que se añaden para un posterior análisis, como se puede observar en la Tabla 2 donde los clientes especifican los plazos disponibles, la demanda, como el intervalo entre entregas. El modelo no considera las condiciones de tráfico o el daño de los vehículos en el camino. También se considera que el tiempo de desplazamiento y la velocidad de los vehículos es constante.

Tabla 2. Solicitud de programación de pedido

SOLICITUD DE PROGRAMACIÓN DE PEDIDO								
FECHA PROGRAMADA			CLIENTE	VOLUMEN SOLICITADO (m3)	INTERVALO DE HORA SOLICITADA		INTERVALO DE VEHÍCULOS SOLICITADOS (minutos)	
D	M	A			AM	PM		
22	2	2020	CIAT	33	08:00	01:00	30	
22	2	2020	BODEGA AGROINDUSTRIAL	32	08:00	02:00	35	
22	2	2020	PLAZA DE TOROS	35	13:00	16:00	25	
22	2	2020	CC4	18	08:00	11:30	10	
22	2	2020	CC5	30	08:00	11:20	10	
22	2	2020	CC6	30	08:00	11:35	10	
22	2	2020	CC7	18	12:00	15:40	10	

Fuente: Elaboración propia

La programación en el día laboral que llevo a cabo la empresa fue la siguiente:

Tabla 3. Programación día laboral

VEHÍCULO	OBRA	M3 PRODUCIDOS	HORA CARGUE	SALIDA PLANTA	LLEGADA A OBRA	INICIO DESCARGUE	SALIDA OBRA	LLEGADA PLANTA
216	CIAT	9	08:12	08:31	09:04	09:30	10:30	11:31
213	BODEGA AGROINDUSTRIAL	9	08:35	09:07	09:10	09:15	11:00	11:02
214	CIAT	9	09:12	09:30	09:58	10:40	11:54	12:35
215	CIAT	9	10:15	10:35	11:05	11:30	12:25	01:06
212	PLAZA DE TOROS	9	11:00	11:15	11:46	12:06	12:20	12:45
213	BODEGA AGROINDUSTRIAL	7	11:20	11:30	11:32	11:40	12:50	12:53
216	CIAT	5	11:41	11:56	12:32	12:44	13:30	02:20
212	PLAZA DE TOROS	9	12:50	01:05	01:30	01:36	01:50	02:10
214	BODEGA AGROINDUSTRIAL	8	01:00	01:05	01:07	01:09	01:44	01:50
215	PLAZA DE TOROS	9	01:20	01:36	02:10	02:15	02:32	03:00
213	BODEGA AGROINDUSTRIAL	7	02:15	02:22	02:24	02:27	02:35	03:15
212	PLAZA DE TOROS	8	02:35	03:02	03:36	03:40	04:00	04:36

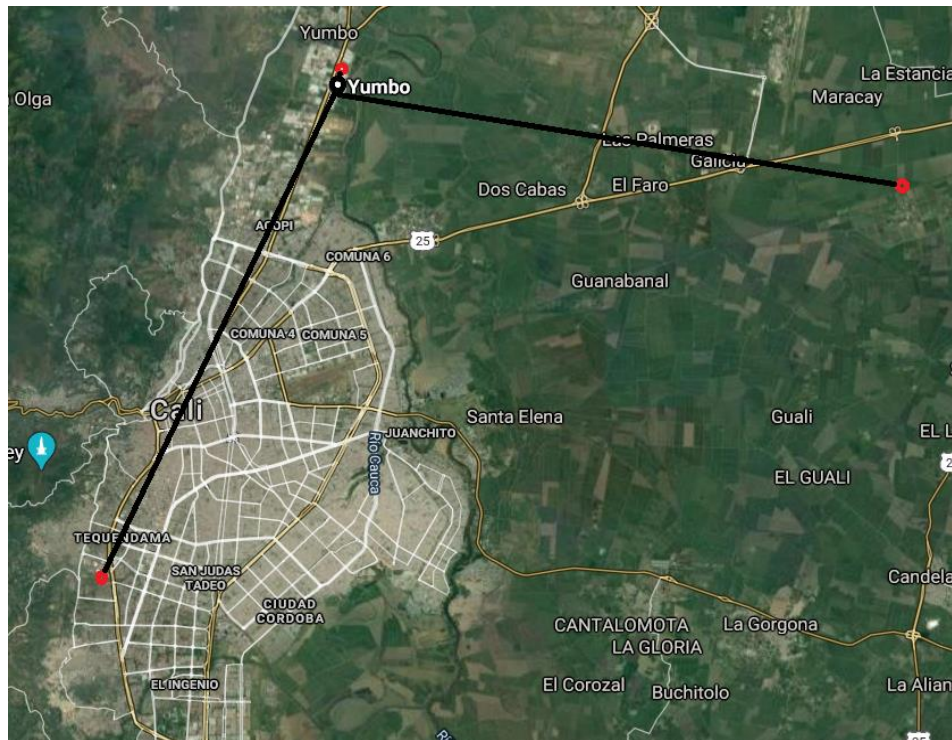
Fuente: Elaboración propia

El modelo matemático planteado en el capítulo anterior se plasma en el lenguaje de AMPL Anexo 1. Código en AMPL – Caso de estudio para realizar la respectiva comparación con los datos obtenidos por la empresa y los resultados que se obtiene a partir del modelo, en cuestión al uso de la flota disponible. el modelo se corre en un ordenador con procesador Intel Core 5 y memoria RAM 6 GB. Los datos son tomados de la programación real de la planta, donde se realiza la entrega de concreto a 3 clientes, la Figura 5 muestra el mapa donde se ubican los diferentes compradores de concreto.

El máximo tiempo entre entregas con el objeto de dar cumplimiento a dos entregas consecutivas que no estén muy lejos, es de $\max t_{c_{CL}} = 60$ minutos y el tiempo de apertura de la planta es a las 7:00 *a.m.*, el tiempo de cierre es a las 4:00 *p.m.* por otra parte, el tiempo mínimo entre entregas producidas en la planta es de $\min t_{ld} = 20$ minutos, en el modelo refleja la capacidad de la planta.

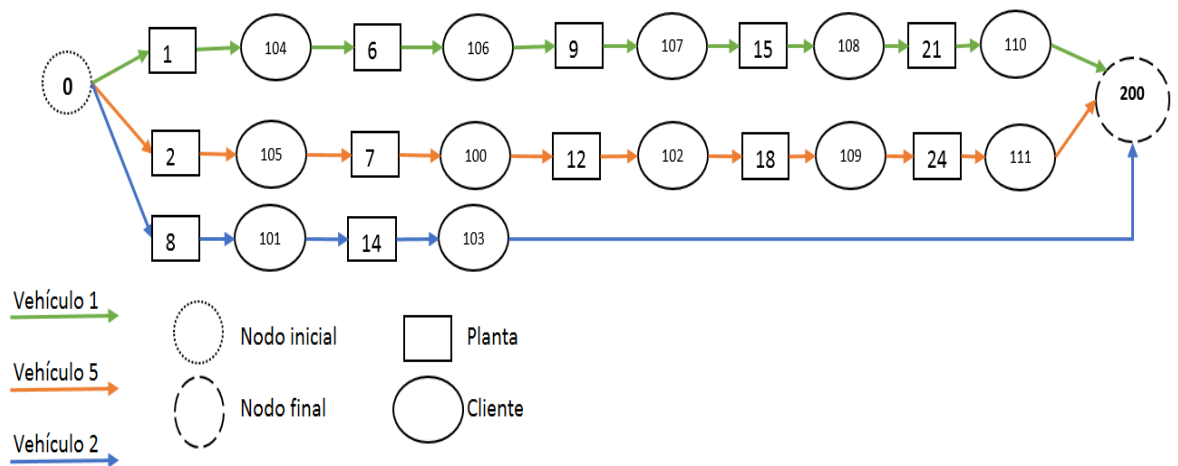
La solución que aporta AMPL, mediante el Solver Gurobi, fue la utilización de 3 vehículos, la Figura 6 representa la solución dada por el modelo con 12 nodos planta y 12 nodos entregas. El modelo tiene 2445 variables: 2405 variables binarias, 40 variables lineales. 3468 restricciones, 190 restricciones de igualdad, 3278 restricciones de desigualdad. Resuelto en 21.08. segundos. La Función objetivo es de 3 vehículos, 511822 simplex iteraciones y 2420 branch-and-cut nodos.

Figura 5. Ubicación sitios de construcción



Fuente: Google maps

Figura 6. Solución AMPL



Fuente: Elaboración propia

La programación detallada por el modelo se puede visualizar en la siguiente tabla:

Tabla 4 Programación AMPL

PROGRAMACIÓN				
VEHÍCULO	OBRA	HORA CARGUE	LLEGADA A OBRA	LLEGADA PLANTA
1	BODEGA	07:30:00 a. m.	08:00:00 a. m.	09:10:00 a. m.
5	BODEGA	07:50:00 a. m.	08:35:00 a. m.	09:30:00 a. m.
1	BODEGA	09:10:00 a. m.	09:32:00 a. m.	10:10:00 a. m.
5	CIAT	09:30:00 a. m.	10:11:00 a. m.	11:11:00 a. m.
2	CIAT	09:50:00 a. m.	10:52:00 a. m.	11:52:00 a. m.
1	BODEGA	10:10:00 a. m.	10:32:00 a. m.	12:12:00 p. m.
5	CIAT	11:11:00 a. m.	11:52:00 a. m.	01:12:00 p. m.
2	CIAT	11:52:00 a. m.	12:33:00 p. m.	05:03:00 p. m.
1	PLAZA DE TOROS	12:12:00 p. m.	01:07:00 p. m.	02:12:00 p. m.
5	PLAZA DE TOROS	01:12:00 p. m.	01:58:00 p. m.	03:12:00 p. m.
1	PLAZA DE TOROS	02:12:00 p. m.	02:58:00 p. m.	05:03:00 p. m.
5	PLAZA DE TOROS	03:12:00 p. m.	03:58:00 p. m.	05:03:00 p. m.

Fuente: Elaboración propia

La programación dada por el modelo refleja que primero se produce el concreto para la bodega industrial, siendo este el cliente más cercano. Donde se utilizan 2 vehículos para entregar de forma consecutiva, e intercalar estos vehículos para suplir al cliente 2. Esto comparado con el escenario real, indica una reducción de 3 vehículos para suplir a estos tres clientes. El tercer cliente (Plaza de toros) se programa en la hora de la tarde de acuerdo con su ventana de tiempo. en la programación real el cliente se programa en el horario de la mañana y tarde, con el objeto de cumplir con la demanda y la ventana de tiempo establecida comercialmente.

Los cambios en la programación de la empresa son un aspecto operacional muy variante, en el día laboral analizado, la programación del tercer cliente estaba dada para la 1:00 p.m y su cierre a las 4:00 p.m. la persona encargada de la programación trasmite al área comercial que esta ventana de tiempo es muy corta, por esta razón es mejor reprogramar la ventana inicial, para cumplir con los requerimientos.

En el modelo matemático, basado en la programación inicial tiene como resultado que el tercer cliente se puede atender en la ventana de tiempo estipulada, llegando a cumplir sus entregas y con el mínimo de vehículos.

Tabla 5. Utilización vehículos – AMPL

Utilización AMPL		
Vehículo	Nº minutos utilizados	% Horas utilizadas
1	448	88%
2	163	32%
5	488	96%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Utilización vehículos Caso de estudio

Utilización real		
Vehículo	Nº minutos utilizados	% Horas utilizadas
212	192	38%
213	61	12%
214	94	18%
215	141	28%
216	164	32%

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5 y Tabla 6 se puede apreciar la utilización de los vehículos tanto el modelo matemático como en el caso de estudio. en la empresa como se mencionó anteriormente se emplean 5 vehículos, cómo se observa en la Tabla 6 la tasa de utilización por vehículo es mínima, lo cual implica la falta de integración entre la producción y los despachos, que conllevan a una programación inadecuada.

Mientras que el modelo matemático permite encontrar una solución óptima con respecto a una integración de los procesos de producción y despachos. cómo se puede observar en la Tabla 5 el modelo optimiza el uso de los vehículos e incrementa la eficiencia de estos. lo cual evidencia que al utilizar el modelo como apoyo de planificación y programación de las operaciones se logran mejores resultados.

4.2 Análisis sensibilidad y resultados

Para analizar el impacto que tiene el modelo en diferentes escenarios del caso de estudio, se realizan modificaciones al número de clientes, añadiendo más clientes con una mayor demanda y variando sus ventanas de tiempo. Estos clientes adicionales se añaden con el objetivo de evaluar que la planta puede ajustar su programación para optimizar el uso de sus vehículos. Para cada caso planteado, se mantiene los mismos parámetros reales de la planta, el aumento de los clientes se realiza progresivamente hasta llegar a los 7 clientes, con el propósito de evaluar el uso de los vehículos y el tiempo de solución.

4.2.1 Caso 1: 3 clientes, ventana de tiempo reducida y aumento de demanda

A lo largo de la programación en escenarios reales, las restricciones de las ventanas de tiempo no son fijas, por lo que se llevan a pactar ventanas de tiempo

ajustadas. Para este caso los clientes tienen un ajuste en las ventanas de tiempo finales en 80 minutos, como también el tercer cliente (Plaza de toros) duplica su demanda y además solicita que el tiempo entre entregas sea de 10 minutos.

Manteniendo los demás parámetros estables los resultados se encuentran en la Tabla 7, el problema es infactible, por lo que se aumenta el número de vehículos a 8 con la misma capacidad, con la meta de cumplir la demanda que requerida.

Tabla 7. Programación 3 clientes – Caso 1

PROGRAMACIÓN				
VEHÍCULO	OBRA	HORA CARGUE	LLEGADA A OBRA	LLEGADA PLANTA
1	CIAT	07:30:00 a. m.	08:20:00 a. m.	09:20:00 a. m.
2	CIAT	07:50:00 a. m.	09:56:00 a. m.	12:00:00 p. m.
3	CIAT	08:10:00 a. m.	09:03:00 a. m.	11:40:00 a. m.
7	CIAT	08:40:00 a. m.	10:56:00 a. m.	01:00:00 p. m.
8	BODEGA	09:00:00 a. m.	09:22:00 a. m.	10:00:00 a. m.
1	BODEGA	09:20:00 a. m.	10:22:00 a. m.	01:40:00 p. m.
8	BODEGA	10:00:00 a. m.	11:57:00 a. m.	01:20:00 p. m.
5	BODEGA	10:20:00 a. m.	11:22:00 a. m.	12:40:00 p. m.
6	PLAZA DE TOROS	11:20:00 a. m.	01:10:00 p. m.	03:45:00 p. m.
3	PLAZA DE TOROS	11:40:00 a. m.	01:56:00 p. m.	03:45:00 p. m.
2	PLAZA DE TOROS	12:00:00 p. m.	01:00:00 p. m.	03:45:00 p. m.
4	PLAZA DE TOROS	12:20:00 p. m.	01:20:00 p. m.	03:45:00 p. m.
5	PLAZA DE TOROS	12:40:00 p. m.	01:30:00 p. m.	03:45:00 p. m.
7	PLAZA DE TOROS	01:00:00 p. m.	02:16:00 p. m.	03:45:00 p. m.
8	PLAZA DE TOROS	01:20:00 p. m.	02:06:00 p. m.	03:45:00 p. m.
1	PLAZA DE TOROS	01:40:00 p. m.	02:40:00 p. m.	03:45:00 p. m.

Fuente: Elaboración propia

Lo que se puede encontrar en este caso es la importancia del parámetro de las ventanas de tiempo, un ajuste al mínimo puede dirigir a un problema de infactibilidad, por el hecho de no contar con la capacidad de entrega suficiente, o una flota más grande. Los resultados dados por AMPL, son 4184 variables binarias. 44 variables lineales, 5454 restricciones. Fue resuelto 0.01 segundos, con 2460 simplex iteraciones, con una función objetivo de 8.

4.2.2 Caso 2: 4 clientes

Un nuevo cliente requiere una demanda de $18 m^3$, en una ventana de tiempo de 8:00 a.m – 11:30 a.m , con un tiempo de servicio para descarga de 10 minutos. Los resultados que se obtienen por el modelo son los siguientes:
2912 variables: 2870 variables binarias ,42 variables lineales. 4119 restricciones, 200 restricciones de igualdad ,3919 restricciones de desigualdad. Resuelto en

4.30 segundos. La función objetivo es de 3, 36012 simplex iteraciones 132 nodos de ramificación y corte.

Tabla 8. Programación 4 clientes – Caso 2

PROGRAMACIÓN				
VEHÍCULO	OBRA	HORA CARGUE	LLEGADA A OBRA	LLEGADA PLANTA
5	CIAT	07:30:00 a. m.	08:11:00 a. m.	09:11:00 a. m.
4	CIAT	07:50:00 a. m.	08:41:00 a. m.	10:32:00 a. m.
3	CIAT	08:30:00 a. m.	09:12:00 a. m.	10:12:00 a. m.
5	CIAT	09:11:00 a. m.	09:52:00 a. m.	11:58:00 a. m.
3	CC4	10:12:00 a. m.	10:38:00 a. m.	10:58:00 a. m.
4	CC4	10:32:00 a. m.	10:58:00 a. m.	11:18:00 a. m.
3	BODEGA	10:58:00 a. m.	12:12:00 p. m.	01:00:00 p. m.
4	BODEGA	11:18:00 a. m.	11:37:00 a. m.	12:20:00 p. m.
5	PLAZA DE TOROS	11:58:00 a. m.	01:35:00 p. m.	02:40:00 p. m.
4	BODEGA	12:20:00 p. m.	12:47:00 p. m.	01:40:00 p. m.
3	BODEGA	01:00:00 p. m.	01:22:00 p. m.	02:00:00 p. m.
4	PLAZA DE TOROS	01:40:00 p. m.	02:35:00 p. m.	04:35:00 p. m.
3	PLAZA DE TOROS	02:00:00 p. m.	03:05:00 p. m.	04:35:00 p. m.
5	PLAZA DE TOROS	02:40:00 p. m.	03:30:00 p. m.	04:35:00 p. m.

Fuente: Elaboración propia

Respecto al modelo de caso de estudio, ingresando un nuevo cliente, se siguen utilizando los mismos 3 vehículos, pero esta vez las entregas al CIAT se realizan de forma consecutiva para aprovechar el uso de los camiones Tabla 8 y suplir el nuevo cliente que ingreso, que tiene una ventana de tiempo más ajustada.

4.2.3 Caso 3: 5 clientes

Para un análisis proporcional se añade un cliente en cada caso, el siguiente tiene como ventana de tiempo 8:00 a. m. – 11:20 a. m., una demanda de 30 m³ y un tiempo de servicio para descarga de 35 minutos.

El modelo tiene 3840 variables binarias, 46 variables lineales, 220 restricciones de igual, 5013 restricciones de desigualdad, resuelto en 66 iteraciones y 0.01 segundos, 139285 nodos de ramificación y corte, 47813761 iteraciones simplex y una función objetivo igual a 4.

Tabla 9. Programación 5 clientes – Caso 3

PROGRAMACIÓN				
VEHÍCULO	OBRA	HORA CARGUE	LLEGADA A OBRA	LLEGADA PLANTA
1	CC4	7:30:00 a. m.	8:00:00 a. m.	9:16:00 a. m.
4	CC4	7:50:00 a. m.	8:16:00 a. m.	8:36:00 a. m.
2	CC5	8:10:00 a. m.	8:41:00 a. m.	9:36:00 a. m.
4	CC5	8:36:00 a. m.	9:07:00 a. m.	9:57:00 a. m.
5	CC5	8:56:00 a. m.	9:27:00 a. m.	10:17:00 a. m.
1	CC5	9:16:00 a. m.	9:47:00 a. m.	10:37:00 a. m.
2	BODEGA AGROINDUSTRIAL	9:36:00 a. m.	10:17:00 a. m.	11:17:00 a. m.
4	CIAT	9:57:00 a. m.	10:16:00 a. m.	10:57:00 a. m.
5	BODEGA AGROINDUSTRIAL	10:17:00 a. m.	10:58:00 a. m.	1:37:00 p. m.
1	CIAT	10:37:00 a. m.	10:56:00 a. m.	11:37:00 a. m.
4	BODEGA AGROINDUSTRIAL	10:57:00 a. m.	11:38:00 a. m.	1:17:00 p. m.
2	CIAT	11:17:00 a. m.	11:56:00 a. m.	12:37:00 p. m.
1	BODEGA AGROINDUSTRIAL	11:37:00 a. m.	12:18:00 p. m.	1:57:00 p. m.
2	CIAT	12:37:00 p. m.	12:56:00 p. m.	2:37:00 p. m.
4	PLAZA DE TOROS	1:17:00 p. m.	2:03:00 p. m.	4:28:00 p. m.
5	PLAZA DE TOROS	1:37:00 p. m.	2:28:00 p. m.	4:28:00 p. m.
1	PLAZA DE TOROS	1:57:00 p. m.	2:53:00 p. m.	4:28:00 p. m.
2	PLAZA DE TOROS	2:37:00 p. m.	3:23:00 p. m.	4:28:00 p. m.

Fuente: Elaboración propia

A medida que se adicionan clientes, la utilización de los vehículos incrementa conforme a la demanda establecida, se puede observar en la Tabla 9 que la programación inicial se realiza de manera secuencial con los sitios de construcción agregados, como último se entrega al sitio con mayor tiempo de viaje, siendo este la plaza de toros, también es importante resaltar la amplitud en su ventana de tiempo.

4.2.4 Caso 4: 6 clientes

En este caso se agrega un cliente más, para el cual se tiene una venta de tiempo de 8:00 a.m. – 11:35 a.m., la demanda requerida es $30 m^3$ y el tiempo de servicio para descarga de 35 minutos, el aumento considerable en la demanda de este cliente y el anterior, proporciona un mejor panorama de la empresa ante variaciones, respecto a las condiciones iniciales.

El modelo tiene 4810 variables binarias, 50 variables lineales, 240 restricciones de igual, 6117 restricciones de desigualdad, resuelto en 67 iteraciones y 0.02 segundos, 300 nodos de ramificación y corte, 78020 iteraciones simplex y una función objetivo igual a 5.

Tabla 10. Programación 6 clientes – Caso 4

PROGRAMACIÓN				
VEHÍCULO	OBRA	HORA CARGUE	LLEGADA A OBRA	LLEGADA PLANTA
3	CC5	7:30:00 a. m.	8:20:00 a. m.	9:10:00 a. m.
1	CC5	7:50:00 a. m.	8:30:00 a. m.	9:30:00 a. m.
2	CC5	8:10:00 a. m.	8:41:00 a. m.	9:50:00 a. m.
4	CC5	8:30:00 a. m.	9:20:00 a. m.	10:10:00 a. m.
5	CC6	8:50:00 a. m.	9:21:00 a. m.	10:30:00 a. m.
3	CIAT	9:10:00 a. m.	10:52:00 a. m.	12:31:00 p. m.
1	CC4	9:30:00 a. m.	10:30:00 a. m.	10:50:00 a. m.
2	CC6	9:50:00 a. m.	10:21:00 a. m.	11:11:00 a. m.
4	CC6	10:10:00 a. m.	10:41:00 a. m.	11:31:00 a. m.
5	CC6	10:30:00 a. m.	11:01:00 a. m.	11:51:00 a. m.
1	CC4	10:50:00 a. m.	11:27:00 a. m.	12:11:00 p. m.
2	CIAT	11:11:00 a. m.	11:52:00 a. m.	1:14:00 p. m.
4	CIAT	11:31:00 a. m.	12:22:00 p. m.	4:35:00 p. m.
5	BODEGA AGROINDUSTRIAL	11:51:00 a. m.	12:10:00 p. m.	12:54:00 p. m.
1	CIAT	12:11:00 p. m.	12:52:00 p. m.	1:54:00 p. m.
3	BODEGA AGROINDUSTRIAL	12:31:00 p. m.	12:50:00 p. m.	1:34:00 p. m.
5	BODEGA AGROINDUSTRIAL	12:54:00 p. m.	1:25:00 p. m.	2:14:00 p. m.
2	PLAZA DE TOROS	1:14:00 p. m.	2:06:00 p. m.	4:35:00 p. m.
3	BODEGA AGROINDUSTRIAL	1:34:00 p. m.	2:00:00 p. m.	2:40:00 p. m.
1	PLAZA DE TOROS	1:54:00 p. m.	2:40:00 p. m.	4:35:00 p. m.
5	PLAZA DE TOROS	2:14:00 p. m.	3:05:00 p. m.	4:35:00 p. m.
3	PLAZA DE TOROS	2:40:00 p. m.	3:30:00 p. m.	4:35:00 p. m.

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos para la programación de 6 clientes, el uso de los vehículos es de 5, lo cual representa un aumento en la utilización de estos, lo cual se debe al incremento en la demanda, además se debe considerar el tiempo de viaje, al final de la programación se resalta la priorización del modelo por el cliente con la ubicación más lejana y cercana de la planta, correspondientes a la plaza de toros y bodega agroindustrial.

4.2.5 Caso 5: 7 clientes

Se añade un cliente para este último caso considerando las capacidades de la empresa, pues presentan limitantes en el modelo, la ventana de tiempo es de 12:00 p.m. – 03:40 p.m., una demanda de 18 m³ y un tiempo de servicio para descarga de 10 minutos.

El modelo tiene 5104 variables binarias, 52 variables lineales, 250 restricciones de igual, 6553 restricciones de desigualdad, resuelto en 68 iteraciones y 0.02 segundos, 1280 nodos de ramificación y corte, 217906 iteraciones simplex y una función objetivo igual a 5.

Tabla 11. Programación 7 clientes – Caso 5

PROGRAMACIÓN				
VEHÍCULO	OBRA	HORA CARGUE	LLEGADA A OBRA	LLEGADA PLANTA
3	CC6	7:30:00 a. m.	8:01:00 a. m.	8:51:00 a. m.
4	CC5	7:50:00 a. m.	8:31:00 a. m.	9:51:00 a. m.
2	CC5	8:10:00 a. m.	8:41:00 a. m.	9:31:00 a. m.
1	CC6	8:30:00 a. m.	9:01:00 a. m.	10:11:00 a. m.
3	CC5	8:51:00 a. m.	9:41:00 a. m.	10:31:00 a. m.
5	CC6	9:11:00 a. m.	9:42:00 a. m.	10:51:00 a. m.
2	CC5	9:31:00 a. m.	10:02:00 a. m.	11:11:00 a. m.
4	CIAT	9:51:00 a. m.	11:17:00 a. m.	12:31:00 p. m.
1	CC6	10:11:00 a. m.	10:42:00 a. m.	12:11:00 p. m.
3	CC4	10:31:00 a. m.	10:57:00 a. m.	11:31:00 a. m.
5	CC4	10:51:00 a. m.	11:30:00 a. m.	11:51:00 a. m.
2	CIAT	11:11:00 a. m.	12:00:00 p. m.	1:12:00 p. m.
3	CIAT	11:31:00 a. m.	12:30:00 p. m.	1:32:00 p. m.
5	BODEGA AGROINDUSTRIAL	11:51:00 a. m.	12:14:00 p. m.	12:52:00 p. m.
1	CIAT	12:11:00 p. m.	1:00:00 p. m.	2:32:00 p. m.
4	BODEGA AGROINDUSTRIAL	12:31:00 p. m.	12:50:00 p. m.	1:52:00 p. m.
5	BODEGA AGROINDUSTRIAL	12:52:00 p. m.	1:25:00 p. m.	2:12:00 p. m.
2	PLAZA DE TOROS	1:12:00 p. m.	1:58:00 p. m.	3:12:00 p. m.
3	BODEGA AGROINDUSTRIAL	1:32:00 p. m.	2:00:00 p. m.	2:52:00 p. m.
4	PLAZA DE TOROS	1:52:00 p. m.	2:40:00 p. m.	4:35:00 p. m.
5	PLAZA DE TOROS	2:12:00 p. m.	3:05:00 p. m.	4:35:00 p. m.
1	PLAZA DE TOROS	2:32:00 p. m.	3:30:00 p. m.	4:35:00 p. m.
3	CC7	2:52:00 p. m.	3:28:00 p. m.	4:35:00 p. m.
2	CC7	3:12:00 p. m.	3:40:00 p. m.	4:35:00 p. m.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 11 se observa la programación de 7 clientes, de acuerdo con el caso anterior se agregan 2 entregas más, las condiciones iniciales de la empresa definen un número máximo de recargas y con ello un límite superior para las entregas, a través de los casos anteriores se puede evidenciar entre las últimas entregas la programación del cliente con mayor distancia de la planta, el cual corresponde a la plaza de toros.

La elaboración de los casos de estudio permite encontrar un cronograma óptimo, para la planificación de las entregas a los clientes, igual que los despachos asignados utilizando al mínimo la flota, pero cumpliendo con los parámetros acordados.

A medida que se incrementa los clientes de manera progresiva, el número de vehículos aumenta, con el fin de cubrir las ventanas de tiempo, la función objetivo del modelo matemático indica la minimización de la flota, pero sujeta al cumplimiento de los tiempos. Cada caso presenta una relación directamente proporcional a la demanda requerida, al pasar de 4 a 6 clientes con un número de entregas establecidas, la flota de vehículos se utiliza en un 100%, se obtiene

un mayor rendimiento de los recursos disponibles tanto de flota, como de producción.

Para los 4 casos se evidencia un elemento característico respecto a la distancia de los sitios de construcción, las entregas programadas para cada uno se realizan de tal manera que la plaza de toros se lleva a cabo entre las últimas, este cliente es el de mayor distancia y a su vez, tiene una ventana de tiempo ajustada respecto a los demás sitios.

El uso de la flota en el caso de estudio, para el día laboral analizado, tiende a programarse de forma secuencial y utilizar el máximo de vehículos disponibles, llevando a causar costos adicionales de transporte y manejar una tasa de producción baja. al utilizar toda la flota no indica un grado de optimización y de uso eficiente de los recursos. No contar con una programación orientada a la integración de los despachos y la producción, puede llevar a no cumplir con los requerimientos del cliente, en el caso de estudio, por ejemplo, al pactar reducir la ventana planificada por el cliente, implica enfrentarse a penalizaciones por incumplimiento.

De acuerdo con lo anterior, en cada caso de estudio analizado, se puede observar un aumento progresivo de clientes, para explotar al máximo la capacidad de producción y el uso de la flota. El caso de estudio para el número de clientes que se programaron en el día, se obtuvo unas ventas de \$44.997.427, comparado con el caso 2 como indica la Tabla 12, la variación porcentual fue de un 18% en cuestión a las ventas y así sucesivamente con los demás casos, como se puede observar en la Figura 7. obteniendo un porcentaje de beneficios superior en cada caso, la rentabilidad de incluir nuevos clientes permite a la empresa realizar una estimación que permita cumplir con la meta de ventas anual para el volumen de concreto, por lo tanto, se puede utilizar los vehículos de manera eficiente.

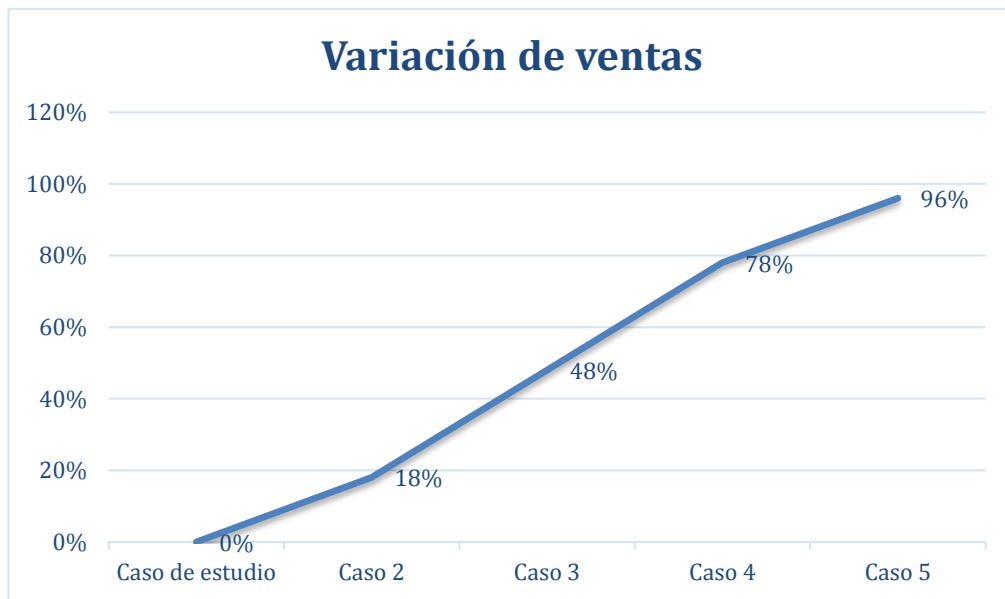
La Tabla 12 muestra las variaciones respecto al aumento en los clientes y con ello la demanda requerida, lo anterior en comparación a un día laboral en el cual se emplea la todos los vehículos, la programación para 4 clientes(caso 2) permite realizar las entregas con el uso de 3 vehículos, aumentado la utilización en un 60%, por otra parte la venta total de concreto incrementa, esto en relación con el volumen solicitado por el nuevo cliente, contribuye a cumplir la meta establecida. para los siguientes casos se puede evidenciar un aumento gradual tanto en el volumen de concreto como la flota de vehículos, lo anterior posibilita la optimización de esta.

Tabla 12. Ventas de concreto

	Demanda	Venta de concreto	%Variacion de las ventas
Caso de estudio	100	\$ 44.997.427	
Caso 2	118	\$ 53.096.963	18%
Caso 3	148	\$ 66.596.191	48%
Caso 4	178	\$ 80.095.419	78%
Caso 5	196	\$ 88.194.956	96%

Fuente: Elaboración propia

Figura 7. Variación de ventas



Fuente: Elaboración propia

La implementación de los indicadores mencionados en el capítulo 2 para los diferentes casos de análisis se puede observar en la Tabla 13. Es importante resaltar que la programación realizada en el caso de estudio y el modelo planteado para la situación de un día laboral no tiene un resultado significativo en cuanto al porcentaje de eficiencia de la planta, sin embargo, se presentan variaciones relevantes respecto al indicador de pedidos completos. No obstante, se puede lograr una mayor eficiencia en el caso de estudio, donde se utiliza la flota completa para abastecer los 3 clientes, en comparación con los demás casos analizados, donde se ingresan de manera gradual un número determinado de clientes, en el cual aumenta la eficiencia de la planta al emplear los mismos recursos.

Tabla 13. Indicadores

	Número de clientes	Vehículos Utilizados	Demanda m3	%Eficiencia	%Pedidos Completos
Caso de Estudio	3	5	98	40,8%	33%
Caso de Estudio - Ampl	3	3	100	41,7%	100%
Caso 2	4	3	118	49,2%	100%
Caso 3	5	4	148	61,7%	100%
Caso 4	6	5	178	74,2%	100%
Caso 5	7	5	196	81,7%	100%

Fuente: Elaboración propia

4.2.6 Caso 6: variación de parámetros

En este caso se realiza un análisis del impacto en el modelo de acuerdo con las variaciones de los parámetros, como punto de inicio se emplean los datos del caso anterior.

Para cada parámetro se determina un porcentaje de modificación con respecto al original y se añade al modelo para obtener el valor de la función objetivo. En la Tabla 14 se encuentran los parámetros evaluados, con sus respectivos porcentajes de cambio y el resultado dado por el modelo.

Tabla 14. Variación parámetros

Parámetro	-5%	-10%	-15%	-20%	-25%	-30%	-59%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
gamma	5	5	5	5	5	5	Infactible	5	5	5	5	5	5
	-2%	-3%	-4%	-5%	-6%	-7%	2%	3%	4%	5%	6%	10%	
a[i]	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	Infactible	

Fuente: Elaboración propia

El parámetro determinado para la primera instancia del análisis es el tiempo de endurecimiento del concreto (gamma), de acuerdo a la restricción 3.10 las entregas se deben realizar antes de este tiempo, a partir de variaciones porcentuales de -59% como se observa en la Tabla 14, no se tiene una solución óptima, pues de acuerdo a un tiempo mínimo de retraso establecido por el cliente para sus entregas mintlc_{CL} . los vehículos esperan en el sitio de construcción para descargar el concreto, debido a esto se supera el tiempo de endurecimiento del producto, por lo cual no es posible realizar las entregas, se identifica una relación de dependencia entre los tiempos de endurecimiento y mínimo de retraso entre dos entregas consecutivas, si este último disminuye el modelo encuentra una solución óptima.

El segundo parámetro analizado, es la ventana de tiempo inicial de los clientes (a_i), al reducir esta ventana no tendrá mayor repercusión en el modelo debido a que se tendrá una ventana más amplia para responder a las entregas. por el contrario, al aumentar la ventana después de un 10% el modelo será infactible, esto se debe a que la ventana va a estar más ajustada para cada entrega, por lo que resultará imposible cumplir con la demanda.

Tabla 15. Variación de la ventana de tiempo final – clientes

	-7%	-6%	-5%	-4%	-3%	-2%	2%	3%	4%	5%	6%	7%
b_{CL}	Infactible	Infactible	Infactible	Infactible	Infactible	Infactible	Factible	Factible	Factible	Factible	Factible	Factible
Aumento capacidad del vehiculo	10	10	10	11	15	15	9	9	9	9	9	9
Nuevo valor - Funcion objetivo	4	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5

Fuente: Elaboración propia

La ventana final de los clientes (b_{CL}) varía de acuerdo a la Tabla 15, este parámetro presenta mayor trascendencia ante pequeñas proporciones en los valores iniciales, para un porcentaje de -2% el modelo es infactible, es decir, cuando se ajusta el tiempo para cada cliente no se logra realizar las entregas. al modificar la capacidad de los vehículos para evaluar el tipo de relación en el problema presente, se obtiene un nuevo resultado en la función objetivo, indicando una correlación inversamente proporcional entre el ajuste de la ventana y el aumento de la capacidad de los vehículos. en otras palabras, ante una disminución en la ventana final del cliente se requiere un incremento en la capacidad. a partir de 2% en dicho parámetro el modelo tiene como resultado constante la utilización de 5 vehículos, por lo cual no es necesario el incremento en la capacidad.

El tiempo entre entregas desde la planta mintld es un valor que está sujeto a las ventanas de tiempo de la planta y a el número de nodos recarga, dado por el conjunto de recargas mencionado en el modelo, por lo que un aumento en este parámetro puede resultar en el incumplimiento de la restricción 3.17. también ocurre lo mismo con el aumento de la ventana de tiempo de la planta, por la relación antes descrita.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Mejorar la programación de la solicitud de pedidos de concreto por parte de los distintos sitios de construcción con miras a una mejor organización de los despachos para la planta de producción del concreto. Esta solicitud debería tener penalizaciones al cancelar un pedido, cambiar el horario de entrega, entre otros factores que afecta la programación de las entregas.
- la caracterización de la programación de la planta permite demostrar que la planta es eficaz pero no eficiente, cumple con los pedidos que planearon, pero la utilización de sus recursos no es la óptima. el diseñar una herramienta de mejoramiento en la planta permite optimizar la utilización de la capacidad instalada.
- Para el problema de enrutamiento de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW) en empresas productoras de concreto, se modela la capacidad de la planta de acuerdo con la diferencia de su ventana de tiempo y la fracción con el tiempo mínimo entre dos entregas, así se establece el número máximo de recargas para los vehículos en un día laborable, cuando se ajuste la ventana de tiempo de la planta, disminuye el número de recargas, además se representa una relación inversamente proporcional al tiempo mínimo entre dos entregas, para el caso de estudio se tiene como resultado un número máximo de 26 entregas.
- El modelo se ajusta al caso de estudio ya que no se presenta un número mayor a 4 clientes, conforme al histórico de la empresa, sin embargo, el análisis de sensibilidad determina que se pueden atender 7 clientes con 5 vehículos que disponen, el solucionador AMPL permite encontrar esta solución óptima, no obstante, para escenarios mayores a este tamaño se recomienda utilizar métodos de solución heurísticos o metaheurísticos.
- La integración entre la producción y los despachos es un elemento fundamental, en los tipos de empresas que manejan productos perecederos. Al contemplar estas etapas de forma separada, se llega a obtener programaciones que no explotan la capacidad optima que se tiene. El modelo matemático propuesto, incluye este componente de integración y permite obtener un programa que sirve de elemento de planificación de las operaciones. Los resultados arrojados por el solver Gurobi, indican que la utilización de la flota se puede optimizar, dando lugar que ingresen nuevos clientes, y tener un aprovechamiento al máximo de los vehículos para los despachos, una tasa de utilización del 100 % e ingresar nuevos compradores, costo de oportunidad.
- Al modelo se le puede añadir el tiempo de transporte como estocástico, teniendo en cuenta la hora de salida del vehículo y la situación del tráfico, por medio de aplicaciones de geolocalización. También agregar

restricciones que contengan un nivel de confianza o posibilidades de programación de acuerdo con las condiciones del camino y clima.

- La inclusión de nuevos clientes al modelo, y la variación de sus ventanas de tiempo, se puede llegar obtener soluciones en corto tiempo, como en otros casos que se pueden obtener soluciones en un tiempo muy largo. Por lo que este tipo de modelos se caracterizan como NP-HARD en términos de optimización. Donde la variación del número de entregas y ventanas de tiempo, pueden requerir técnicas más avanzadas para problemas a gran escala, como un número más amplio de clientes, como una flota más extensa. La metodología propuesta para la programación de la operación pequeña proporciona una asignación y un cronograma óptimo que permite cumplir con las ventanas de tiempo de cada cliente, con el uso óptimo de la flota vehículos.

BIBLIOGRAFÍA

- Afzal, Sohail, and Zishan Raza Khan. 2018. "A Review Paper on Factors Affecting Ready- Mix Concrete Delivery Pattern." 7(3): 97–100.
- Arshinder, Arun Kanda, and S G Deshmukh. 2008. "Supply Chain Coordination: Perspectives, Empirical Studies and Research Directions." *International Journal of Production Economics* 115(2): 316–35.
- Asbach, Lasse, Ulrich Dorndorf, and Erwin Pesch. 2009. "Analysis, Modeling and Solution of the Concrete Delivery Problem." *European Journal of Operational Research* 193(3): 820–35.
- Aziz, Remon Fayek. 2018. "Engineering Approach to Allocate and Evaluate Performance Influencing Factors for Ready Mixed Concrete Batch Plant under Different Effects." *Alexandria Engineering Journal* 57(4): 3237–47.
- Ballou, Ronald H et al. 2004. *Logística : Administración de La Cadena de Suministro*. México : Pearson Educación, 2004.
- Chopra, Sunil et al. 2008. *Administración de La Cadena de Suministro : Estrategia, Planeación y Operación*. México : Pearson Educación, 2008.
- Colombia. Camara de Comercio de Cali. 2019. "Balance Económico 2018 y Perspectivas 2019 Valle Del Cauca." *Enfoque Competitivo* (110): 19.
- Devapriya, Priyantha, William Ferrell, and Neil Geismar. 2017. "Integrated Production and Distribution Scheduling with a Perishable Product." *European Journal of Operational Research* 259(3): 906–16.
- Ehm, Jens, and Michael Freitag. 2016. "The Benefit of Integrating Production and Transport Scheduling." *Procedia CIRP* 41: 585–90.
- Kinable, J, T Wauters, and G Vanden Berghe. 2014. "The Concrete Delivery Problem." *Computers and Operations Research* 48: 53–68.
- Krajewski, L.J., L.P. Ritzman, and M.K. Malhotra. 2008. *Administración de Operaciones*. Octava. Pearson educación.
- Liu, Zhenyuan, Yakun Zhang, Minghui Yu, and Xiaolu Zhou. 2017. "Heuristic Algorithm for Ready-Mixed Concrete Plant Scheduling with Multiple Mixers." *Automation in Construction* 84(June): 1–13.
- Liu, Zhenyuan, Yang Zhang, and Menglei Li. 2014. "Integrated Scheduling of Ready-Mixed Concrete Production and Delivery." *Automation in Construction* 48: 31–43.
- Moons, Stef, Katrien Ramaekers, An Caris, and Yasemin Arda. 2017. "Integrating Production Scheduling and Vehicle Routing Decisions at the Operational Decision Level: A Review and Discussion." *Computers & Industrial Engineering* 104: 224–45.
- Mora García, Luis Aníbal. 2008. *Indicadores de La Gestión Logística*. 2 ed. Ecoe Ediciones.
- Park, Moonseo, Woo-young Kim, Hyun-soo Lee, and Sangwon Han. 2011. "Supply Chain Management Model for Ready Mixed Concrete." *Automation in Construction* 20(1): 44–55.
- Rey, D., Maghrebi, M., & Waller, S. (2014). A Single Depot Concrete Delivery with Time Windows Using Integer and Assignment Variables.

- Sa, Julia Muniz de Miranda, and Mojtaba Maghrebi. 2018. "A More Realistic Approach towards Concrete Delivery Dispatching Problem: Using Real Distance Instead Spatial Distance." *Australian Journal of Civil Engineering* VO - 16 (1): 1.
- Sanchez de Guzman, Diego. 2001. *Tecnología Del Concreto y Del Mortero*. Colombia : Pontificia Universidad Javeriana, 2001.
- Syverson, Chad. 2008. "Markets: Ready-Mixed Concrete." *Journal of Economic Perspectives* 22(1): 217–33.
- Thawongklang, K, and L Tanwanichkul. 2016. "Application of Production Scheduling Techniques for Dispatching Ready-Mixed Concrete." *International Journal of Technology* 7(7): 1163–70.
- Thawongklang, Kittipong, and Ladda Pitaksringkarn. 2016. "Application of Production Scheduling Techniques for Dispatching Ready- Mixed Concrete." *International Journal of Technology* (August 2018): 1163–70.
- Tommelein, Iris D, and Annie En Yi Li. 1999. "Just-in-Time Concrete Delivery: Mapping Alternatives for Vertical Supply Chain Integration." *Proceedings of the 7th Annual Conference of the International Group for Lean Construction IGL-7*: 97–108.
- Toth, Paolo, and Daniele Vigo, eds. 2001. *The Vehicle Routing Problem*. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Yan, Shangyao, and Weishen Lai. 2007. "An Optimal Scheduling Model for Ready Mixed Concrete Supply with Overtime Considerations." *Automation in Construction* 16: 734–44.

ANEXOS

Anexo 1. Código en AMPL – Caso de estudio

```

set K;                                #conjunto de vehiculos
set D ordered;                        #conjunto de Recargas en la planta
set CL;                               #conjunto de sitios de construccion
set C;                                #conjuntos de entregas a los sitios de construccion
set V:= {C union D union {0} union {200}}; #conjunto de todos los nodos
set E within {u in V, v in V:u<>v};    #conjunto de arcos
set SUCCV{V} within V;                #conjunto de sucesores de los nodos
set PREDV{V} within V;                #conjunto de predecesores de los nodos
set CD{CL} within C ordered;          #conjunto construccion-entrega
param t{(u,v) in E};                  #tiempo de viaje
param gamma;                          #tiempo maximo de endurecimiento del concreto
param qk{k in K};                     #capacidad de cada vehiculo
param M;                              #constante M
param st{u in V};                     #tiempo de servicio
param lambda{CL};                     #demanda de cada sitio de construccion
param a{CL};                           #ventana de tiempo inicial para cada sitio de construccion
param b{CL};                           #ventana de tiempo final para cada sitio de construccion
param ad;                              # ventana de tiempo inicial planta
param bd;                              #ventana de tiempo final planta
param mintld;                          #tiempo minimo entre 2 entregas consecutivas de la planta
param mintlc{CL};                     #tiempo minimo de retraso para cada sitio de construccion
param maxtlc{CL};                     #tiempo maximo de retraso para cada sitio de construccion
param ncc{i in CL}:= last(CD[i]);      #ultimo elemento del conjunto de sitios construccion-entrega
param nd:=last(D);
var X{(u,v) in E, k in K} binary;
var W{u in V};

minimize Flota:sum{k in K, v in SUCCV[0]}X[0,v,k];
subject to R1{k in K}:sum{v in SUCCV[0]}X[0,v,k]<=1;
subject to R2{k in K}:sum{u in PREDV[200]}X[u,200,k]<=1;
subject to R3{k in K, v in C union D}:sum{u in PREDV[v]}X[u,v,k]-sum{u in SUCCV[v]}X[v,u,k]=0;
subject to R4{u in C}:sum{k in K, v in SUCCV[u]}X[u,v,k]<=1;
subject to R5{i in CL, j in CD[i]:j in j..ncc[i]-1}: sum{k in K, v in SUCCV[j+1]}X[j+1,v,k]-sum{k in K, v in SUCCV[j]}X[j,v,k]<=0;
subject to R6{i in CL}: sum{u in CD[i], k in K, v in SUCCV[u]}X[u,v,k]*qk[k]>=lambda[i];
subject to R7{u in D}: sum{k in K, v in SUCCV[u]}X[u,v,k]<=1;
subject to R8{(u,v) in E, k in K}: -M*(1-X[u,v,k])+st[u] + t[u,v] <= W[v]-W[u];
subject to R9{(u,v) in E, k in K:u in D and v in C}: M*(1-X[u,v,k])+ gamma +st[u] >= W[v]-W[u];
subject to R10{i in CL, j in CD[i]}: W[j]>= a[i];
subject to R11{i in CL, j in CD[i]}: W[j]<= b[i];
subject to R12{u in D}: W[u]>= ad;
subject to R13{u in D}: W[u]<= bd;
subject to R14{i in CL, j in CD[i]:j in j..ncc[i]-1}:W[j+1]-W[j]>= mintlc[i];
subject to R15{i in CL, j in CD[i]:j in j..ncc[i]-1}:W[j+1]-W[j]<= maxtlc[i];
subject to R16{j in D: j in j..nd-1}: W[j+1]-W[j]>=mintld;

```

```

set CL:= 27 28 29;
set K:= 1 2 3 4 5 ;

param M:= 10000;

set D:=1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26;

set C:= 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;

set CD[27]:= 100 101 102 103;
set CD[28]:= 104 105 106 107;
set CD[29]:= 108 109 110 111;

set SUCCV[0]:=1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 200;
set SUCCV[1]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[2]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[3]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[4]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[5]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[6]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[7]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[8]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[9]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[10]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[11]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[12]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[13]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[14]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[15]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[16]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[17]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[18]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[19]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[20]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[21]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[22]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[23]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[24]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[25]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;
set SUCCV[26]:=100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111;

```


param	t	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	200	=
0	.	.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	0
1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
6	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
8	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
11	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
12	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
13	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
14	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
15	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
16	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3	3	3	30	30	30	30	.	.
17	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	25	25	25	3	3								

```

param st:=
0 0
1 16
2 16
3 16
4 16
5 16
6 16
7 16
8 16
9 16
10 16
11 16
12 16
13 16
14 16
15 16
16 16
17 16
18 16
19 16
20 16
21 16
22 16
23 16
24 16
25 16
26 16
100 35
101 35
102 35
103 35
104 35
105 35
106 35
107 35
108 35
109 35
110 35
111 35;

param lambda:=
27 33
28 32
29 35;

param ad:=450; #7:30
param bd:=960; #4:30

param a:=
27 480 #8:00
28 480 #8:00
29 780; #1:00

param b:=
27 780 #11:30
28 840 #3:00
29 960; #4:00

param mintld:=20;

param mintlc:=
27 30
28 35
29 25;

param maxtlc:=
27 60
28 60
29 60;

param qk:=
1 9
2 9
3 9
4 9
5 9;

```

Anexo 2. Enfoques de investigación para el problema de entrega de concreto

Artículo	Método de solución	Ventanas de tiempo	Vehículos	Función objetivo
Integer linear programming models for a cement delivery problem. Hertz A, Uldry M	Programación mixta-entera	Tiempo de uso del vehículo	Heterogénea	Minimizar el uso del vehículo y Minimizar la cantidad de vehículos
A selection hyper-heuristic for scheduling deliveries of ready-mixed concrete. Misir M, Yancroonenburg	heurística	Hora de inicio estricta y Tiempo Límite del concreto	Heterogénea	Minimizar el tiempo de viaje o la distancia, Minimizar el desperdicio y Minimizar la demora
Concrete delivery using a combination of GA and ACO. Silva C, Faria	heurística	Ventana de tiempo estricta y Tiempo Límite del concreto	Homogénea	Minimizar el uso del vehículo y Minimizar la tercerización
Analysis modeling and solution of the concrete delivery problem. Asbach L	Programación mixta-entera y heurística	Ventana de tiempo estricta y Tiempo Límite del concreto	Heterogénea	Minimizar el uso del vehículo y maximizar la cantidad de clientes satisfechos
An optimal scheduling model for ready mixed concrete supply with over time considerations. Yan S, Lai W	Programación mixta-entera	Ventana de tiempo suave y Tiempo Límite del concreto	Homogénea	Minimizar el tiempo de viaje o la distancia, Minimizar la demora y Minimizar los costos operativo
Dispatching ready mixed concrete trucks under demand postponement and weight limit regulation. Lin P-C, Wang	Programación mixta-entera	Ventana de tiempo estricta, Tiempo de uso del vehículo y Tiempo Límite del concreto	Homogénea	Minimizar el tiempo de viaje o la distancia, Minimizar la demora, Minimizar el uso del vehículo y Maximizar el saldo de utilización
Genetic algorithms for supply-chain scheduling: A case study in the distribution of ready-mixed concrete. Naso D, Surico	Programación mixta-entera y heurística	Ventana de tiempo suave y Tiempo Límite del concreto	Homogénea	Minimizar el uso del vehículo, Minimizar la tercerización y Minimizar la demora
A hybrid solution approach for ready-mixed concrete delivery. Schmid V	Híbrida y Heurística	Ventana de tiempo suave	Heterogénea	Minimizar el tiempo de viaje o la distancia y Minimizar la demora
Hybridization of very large neighborhood search for ready-mixed concrete delivery problems. Schmid V	Programación mixta-entera y Híbrida	Ventana de tiempo suave	Heterogénea	Minimizar el tiempo de viaje o la distancia y Minimizar la demora
Integrated scheduling of ready-mixed concrete production and delivery. Zhenyuan Liu	Programación mixta-entera y heurística	Ventana de tiempo estricta y Tiempo Límite del concreto	Heterogénea	Minimizar los costos operativos y Minimizar el tiempo de viaje o la distancia
Production scheduling and truck dispatching of ready mixed concrete. Shangyao Yan	Programación mixta-entera	Ventana de tiempo suave y Tiempo Límite del concreto	Homogénea	Minimizar los costos operativos

Fuente: Adaptado de (Kinable, Wauters, and Vanden Berghe 2014)