



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

EFECTO DEL TIEMPO DE DETENCIÓN EN LA SEGURIDAD OPERACIONAL EN CONCENTRADUCTOS: HACIA LA DETERMINACIÓN DE UN TIEMPO MÁXIMO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PEDRO NOLASCO VALENCIA ZUNINO

PROFESOR GUÍA
CHRISTIAN IHLE BASCUÑÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS
YARKO NIÑO CAMPOS

SANTIAGO DE CHILE
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil
POR: Pedro Nolasco Valencia Zunino
FECHA: 22/11/2017
PROFESOR GUÍA: Christian Ihle Bascuñán

EFECTO DEL TIEMPO DE DETENCIÓN EN LA SEGURIDAD OPERACIONAL EN CONCENTRADUCTOS: HACIA LA DETERMINACIÓN DE UN TIEMPO MÁXIMO

El transporte hidráulico de sólidos es una tecnología profusamente usada en la industria minera, tanto en el proceso de transporte interior de la planta concentradora como desde ésta hasta la planta de filtros, en el puerto de embarque del concentrado, o hasta el depósito de relaves.

El proceso de transporte no está exento de riesgos, particularmente en los sistemas de transporte presurizado de pulpas de minerales. Al ser una suspensión acuosa de sólidos (más de una fase), están sujetos a un proceso de segregación. Esto ocurre en el evento de bajas velocidades y especialmente ante detenciones programadas y no programadas del sistema.

Aparece un cuestionamiento importante ante el requerimiento de proceder a una detención. Si bien una condición segura es detener el sistema sólo después de la descarga del mineral en curso y reemplazo con agua en el ducto, ésta tiene asociado un alto costo operacional, por el alto valor y escasez del agua, la energía asociada a la recirculación de esta agua y del tiempo de rellenar el sistema con pulpa.

El criterio normalmente usado para una detención de una línea de transportes de concentrado es “empaquetarlo” con pulpa. La pregunta que se hace el operador es cuál es un tiempo seguro, sin riesgo de embanque y eventuales roturas de la línea, con las consecuencias de daño a las instalaciones y al entorno en general.

En efecto, en una detención de un sistema de transporte de pulpa se producen acumulaciones de sólidos en los puntos bajos por migración gravitatoria, tanto axial como radial. Este fenómeno provoca un aumento de la densidad y alto grado de compactación en los puntos bajos y, en consecuencia, un aumento significativo de la resistencia que ofrece la masa sedimentada a ser resuspendida y dispersada, pudiendo llegar a niveles que impidan remover la pulpa sin sobrepasar las presiones de diseño, durante el re-arranque.

Los diseños de los sistemas de transporte de pulpa procuran un trazado limitando las pendientes a valores máximos cercanos al 15%, principalmente para evitar el fenómeno de acumulación de sólidos durante una detención. Los diseños también limitan algunas características de las pulpas, imponiendo valores máximos de concentración de alimentación, porcentaje de partículas gruesas, viscosidad de la pulpa y tensión de fluencia, evitando condiciones de sobrepresión tanto en régimen estacionario como en régimen transiente, incluyendo los mencionados re-arranques luego de un periodo de detención con pulpa.

La experiencia de la industria de la minería muestra que, luego de un periodo de detención con pulpa, se produce un aumento de las concentraciones en los puntos bajos y, consecuentemente, una disminución de ésta en los puntos altos. También se observa que el registro de densidad tiene directa relación con el perfil longitudinal del trazado de la línea de transporte, identificándose los

cambios de densidad de la pulpa a dicho trazado, comprobando que la pulpa se traslada con densidad variable y bien correlacionada con el perfil.

Las pulpas minerales transportadas hidráulicamente a largas distancias, por sus atractivos indicadores económicos, son principalmente los concentrados de hierro y de cobre y los relaves de cobre.

En el presente trabajo se establece un modelo para relacionar algunos parámetros geométricos de la línea de transporte con las características de la pulpa y los patrones de acumulación de sólidos en los puntos bajos, para concentrados de hierro. Se utilizan registros operacionales obtenidos durante la fase de Puesta en Marcha, Ramp Up y operaciones de concentrados de hierro actualmente en operación.

El análisis efectuado muestra un predictor para determinar el tiempo máximo de parada segura con pulpa, en función de las diferentes variables, considerando que las concentraciones medidas en el DIT, ubicado al final de la conducción, no registre una variación superior al 20% de la concentración media y que, con un adecuado grado de seguridad, no se acerquen a la concentración denominada como empaquetamiento o consolidada.

Las conclusiones a que arriba el presente trabajo de tesis, son las siguientes:

Se producen aumentos locales de la concentración de la pulpa en los puntos bajos, luego de una detención en el transporte hidráulico y estos aumentos son sensibles a la masa de sólidos que se transporta por gravedad hacia estos puntos.

La masa de sólidos que se transporta a los puntos bajos es a su vez dependiente del tiempo de duración de la detención y de la velocidad de sedimentación, que a su vez es dependiente de las características de la pulpa y de la geometría, especialmente las pendientes que propician la convergencia de sólidos en estos puntos bajos.

Se establece un modelo que predice el aumento de la concentración en los puntos bajos (C_p), sobre la base de registros de detenciones en concentrados de hierro.

Efectuado un análisis de sensibilidad a las distintas variables que influyen en la determinación del tiempo máximo de detención, se concluye que las variables más influyentes, entre las que se pudo analizar por disponibilidad de datos, son la concentración de la pulpa y las pendientes convergentes a los puntos bajos.

Otras variables que teóricamente deben influir, tanto en masa de sólidos que se desplaza hacia un punto bajo como al tiempo de detención máximo asociado, son el tamaño característico de partículas viscosidad de la pulpa, la densidad del sólido (s) y el diámetro de la conducción (D).

Agradecimientos

Quisiera agradecer en primer lugar a mis padres, quienes vieron postergada la culminación de este proceso. A mis hijas, siendo mi futura colega Antonia la motivación para reingresar y finalizar esta tesis. Igualmente espero de Amanda un gran futuro en cualquier ámbito.

Agradezco a la valiosa gente que encontré en Beauchef, partiendo por mis amigos Quimbals y Muchachichis con quienes guardamos recuerdos imborrables que rememoramos cuando podemos.

A mi Profesor Guía Christian Ihle por su pasión por agregar fundamentos y elegancia al procesamiento de los datos industriales y a los profesores de comisión Yarko Niño y Aldo Tamburrino por su buena disposición.

Al ingeniero y empresario Juan Rayo por haber promovido mi participación en proyectos desafiantes de transporte de pulpas en los 20 años en que trabajé en su empresa y al Ph.D Ramón Fuentes por haber sido un importante consultor, siempre dispuesto a compartir sus conocimientos.

Finalmente, a cada una de las personas no mencionadas anteriormente que de una u otra manera contribuyeron a la realización de esta memoria.

Tabla de contenido

1. Introducción	8
1.1. Antecedentes generales	8
1.1.1. Sistema de Transporte de Pulpas por Tuberías (STP)	8
1.1.2. Caracterización de las pulpas mineras.....	9
1.2. Motivación	10
1.3. Objetivos y alcances	11
1.3.1. Objetivo general	11
1.3.2. Objetivos específicos	11
1.3.3. Alcances.....	11
2. Metodología	12
2.1. Revisión bibliográfica y recopilación de antecedentes.....	12
2.2. Correlación entre las variaciones de la concentración y el perfil	12
2.2.1. Concentración punto bajo.....	12
2.2.2. Pendientes	12
2.2.3. Diámetro interno de la tubería	13
2.2.4. Concentración de sólidos media antes de la detención.....	13
2.2.5. Tiempo de detención	13
2.2.6. Gravedad específica del sólido	13
2.2.7. Ángulo de reposo.....	13
2.2.8. Granulometría.....	14
2.2.9. Reología.....	14
2.3. Evaluación y análisis de resultados	14
2.4. Definición del predictor	14
2.5. Evaluación de efecto de dispersión de la concentración máxima.....	14
2.6. Concentración máxima de empaquetamiento	16
3. Descripción de los concentrados de hierro analizados	17
3.1. Hy-Grade Pellets de India (HGP)	17
3.1.1. Descripción general del sistema HGP	17
3.1.2. Característica del concentrado de hierro HGP	18
3.2. Da Hong Shan de China (DHS).....	20
3.2.1. Descripción general del sistema DHS	20
3.2.2. Característica del concentrado de hierro DHS	22
3.3. Minera Hierro Atacama (MHA)	22
3.3.1. Descripción general del sistema MHA.....	23

3.3.2.	Característica del concentrado de hierro MHA	24
3.4.	Samarco de Brasil (SAM).....	25
3.4.1.	Descripción general del sistema SAM	25
3.4.2.	Característica del concentrado de hierro SAM.....	26
3.5.	Resumen de principales características de los mineroductos analizados.....	29
4.	Procesamiento de Datos de las detenciones	30
4.1.	Hy-Grade Pellets de India (HGP)	30
4.2.	Da Hong Shan de China (DHS).....	32
4.3.	Minera Hierro Atacama (MHA)	35
4.4.	Samarco de Brasil (SAM).....	36
5.	Desarrollo de Predictor.....	38
5.1.	Análisis dimensional.....	38
5.2.	Resultados	40
6.	Aplicación de Predictor.....	42
6.1.	Estimación de tiempo máximo de detención mineroductos	42
6.1.1.	Tiempo máximo de detención mineroductos HGP, DHS y MHA	42
6.1.2.	Tiempo máximo de detención mineroducto SAM	44
6.2.	Análisis de sensibilidad resultados SAM.....	46
6.3.	Análisis de sensibilidad de la pendiente para una conducción	48
6.4.	Análisis de sensibilidad de la concentración para una conducción típica	49
7.	Discusión.....	51
8.	Conclusiones	53
9.	Bibliografía.....	54
	Anexos A. Lista de Datos Puntos Bajos	56
	Anexo B: Gráficos Resultados Análisis de Sensibilidad.....	57

Índice de tablas

Tabla 1-1: Principales características de pulpas transportadas por tuberías a largas distancias.....	9
Tabla 3-1 Distribución de tamaño de partículas del concentrado de hierro HGP.	20
Tabla 3-2 Distribución de tamaño de partículas del concentrado de hierro DHS.	22
Tabla 3-3 Distribución de tamaño de partículas del concentrado de hierro en MHA	24
Tabla 3-4 Distribución de tamaño de partículas del tercer concentrado de SAM.	28
Tabla 3-5 Principales características de los mineroductos analizados.	29
Tabla 5-1. Parámetros de ajuste de tendencia según mínimos cuadrados.	40
Tabla 6-1. Sensibilidad de distintas variables sobre el tiempo de detención.	47
Tabla 6-2. Valores típicos de mineroductos de hierro.	48
Tabla 6-3. Valores típicos con pendiente 7,5% para sensibilidad a la concentración.	49

Índice de figuras

Figura 1-1: Diagrama Esquemático de Componentes de un STP.	9
Figura 2-1: Esquema de determinación de pendientes ($\tan\theta_e$ y $\tan\theta_s$).	13
Figura 2-2: Determinación del Ángulo de Reposo.....	14
Figura 3-1 Ubicación geográfica del trazado conducción HGP.	17
Figura 3-2 Perfil de elevación del trazado conducción HGP 18	18
Figura 3-3 Perfil de elevación del trazado conducción HGP.	18
Figura 3-4 Ubicación geográfica del trazado conducción SAM.	25
Figura 3-5 Perfil de elevación trazado tercer concentrado SAM.	26
Figura 3-6 Granulometría del concentrado de hierro SAM.	28
Figura 4-1 Tramo con batch de concentrado detenido HGP.	30
Figura 4-2 Distribución de densidad en re-partida, en la descarga HGP.	31
Figura 4-3 Perfil longitudinal y variación en la concentración de sólidos mineroducto HGP.	31
Figura 4-4 Dispersión HGP luego de 85 Km.	32
Figura 4-5 Perfil longitudinal y tramo con batch de concentrado detenido DHS.	33
Figura 4-6 Distribución de concentración en re-arranque, en la descarga DHS.	33
Figura 4-7 Perfil longitudinal y concentración de sólidos mineroducto DHS.	34
Figura 4-8 Dispersión DHS luego de 62 Km 34	34
Figura 4-9 Concentración de sólidos en descarga luego de 22 horas de parada MHA.	35
Figura 4-10 Perfil longitudinal y concentración de sólidos mineroducto MHA.	36
Figura 4-11 Dispersión MHA luego de 117 Km.	36
Figura 5-1 Curva de ajuste datos puntos bajos y aumento de concentración.....	41
Figura 6-1. Tiempo de detención y pendientes para aumento de concentración de 20% HGP.	43
Figura 6-2. Tiempo de detención y pendientes para aumento de concentración de 20% DHS.	43
Figura 6-3. Tiempo de detención y pendientes para aumento de concentración de 20% MHA. ..	44
Figura 6-4. Tiempos de detención y pendientes para aumento de concentración de 20% SAM ..	45
Figura 6-5. Tiempos de detención para un aumento de concentración de 32% SAM 46	46
Figura 6-6 Sensibilidad de distintas variables sobre el tiempo de detención.	48
Figura 6-7. Sensibilidad pendiente de entrada y salida.	49
Figura 6-8. Sensibilidad concentración media antes de la detención.	50

1. Introducción

El desarrollo de sistemas de transporte hidráulico de pulpas minerales ha demostrado tener indicadores económicos atractivos en comparación con otras alternativas de transporte, tales como correas transportadoras, ferrocarril o camiones, especialmente para movilizar producciones superiores a 1 millón de toneladas de sólidos por año (Ref. [6]). En particular los concentraductos de hierro, tienen condiciones favorables por el carácter fino de la mayoría de las partículas (95% pasante por malla #200) y por la gravedad específica de estas (cercana a 5), además de una alta cantidad de sólidos a transportar (entre 3 y 25 millones de toneladas por año por tubería).

El trabajo consiste en el desarrollo de un predictor que relaciona la variación de la densidad de la pulpa producto de una detención prolongada, en función de las características de la pulpa y de la geometría y pendientes del trazado.

Para el presente trabajo se utilizaron lo antecedentes indicados en la bibliografía, destacándose los registros operacionales ante detenciones prolongadas en las puestas en marcha de los concentraductos estudiados: Hy Grade Pellets en India (Ref. [2]), Da Hong Shan en China (Ref. [3]) y Samarco en Brasil (Ref. [4]), además de registros operacionales de detenciones programadas en el concentraducto de hierro de Minera Hierro Atacama en Chile (Ref. [5]).

1.1. Antecedentes generales

Para una correcta comprensión de los objetivos de este trabajo, se procede a describir de manera general lo que es un sistema de transporte de pulpa a larga distancia, señalando sus componentes básicos y diagrama característico, y posteriormente se presenta los distintos enfoques que se pueden tomar a la hora de considerar aspectos de diseño.

1.1.1. Sistema de Transporte de Pulpas por Tuberías (STP)

Un Sistema de Transporte de Pulpa, en adelante STP, es un sistema de transporte conformado principalmente por una tubería, a través de la cual el fluido se traslada en presión; un estanque (o espesador), donde se almacena el fluido a ser transportado; una o más estaciones de bombeo, que entregan la energía al fluido para su transporte; estaciones de válvulas o de disipación para seccionar o controlar el flujo y presiones; y una estación terminal donde se descarga el fluido. En ocasiones, algunos sistemas cuentan con sistemas de drenaje en puntos bajos especiales. En la Figura 1-1 se muestra un diagrama de un Sistema de Transporte de Pulpa a larga distancia.

Para efectos de este trabajo, se designará como STP a la totalidad del sistema de transporte de pulpa, compuesto por las partes principales mencionadas anteriormente, y se llamará línea a la tubería en sí, que es el componente que lleva efectivamente la pulpa que se desea transportar.

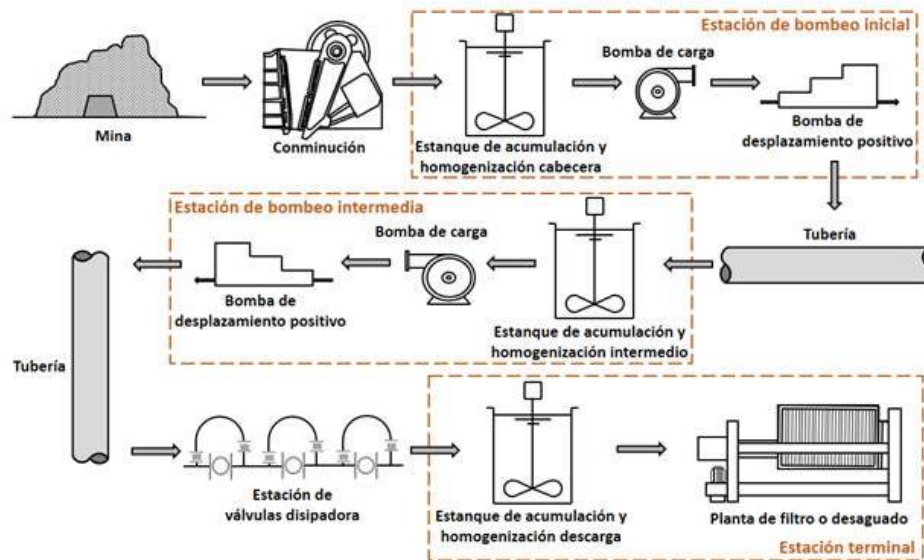


Figura 1-1: Diagrama Esquemático de Componentes de un STP.

1.1.2. Caracterización de las pulpas mineras

Una pulpa, en inglés slurry, es una mezcla de partículas sólidas en un líquido, cuyas características y comportamiento dependen de diversos factores, tales como la concentración de sólidos en la fase líquida, distribución y tamaño de partículas, temperatura, viscosidad dinámica del líquido, entre otras.

Las conducciones de pulpas a largas distancias se ven favorecidas para las puntas con granulometría tal que tenga una mínima cantidad de partículas gruesas. En la minería del hierro y del cobre es donde más extendida está la práctica de transporte de pulpas a largas distancias.

A modo comparativo, respecto al porcentaje de partículas de diámetro mayor a 150 micrones o equivalentemente al porcentaje que queda retenido en la malla ASME #100 (+ #100), los concentrados de Cu o Fe tienen valores inferiores al 1%, mientras que en los relaves de cobre el porcentaje retenido varía entre 10% y 40%, dependiendo del proceso de conminución del mineral.

Respecto a la gravedad específica del sólido, los valores típicos para concentrados de hierro, concentrados de cobre y relaves de cobre son 4.9, 4.2 y 2.7, respectivamente (Ref. [7]).

Las principales características reológicas de estos tres fluidos se muestran en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1: Principales características de pulpas transportadas por tuberías a largas distancias

Indicador	Símbolo	Concentrado de Hierro	Concentrado de Cobre	Relave de Cobre (Convencional)
Retenido Malla ASME #100 (150 Micrones)	+ #100	0,5%	0,5%	10% - 40%
Gravedad específica del sólido	G.E.	4.8 a 5.1	4.0 a 4.4	2.5 a 2.7
Concentración en peso (% p/p)	Cp	65% - 69%	59% - 65%	50% - 59%
Tensión de Fluencia (Pascal)	T	0 - 7	0 - 5	0 - 400
Viscosidad Dinámica (Centipoise)	Mu	3 - 15	5 - 20	5 - 100
Índice de acidez pH	pH	9.5 - 12.0	9.0 - 11.5	9 - 10.5

El presente trabajo se focalizará en los sistemas de transporte de concentrado de hierro, con características que están dentro de lo que se indica en la Tabla 1-1, esperando que trabajos posteriores complementen con los sistemas de transporte de concentrado y relaves de cobre.

En lo sucesivo, se hablará indistintamente de mineroducto o concentrado para referirnos los sistemas de transporte de concentrado de hierro analizados.

1.2. Motivación

Los sistemas de transporte de pulpa de minerales, han demostrado ser una adecuada solución de transporte, especialmente si se logra transportar minimizando el agua, es decir, a altas concentraciones y con los mínimos volúmenes de agua en las bateladas o batches de agua que se envían en ocasiones cuando la producción no cumple con el flujo mínimo seguro para mantener continuidad del transporte de pulpa.

Casos como la minería de Chile y Perú, donde es posible aprovechar la diferencia de altitud entre el nivel de planta y el embarque a nivel del mar, además de producciones de más de un millón de toneladas por año, han motivado a que esta tecnología se haya desarrollado ampliamente en las últimas cuatro décadas. Efectivamente el transporte de concentrados vía camiones tiene un impacto vial y ambiental importante, que se hace más crítico a medida que aumenta la producción de concentrado a desplazar. (Ref. [6]). La opción de mineroductos evita incidentes de carretera, que afecten la seguridad de las comunidades y conductores, además de huelgas comunitarias que podrían paralizar la producción.

No obstante, lo anterior, hay eventos asociados al sistema de transporte de pulpas en largas distancias que hay que solucionar y que dicen relación con la optimización del recurso agua. Para ello se considera, fundamentalmente:

- Materializar un sistema de captación/recuperación y recirculación de agua de filtrado de concentrados
- Permitir la operación con detenciones con pulpa parada en la línea, para evitar transportar batches de agua prolongados y que, además deberán ser recirculados en caso de poseer sistema de recirculación o tratados y descartados, con el importante costo asociado. El presente trabajo se ocupa de esta opción.

Ante una detención muy prolongada de producción, la operación recomendable es transportar agua aprovechando de lavar la conducción y detener con agua en la línea.

Sin embargo, para frecuentes detenciones o descensos de producción por diversas causas, donde se disminuye el stock de concentrado y no se logra el flujo mínimo para transportar sin riesgo de embanque, una operación económica es detener con pulpa en la línea, lo que provocará las variaciones de concentración ya descritas y que si se sobrepasa el tiempo adecuado puede provocar eventos de riesgo importante como los siguientes:

- Requerir una energía no disponible para el re-arranque, debiendo procederse a labores de remoción de embanques muy onerosas, movilizand o equipos portátiles, efectuando calicatas, instalaciones de tuberías by pass u otros, dentro de un ambiente de urgencia debido a que el principal impacto es la detención del envío de concentrado a los destinatarios, frecuentemente comprometidos con antelación. Este evento es mucho más probable en sistemas que no cuentan con bombas de desplazamiento positivo.

- Si se cuenta con energía disponible para remover las pulpas detenidas, se puede sobrepasar las presiones admisibles del sistema, con el riesgo de ruptura de discos y transporte de concentrado a piscinas o la rotura de una tubería en algunas secciones, lo que es más impactante en términos de costos e imagen pública.

Luego, un indicador importante para el diseño es determinar el tiempo máximo de parada con pulpa en la línea, sin poner en riesgo las instalaciones o más específicamente que no implique sobrepresiones superiores a las admisibles, durante el re-arranque.

1.3. Objetivos y alcances

1.3.1. Objetivo general

El objetivo de este trabajo consiste en implementar un predictor, sobre la base de un modelo empírico, del tiempo máximo de parada en concentraductos de hierro.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de este trabajo son los siguientes:

- Analizar la relación entre la variación de la concentración de la pulpa en función del tiempo de parada, las pendientes de la conducción y otras variables cuya correlación se identifique, con datos reales medidos en sistemas de transporte industriales de concentrado de hierro.
- Proponer un predictor para determinar el tiempo máximo de parada en concentraducto, en función de:
 - Distribución de pendientes de la zona donde se tiene la pulpa detenida, especialmente en la convergencia a puntos bajos del trazado.
 - Serie de tiempo de concentración de la pulpa medida a la salida, luego de la detención.
 - Características de la pulpa al ingresar al ducto, antes de la detención
 - Otros aspectos que se identifiquen o descarten
 - Efectuar un análisis de sensibilidad de las variables que influyen en el tiempo máximo de parada.

1.3.3. Alcances

Los alcances de este trabajo consideran el procesamiento de datos industriales capturados en puesta en marcha y/o posteriores en periodo de operación, en los siguientes sistemas de transporte de concentrado de hierro:

- Hy Grade Pellets en el sur de India (desde Kirandul hasta Vishakhapatnam, con una longitud de 260 km en diámetros de 16” y 14”. En adelante **HGP**).
- Da Hong Shan en el sur de China (desde Cassa hasta Anning), con una longitud de 170 km en diámetro de 9”. En adelante **DHS**.
- Minera Hierro Atacama (desde Planta Magnetita hasta Terminal en Punta Totalillo), con una longitud de 120 km en diámetro de 10”. En adelante **MHA**.
- Samarco en Sureste de Brasil (desde Germano hasta Ubú), con una longitud de 400 km en diámetros de 22” y 20”. En adelante **SAM**.

2. Metodología

La metodología para llevar a cabo este trabajo se puede resumir de la manera siguiente:

2.1. Revisión bibliográfica y recopilación de antecedentes

Revisión de los antecedentes necesarios para el trabajo, incluyendo estado del arte en términos de modelación de concentrados y registros de detenciones prolongadas con pulpa.

2.2. Correlación entre las variaciones de la concentración y el perfil

Obtención de resultados, modificación de variables para observar el comportamiento y sensibilidad de éstas.

En cada punto bajo se relaciona el aumento de la concentración con la detención prolongada, a través de las siguientes variables:

- Pendiente media convergente al punto bajo, es decir, la pendiente promedio aguas arriba y aguas abajo del punto bajo respectivo
- Diámetro interno de la tubería
- Concentración de sólidos media antes de la detención
- Tiempo de detención
- Gravedad específica del sólido
- Ángulo de reposo
- Granulometría
- Reología y otras características de la pulpa.

A continuación, se mencionan la definición y los supuestos asociados a las variables de importancia del estudio.

2.2.1. Concentración punto bajo

Se considera la concentración media de sólidos en el punto bajo luego de la detención como la concentración de sólidos medida en el densímetro de descarga del tramo, en el tiempo correspondiente a la razón entre la distancia entre el punto bajo y el densímetro y la velocidad media del flujo luego del arranque. El instrumento que registra y transmite datos (DIT por su sigla en inglés) es fundamental en el procesamiento de datos del presente trabajo.

Esta concentración corresponde a la concentración media de sólidos en un tramo de aproximadamente 110 metros (considerando datos del densímetro cada un minuto y una velocidad media de los mineroductos de hierro de 1,8 m/s).

2.2.2. Pendientes

Se considera como pendiente la razón entre la diferencia de altura y distancia desarrollada entre el punto bajo en estudio y el punto alto adyacente, ya sea entrante al punto bajo (aguas arriba) o saliente al punto bajo (aguas abajo).

Se acostumbra no exceder el 15% de pendiente, con tramos con mayor tolerancia, pero en acotadas longitudes no convergentes a puntos bajos. En todo caso, esta determinación es puramente empírica, y está fuertemente basada en experiencia previa de consultores y diseñadores.

En la Figura 2-1 se aprecia una representación esquemática de la manera en que se determinan las pendientes convergentes a un punto bajo dado, denominado Punto Bajo n .

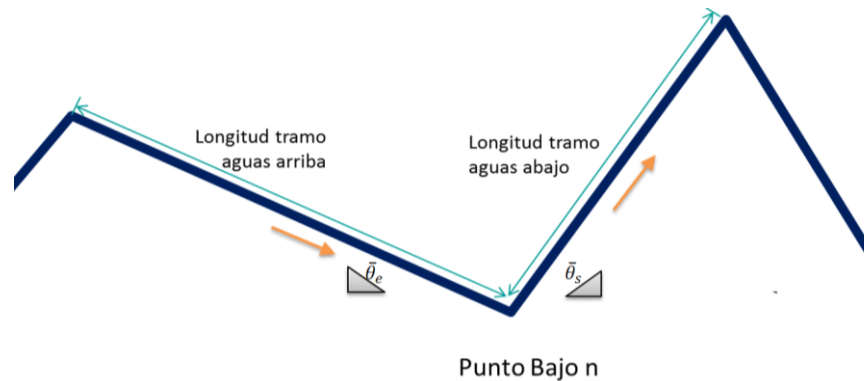


Figura 2-1: Esquema de determinación de pendientes ($\tan \bar{\theta}_e$ y $\tan \bar{\theta}_s$).

2.2.3. Diámetro interno de la tubería

Para el análisis de los datos de los mineroductos, se considerará siempre el diámetro interno de la tubería del tramo correspondiente.

2.2.4. Concentración de sólidos media antes de la detención

Se considera como concentración media antes de la detención el dato reportado por operaciones del mineroducto antes del evento de detención.

2.2.5. Tiempo de detención

Se considera como tiempo de detención el correspondiente al total de tiempo con flujo nulo.

2.2.6. Gravedad específica del sólido

Se considera la gravedad específica de los sólidos la reportada por operaciones del mineroducto, o en caso de no contar con esa información, se considerará la indicada en los criterios de diseño del proyecto en particular.

2.2.7. Ángulo de reposo

El Ángulo de Reposo o Ángulo Crítico de Reposo es el ángulo más pronunciado respecto al plano horizontal, tal que el sedimento está al límite de deslizarse.

El test del ángulo de reposo se utiliza para determinar el comportamiento de la pulpa en caso de una detención (Ref. [9]). Con la tubería puesta a una pendiente de 15% (a $8,5^\circ$ de la horizontal) la pulpa se deja sedimentar por 24 horas. Para los concentraductos estudiados en este trabajo, el perfil de los sólidos depositados resultantes se muestra en la Figura 2-2. En la zona baja de la tubería, la superficie de sólidos depositados es paralela a la tubería, por lo tanto, no hay obstrucción en ella, por lo que este aspecto no será evaluado en el presente trabajo, presentándose para que quede como

guía ante posibles extensiones del estudio a mineroductos de mayores pendientes o cuyo test estandarizado muestre obstrucción de la tubería.

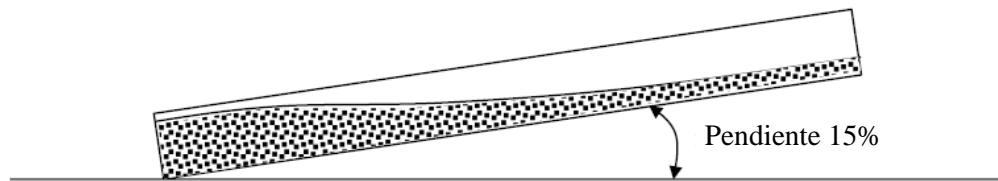


Figura 2-2: Determinación del Ángulo de Reposo

2.2.8. Granulometría

Los mineroductos escogidos para el desarrollo del predictor deberán tener una granulometría típica de los concentrados de hierro, con un diámetro de partículas al menos un 95% bajo la malla #200. Se incorporará a los modelos el tamaño característico d_{85} que es el diámetro que se puede obtener de las curvas granulométricas, sin extrapolar.

2.2.9. Reología

Los mineroductos escogidos para el desarrollo del predictor deberán tener reología similar a los concentrados de hierro, con una viscosidad dinámica entre 3 y 15 cP (3 y 15 mPa·s, respectivamente) y tensiones de fluencia o yield stress entre 0 y 7 Pa. Se utiliza la viscosidad dinámica en el modelo.

2.3. Evaluación y análisis de resultados

Análisis de resultados, niveles de correlación/dispersión y generación de conclusiones.

2.4. Definición del predictor

Para la construcción del predictor se analizan las relaciones entre las principales variables que propician la segregación que provoca el aumento de concentración en los puntos bajos, sobre la base de datos capturados y registrados con un paso de un minuto en los concentraductos de hierro analizados.

2.5. Evaluación de efecto de dispersión de la concentración máxima

La concentración media de sólidos en el punto bajo en el momento del re arranque es registrada por el densímetro de la descarga (como serie de tiempo), por el transporte por advección de las partículas sólidas. Sin embargo, a pesar de que las observaciones de terreno muestran en todos los casos una correspondencia fuerte en la que se identifican los puntos bajos y altos por la variación de la concentración, la turbulencia puede provocar una atenuación de las concentraciones máximas puntuales asociadas a los puntos bajos, lo cual puede acentuarse si los puntos bajos con pulpa detenida se ubican a cientos de kilómetros del registro de densidad en la llegada, luego del re arranque. Este efecto puede ser evaluado utilizando la formulación de dispersión de Taylor (Ref.[10]) y así cuantificar la distancia máxima desde el punto bajo y el densímetro para la cual no

existen efectos considerables de atenuación entre la concentración del punto bajo y la registrada en el densímetro de la descarga.

Para determinar la magnitud de la dispersión de Taylor, se aplica el modelo transporte de masa en tubería, la cual se describe mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + v \frac{\partial \phi}{\partial x} = K \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \quad \text{E. 2.1}$$

Donde

ϕ : Corresponde a la concentración de sólidos

v : Velocidad media en el mineroducto

K : Coeficiente de dispersión

El coeficiente de dispersión turbulenta en una tubería se puede estimar mediante la siguiente expresión (Ref. [10]).

$$K = 10,1 \cdot D \cdot v_* \quad \text{E. 2.2}$$

Donde

D : Diámetro interno de la tubería

v_* : Velocidad friccional definida como:

$$v_* = v \sqrt{\frac{f}{2}} \quad \text{E. 2.3}$$

Donde

f : Factor de fricción

El modelo de dispersión se desarrolla en un esquema de diferencias finitas, donde:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\phi_x^{t+1} - \phi_x^t}{\Delta t}, \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\phi_x^t - \phi_{x-1}^t}{\Delta x}, \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \frac{\phi_{x-1}^t + \phi_{x+1}^t - 2 \cdot \phi_x^t}{\Delta x^2} \quad \text{E. 2.4}$$

Las consideraciones para el cálculo de dispersión son las siguientes:

- Se considera una concentración media de 67%.
- Se considera una velocidad media en la tubería de 1,8 m/s.

- El aumento de concentración tendrá un pick de 75%.
- El paso del bloque de concentrado es de 100 metros.
- La distribución del aumento de concentración tiene una distribución Gaussiana.

Este modelo busca determinar la magnitud del efecto de dispersión en una distancia entre el punto bajo y la medición de densidad registrada. Esto permitirá validar o rechazar dicho dato cuando el efecto de dispersión sea o no relevante.

Las magnitudes de concentración validadas para el estudio deberán tener un efecto de dispersión que disminuya en menos de medio punto porcentual de concentración en peso el valor máximo, según las consideraciones recientemente explicadas.

2.6. Concentración máxima de empaquetamiento

Se considera que el mineroducto puede aumentar su concentración media pero no es conveniente acercarse a la concentración máxima de empaquetamiento para evitar sobrepresiones excesivas en el re-arranque.

La concentración volumétrica máxima de empaquetamiento (c_{vm}) es un valor experimental el que puede tomar valores desde 74% para sedimento cúbico, 68% para esferas según (Ref. [11]), 64% según (Ref. [12]) o 48% para concentrados según (Ref. [13]).

Para el presente estudio se considerará una concentración máxima de empaquetamiento de $c_{vm} = 60\%$. La razón que sustenta esta determinación guarda relación con conocimiento especializado industrial, asociado a una condición crítica exigente para el diseño.

3. Descripción de los concentraductos de hierro analizados

En el marco de este trabajo se analizan 4 concentraductos de mineral de hierro, de los cuales se dispone del trazado del ducto en el terreno, la concentración en la estación terminal en función del tiempo y la granulometría y propiedades reológicas del concentrado. Adicionalmente, se cuenta con los datos de detenciones prolongadas.

A continuación, se describe cada concentraducto, donde se especifica el motivo de la detención y su duración. Posteriormente se realiza una comparación entre las variables relevantes de cada caso, con el fin de obtener una tendencia de comportamiento y determinar el impacto que posee cada una en el tiempo de detención máximo tolerado por el sistema.

3.1. Hy-Grade Pellets de India (HGP)

Hy-Grade Pellets Ltd. (HGP) ordenó la construcción del concentraducto de hierro cuyo sistema fue diseñado para transportar anualmente 7 millones de toneladas por año (7 MTPA) desde Bailadila, en el estado de Chaitisgarh en India, hacia el puerto de Vishakhapatnam (Vizag), ubicado a 265 km al sudeste de Bailadila. En la Figura 3-1 se muestra un esquema del trazado de la conducción.

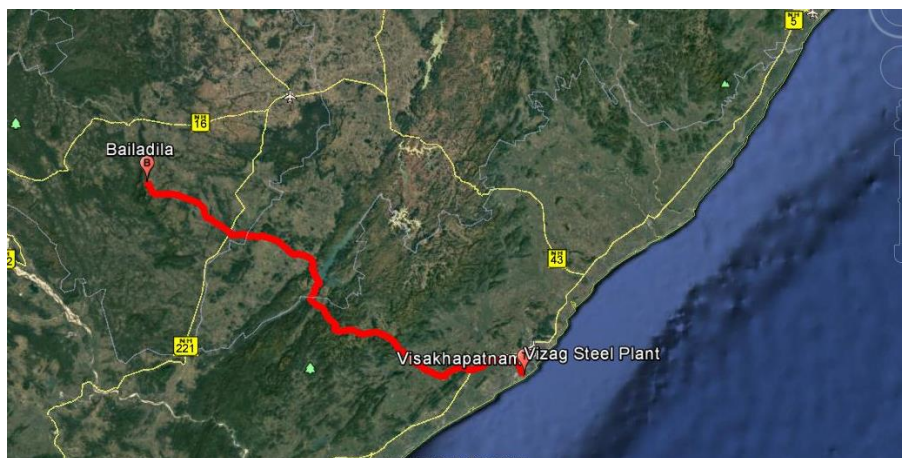


Figura 3-1 Ubicación geográfica del trazado conducción HGP.

3.1.1. Descripción general del sistema HGP

El sistema está diseñado para operar con un flujo de 620 m³/h, con un rango una producción de 870 tph.

La tubería del sistema de impulsión, que consta de secciones de 14” y 16” de diámetro exterior, fue diseñada para transportar concentrado de mineral de hierro, producido desde depósitos locales de alto grado a una elevación de 613 m.s.n.m., hasta el puerto emplazado a 2,6 m.s.n.m. Para la impulsión del concentrado se utiliza una estación de bombeo principal (PS1) ubicada en el kilómetro 0 y una estación *booster* intermedia (PS2) en el kilómetro 114,3.

Existen adicionalmente dos estaciones de monitoreo en los puntos altos de la tubería, emplazados en el kilómetro 101,6 (SF1) y kilómetro 178,2 (SF2), cuya función es controlar la presencia de cortes de columna entre el segmento PS1 - PS2, y entre el segmento PS2 – Estación Terminal (TS),

respectivamente. Por su parte, la estación de válvulas (VS1) se ubica luego de una fuerte pendiente descendente para disipar energía y disminuir la presión en el tramo VS1 – TS.

En la Figura 3-2 se muestra el perfil de elevaciones del sistema de impulsión de Bailadila-Vizag, donde es posible apreciar la ubicación de las estaciones de bombeo PS1 y PS2, de las estaciones de monitoreo SF1 y SF2, de la estación de válvulas VS1 y de la estación terminal TS. También se puede observar el perfil piezométrico con las presiones típicas en operación normal de HGP.

Figura 3-2 Perfil de elevación del trazado conducción HGP

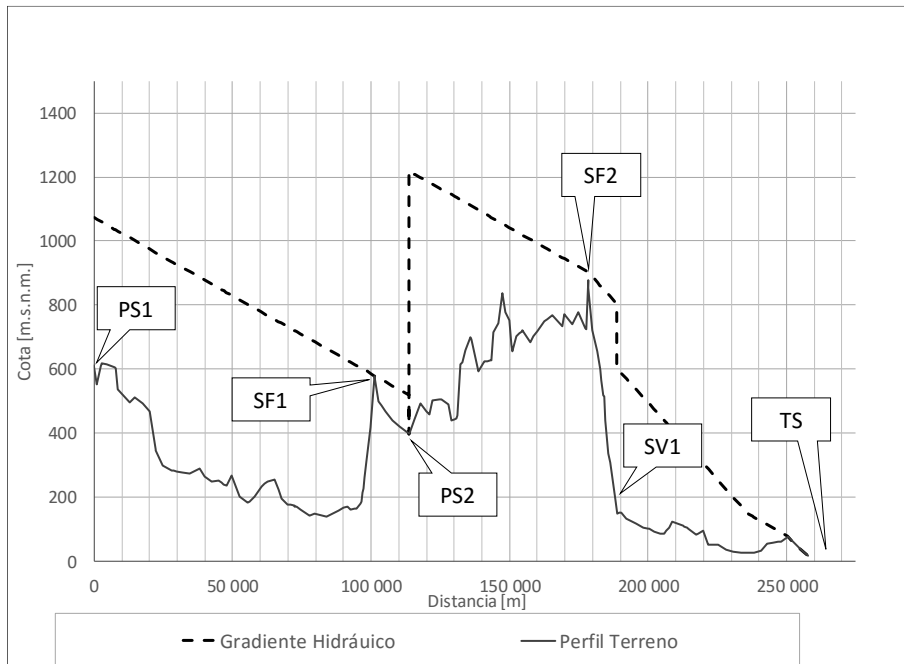


Figura 3-3 Perfil de elevación del trazado conducción HGP.

3.1.2. Característica del concentrado de hierro HGP

El concentrado de hierro transportado posee una gravedad específica de diseño de aproximadamente 2,2, teniendo en cuenta la gravedad específica de sólidos de 5,05, una concentración de sólidos en peso que fluctúa entre 64% y 69% y un diámetro característico $d_{85} = 53 \mu\text{m}$.

En la

Tabla 3-1 se muestra la distribución de tamaño de partículas, que define la granulometría del concentrado, mientras que en la Figura 3-3 se muestra su representación gráfica.

Tabla 3-1 Distribución de tamaño de partículas del concentrado de hierro HGP.

Malla de Tyler		Porcentaje pasante (%)
Malla	Micrones	
70	212	99,8
100	150	99,5
150	105	98,5
200	75	95,0
270	53	85,0
325	45	80,0

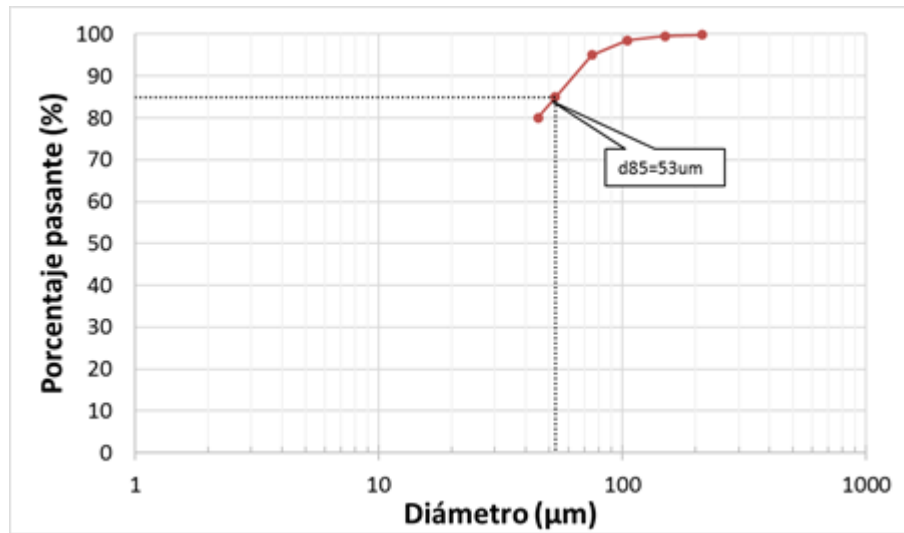


Figura 3-3 Granulometría del concentrado de hierro HGP.

3.2. Da Hong Shan de China (DHS)

3.2.1. Descripción general del sistema DHS

El mineroducto de hierro Da Hong Shan (DHS), perteneciente a la compañía Kunming Iron & Steel Corporation, transporta 2,3 millones de toneladas por año (2,3 MTPA) de concentrado de hierro, a través de una longitud de 171 Km desde la localidad de la mina Da Hong Shan hasta el terminal de Anning, en la Provincia de Yunnan en el sur de China. En la Figura 3-4 se muestra un esquema del trazado de la conducción.

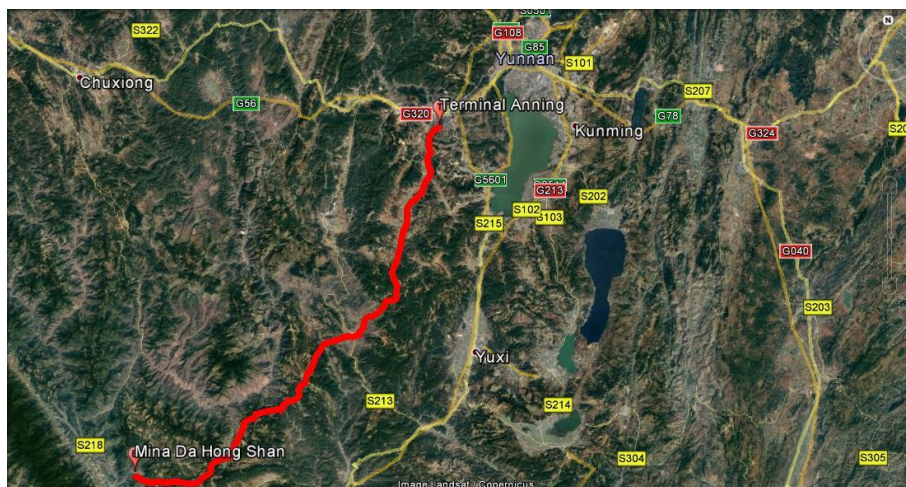


Figura 3-4 Ubicación geográfica del trazado conducción DHS.

El mineroducto tiene un diámetro nominal de 9", cuenta con 3 estaciones de bombeo (PS1, PS2 y PS3), 3 estaciones de medición de presión (PMS1, PMS2 y PMS4) y la estación terminal (TS). El perfil longitudinal de la tubería y las estaciones mencionadas se muestran en la Figura 3-5. También se puede observar el perfil piezométrico con las presiones típicas en operación normal de DHS.

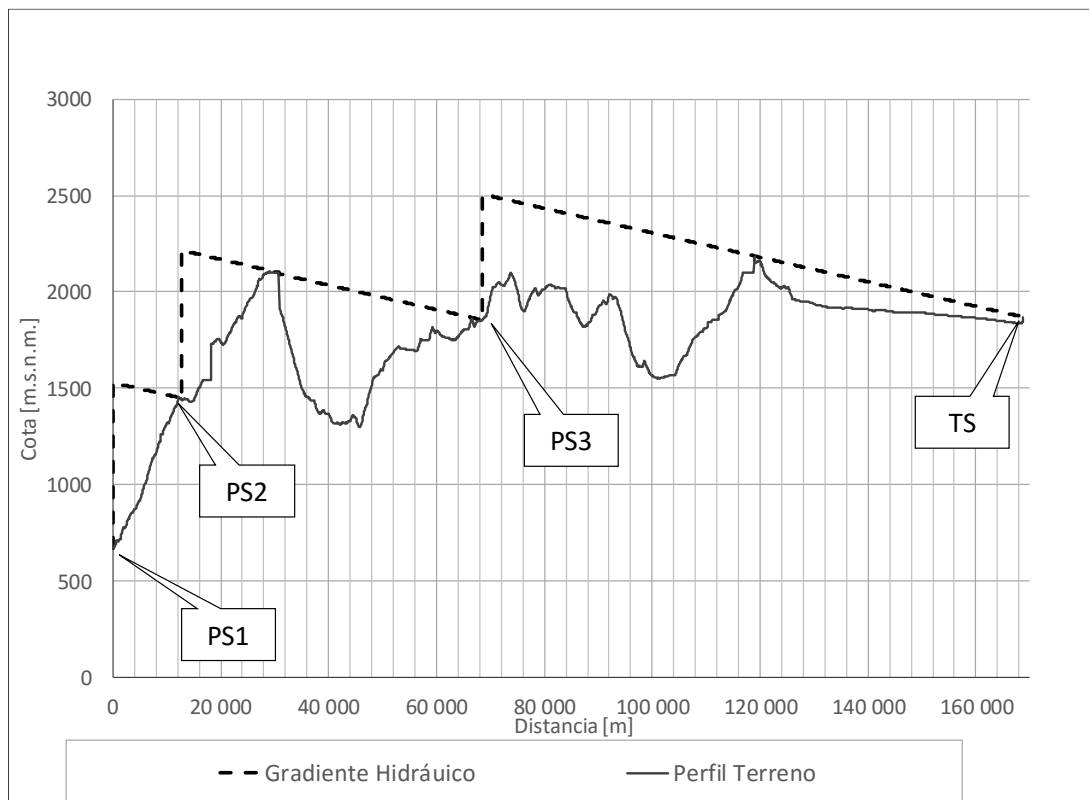


Figura 3-5 Perfil de elevación trazado DHS.

3.2.2. Característica del concentrado de hierro DHS

El concentrado de hierro transportado posee una gravedad específica de diseño de aproximadamente 2,1, teniendo en cuenta la gravedad específica de sólidos de 4,63, una concentración que fluctúa entre 64% y 66% y un diámetro característico $d_{85} = 45 \mu\text{m}$.

En la Tabla 3-2 se muestra la distribución de tamaño de partículas, que define la granulometría del concentrado, mientras que en la se muestra su Figura 3-6 representación gráfica.

Tabla 3-2 Distribución de tamaño de partículas del concentrado de hierro DHS.

Malla de Tyler		Porcentaje pasante (%)
Malla	Micrones	
100	150	99,5
150	105	98,2
200	75	95,4
270	53	88,5
325	45	85,0

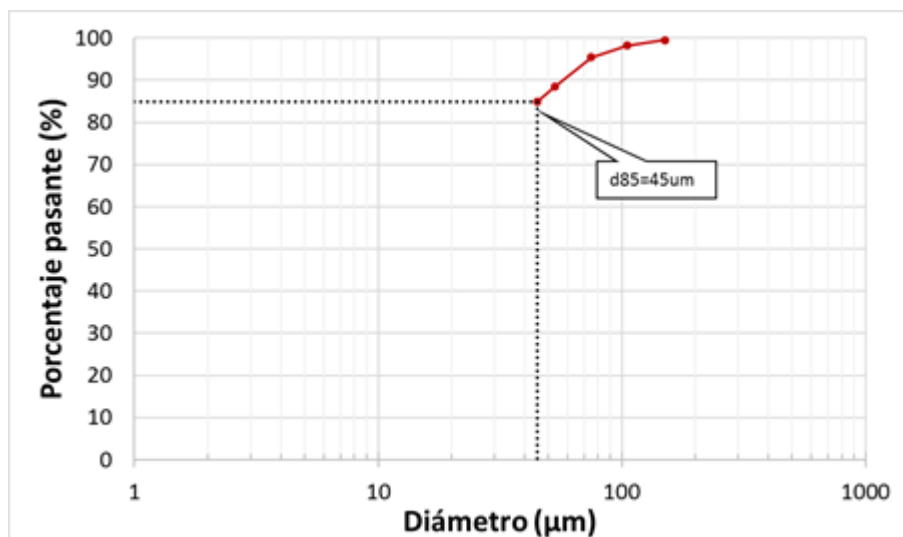


Figura 3-6 Granulometría del concentrado de hierro DHS.

3.3. Minera Hierro Atacama (MHA)

El concentrado de la Minera Hierro Atacama (MHA) cuenta con un concentrado de hierro diseñado para transportar anualmente 3,6 millones de toneladas por año (3,6 MTPA), desde la planta de Magnetita en la localidad de Tierra Amarilla, hacia la Estación Terminal en Punta Totalillo. En la Figura 3-7 se muestra un esquema del trazado de la conducción.

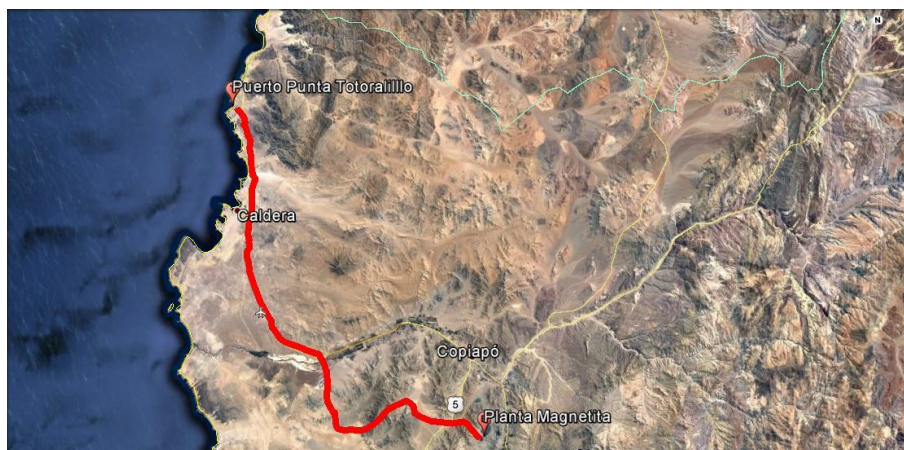


Figura 3-7 Ubicación geográfica del trazado conducción MHA.

3.3.1. Descripción general del sistema MHA

El mineroducto de hierro de MHA cuenta con una longitud total de 117,8 km de tubería acero al carbono API 5L X 65 de diámetro nominal variable entre 9” y 10”. El trazado contempla las siguientes obras anexas:

- Estación de bombeo (EB1), ubicada en el inicio del trazado, que cuenta con 2 Bombas de desplazamiento positivo (1 operando y 1 en stand by) y sus bombas de precarga respectivas.
- Estación de monitoreo (SM1), ubicada en el punto alto del kilómetro 1,99.
- Estación de válvulas (VS1), ubicada en el kilómetro 52 encargada de la regulación del flujo.
- Estación terminal (TS1) ubicada en el kilómetro 117,8, encargada de disipar energía para mantener presurizada la conducción, recibir el flujo y conducirlo a puerto.

La Figura 3-8 muestra el perfil longitudinal y las instalaciones mencionadas del mineroducto MHA. También se puede observar el perfil piezométrico con las presiones típicas en operación normal de MHA.

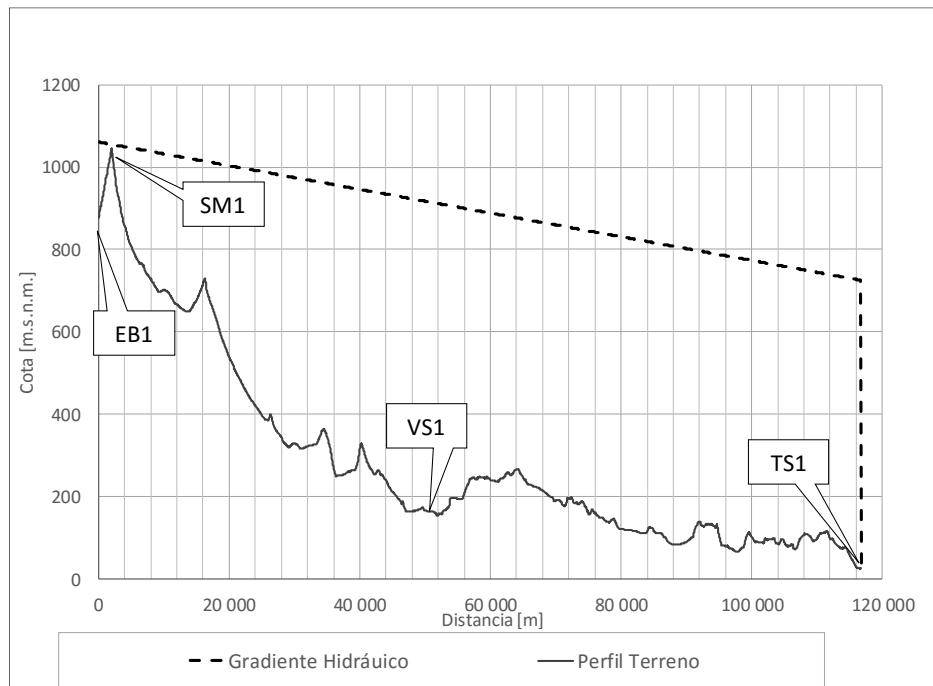


Figura 3-8 Perfil longitudinal mineroducto MHA.

3.3.2. Característica del concentrado de hierro MHA

El concentrado de hierro transportado posee una gravedad específica de diseño de 5, una concentración de sólidos de diseño de 67% y un diámetro característico $d_{85} = 49 \mu\text{m}$. (ver Tabla 3-3 y Figura 3-9).

Tabla 3-3 Distribución de tamaño de partículas del concentrado de hierro en MHA

Malla de Tyler		Porcentaje pasante (%)
Malla	Micrones	
100	150	99,7
150	105	99,1
200	75	96,5
270	53	89,5
325	45	80,9

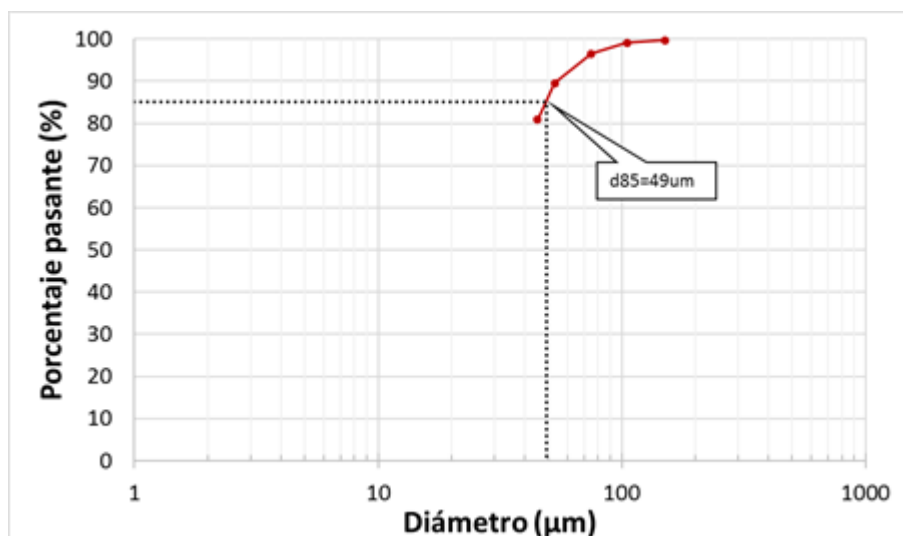


Figura 3-9 Curva Granulométrica Mineral MHA.

3.4. Samarco de Brasil (SAM)

Samarco S.A. implementó el tercer mineroducto para transporte de pulpa de concentrado de hierro, con una extensión de 400,7 km, para transportar 20 millones de toneladas por año de mineral de hierro de la Mina de propiedad del municipio de Mariana, en el estado de Minas Gerais, Brasil, para el Terminal de Ponta Ubú, en el estado de Espírito Santo, Brasil. En la Figura 3-4 se muestra un esquema del trazado de la conducción.

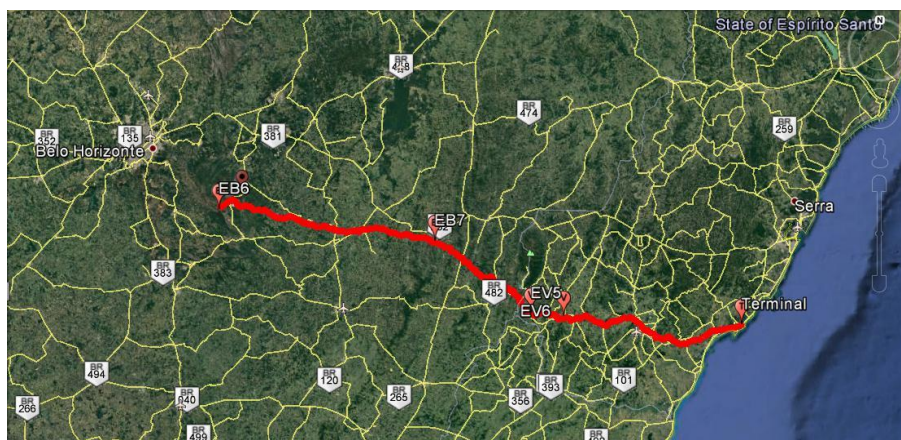


Figura 3-4 Ubicación geográfica del trazado conducción SAM.

3.4.1. Descripción general del sistema SAM

El sistema fue diseñado para operar con un flujo de $1.492 \text{ m}^3/\text{h}$, con un rango de operación de concentración de sólidos entre 64% y 70% en peso. Considerando la gravedad específica de diseño de sólidos de 4,87, se obtiene una producción de 2.354 tph.

El mineroducto se extiende por 400,7 km desde la planta concentradora de Germano hasta el Terminal Ubú, consta de una tubería de diámetro nominal de 22", salvo un tramo de 20" entre los km 245 y 335. Se compone de dos estaciones de bombeo EB6 y EB7, ubicadas en los kilómetros 0 y 156,2 respectivamente y dos estaciones de válvulas EV5 y EV6.

En la Figura 3-5 se muestra el perfil de elevaciones del sistema de impulsión del tercer concentraducto de Samarco, donde es posible apreciar la ubicación de las estaciones de bombeo, las estaciones de válvulas y la estación terminal. También se puede observar el perfil piezométrico con las presiones típicas en operación normal de SAM.

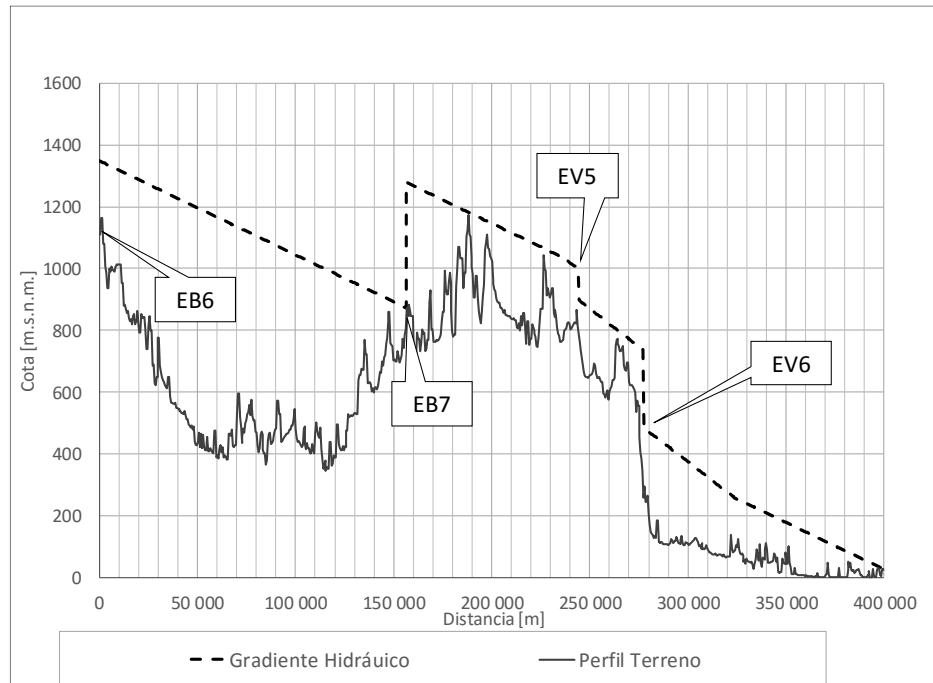


Figura 3-5 Perfil de elevación trazado tercer concentraducto SAM.

3.4.2. Característica del concentrado de hierro SAM

El concentrado de hierro transportado posee una densidad de diseño de $2,25 \frac{\text{Ton}}{\text{m}^3}$, la gravedad específica de sólidos de 4,87, concentración de sólidos en peso de diseño es de 70% y un diámetro característico $d_{85} = 46 \mu\text{m}$.

En la

Tabla 3-4 se muestra la distribución de tamaño de partículas, que define la granulometría del concentrado, mientras que en la Figura 3-6 se muestra su representación gráfica.

Tabla 3-4 Distribución de tamaño de partículas del tercer concentrado de SAM.

Malla de Tyler		Porcentaje pasante (%)
Malla	Micrones	
70	212	99,8
100	150	99,6
200	75	97,2
270	53	90,6
325	45	83,8

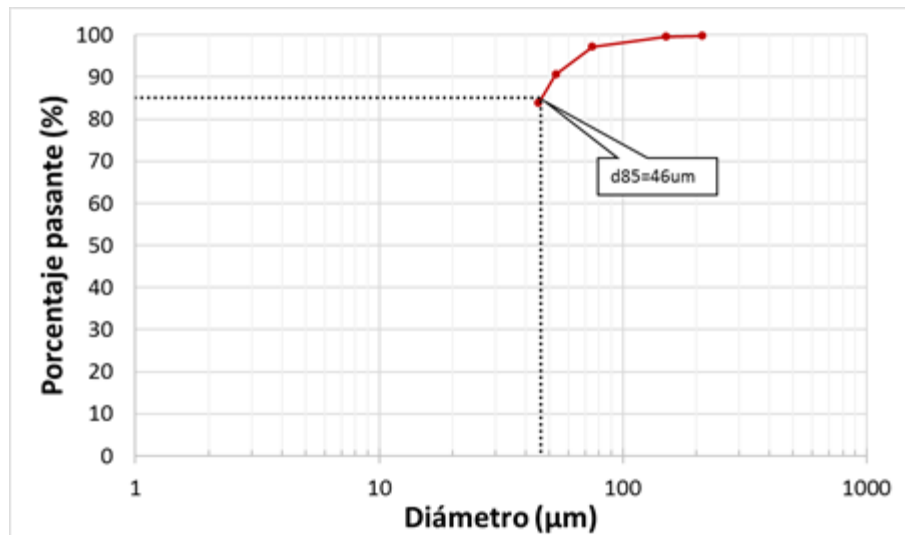


Figura 3-6 Granulometría del concentrado de hierro SAM.

3.5. Resumen de principales características de los mineroductos analizados

En la Tabla 3-5 se resume las principales características de los mineroductos y su detención a analizar, las que se utilizan junto a lo indicado en la lista del Anexo A, para el procesamiento de datos de la sección 4.

Tabla 3-5 Principales características de los mineroductos analizados.

Característica	Unidades	HGP	DHS	MHA	SAM
Diámetro	(")	14 (*)	9	10	22 (**)
Gravedad específica de sólidos	-	5,05	4,63	4,5	4,87
Concentración de sólidos en peso antes de la detención	%	64,3	65,5	63	66
Duración de detención	h	22	8	22,2	88
Porcentaje pasante bajo 74 micrones (-#200)	%	95	95,4	96,5	96,5
Kilometraje punto bajo crítico	Km	1,1	45,8	25,9	64,5
Pendiente entrante punto bajo crítico	%	5,9	5,9	3,6	9,6
Pendiente saliente punto bajo crítico	%	4	9,8	3,3	7,8

(") Unidad de pulgadas, del diámetro nominal del ducto donde se detuvo la pulpa de concentrado de hierro.

(*) El mineroducto HGP tiene un tramo en 16", pero no tuvo pulpa detenida en dicha sección, durante el evento estudiado. La detención se produjo en el tramo de 14".

(**) El mineroducto SAM tiene un tramo en 20", pero no tuvo pulpa detenida en dicha sección, durante el evento estudiado. La detención se produjo en el tramo de 22".

4. Procesamiento de Datos de las detenciones

En las secciones 4.1, 4.2, 4.3 correspondientes a los casos de la India (HGP), China (DHS) y Chile (MHA), se disponen los antecedentes para la construcción del modelo, mientras que en la sección 4.4, correspondiente al caso de Brasil (SAM), se justifica el uso de los antecedentes del Mineroducto de SAMARCO y una detención de 88 horas para la validación del modelo, dado que, en este último caso se cuenta con registros operacionales de un re-arranque exitoso pero no se dispone de datos confiables de los registros de densidad en la llegada de la pulpa que estuvo detenida.

4.1. Hy-Grade Pellets de India (HGP)

En el concentraducto HGP se cuenta con registros de datos cada 1 minuto del densímetro de descarga y también de las características geométricas de la conducción y de la pulpa detenida (Ref. [2]), lo que permite junto a los datos de los concentraductos DHS y MHA, construir el modelo predictor de la sección 5, el que relaciona el aumento de la concentración en los puntos bajos con algunas características geométricas de la conducción y de la calidad de la pulpa detenida. El resumen de datos se muestra en el Anexo A.

La detención estudiada en este trabajo corresponde a la que ocurrió el día 19 de septiembre de 2005, durante una operación de *batch*, en la que se impulsa agua y concentrado de manera alternada. Hubo un corte de energía de 22 horas en la estación *booster* PS2, quedando concentrado de hierro detenido entre las estaciones SF2 y TS.

El *batch* de concentrado tenía una duración de 14 horas, es decir, se impulsa concentrado por 14 horas seguidas y luego se impulsa agua, lo que es equivalente a 86 kilómetros de tubería con concentrado de hierro. El cálculo anterior considera el flujo de diseño de 620 m³/h. En la Figura 4-1 en verde se aprecia el tramo asociado al batch de concentrado.

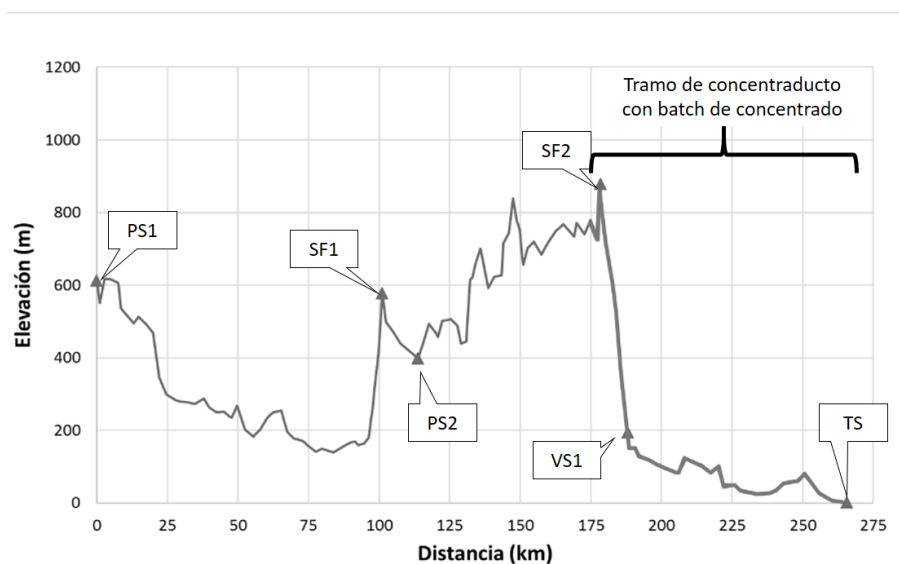


Figura 4-1 Tramo con batch de concentrado detenido HGP.

En la estación terminal TS se ubica un densímetro que muestra la densidad que presenta el fluido al llegar a dicha estación. Luego de la restauración de la energía eléctrica, fue posible restituir la distribución de la densidad del concentrado en función del tiempo y asociarlo a un kilometraje

específico. La Figura 4-2 muestra dicha distribución, donde se señala la densidad media del concentrado. Adicionalmente se muestra los puntos altos y puntos bajos de la gráfica, asociados a puntos bajos y puntos altos de terreno, respectivamente.

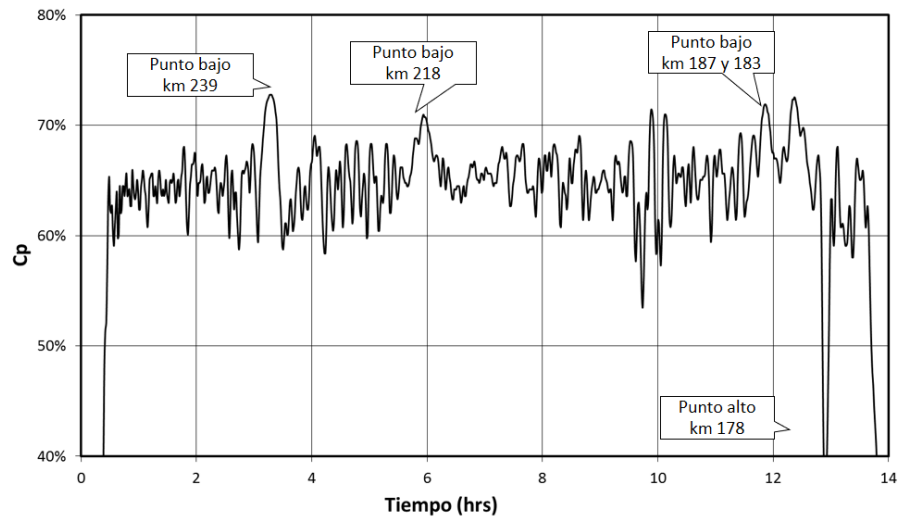


Figura 4-2 Distribución de densidad en re-partida, en la descarga HGP.

Es posible notar que en los puntos bajos del terreno se observa una mayor concentración de mineral de hierro debido a la migración gravitatoria axial y, de la misma manera, esto genera una menor concentración de mineral de hierro en los puntos altos del terreno.

La Figura 4-3 muestra la superposición del perfil longitudinal del terreno en el cual se detuvo el Batch de concentrado y la concentración de sólidos estimada antes del re-arranque mediante la metodología ya descrita.

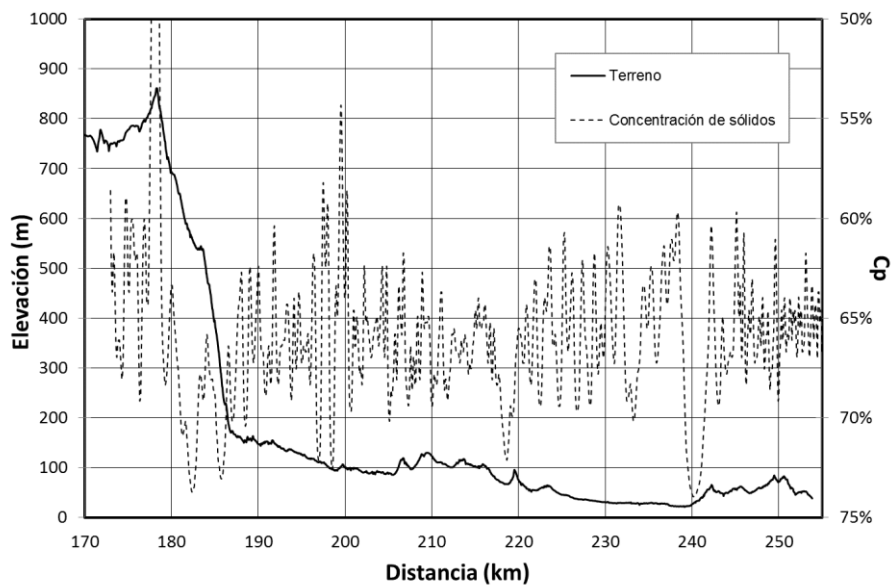


Figura 4-3 Perfil longitudinal y variación en la concentración de sólidos minerproducto HGP.

El modelo de dispersión muestra que los peak de concentración, para una velocidad media de 1,8 m/s, un peak de concentración de 72% y una longitud recorrida entre el punto bajo y el densímetro de 85 km se ve alterado menos de medio punto de concentración ($\Delta c_p < 0,5\%$), como muestra la Figura 4-4 (0,2%). Esto indica que es posible validar los datos del densímetro en la totalidad del tramo donde se reportó la detención del batch de concentrado.

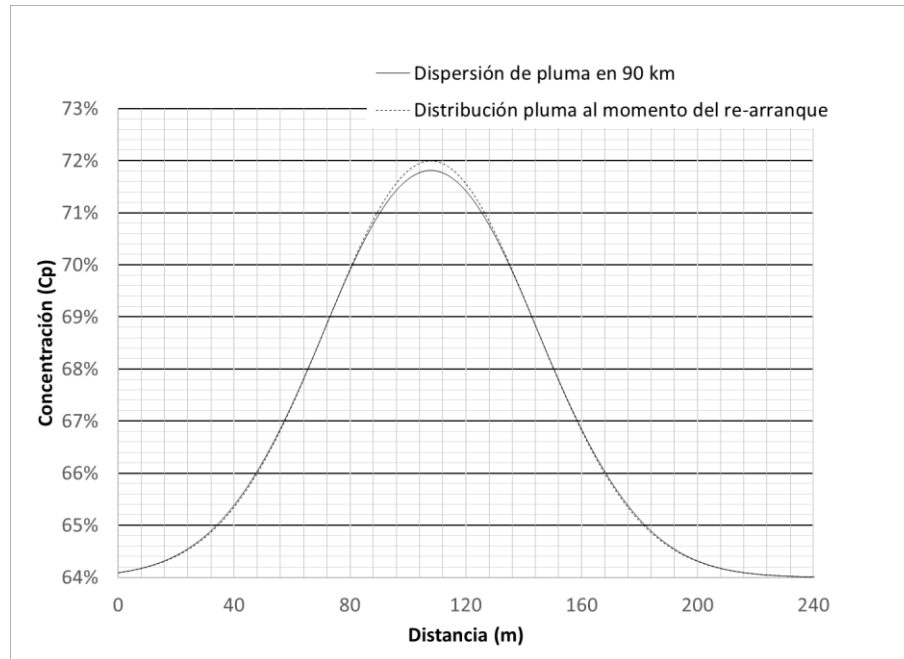


Figura 4-4 Dispersión HGP luego de 85 Km.

4.2. Da Hong Shan de China (DHS)

En el concentraducto DHS se cuenta con registros de datos cada 1 minuto del densímetro de descarga y también de las características geométricas de la conducción y de la pulpa detenida (Ref. [3]), lo que permite junto a los datos de los concentraductos HGP y MHA, construir el predictor de la sección 5. El resumen de datos se muestra en el Anexo A.

La detención estudiada en este trabajo corresponde a la que ocurrió el día 7 de marzo de 2016, durante una operación de *batch*, en la que se impulsa agua y concentrado de manera alternada. Esta detención ocurrió durante el comisionamiento de la línea en el tramo de PS1 a PS3. Se consideró el tramo PS2-PS3 por tratarse del tramo con los puntos bajos más representativos como muestra la Figura 4-5.

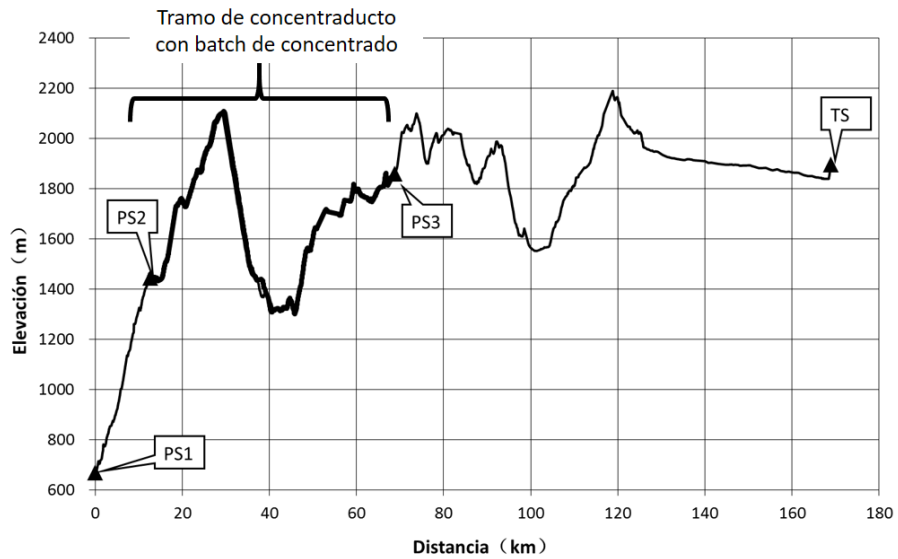


Figura 4-5 Perfil longitudinal y tramo con batch de concentrado detenido DHS.

En la estación terminal PS3 se ubica un densímetro que muestra la densidad que presenta el fluido al llegar a dicha estación. Durante el re arranque del mineroducto se registró la densidad de la pulpa transportada, la que puede ser relacionada con la concentración de sólidos, como lo muestra la Figura 4-6. Adicionalmente se muestra los valores máximos de concentración correlacionados con los puntos bajos principales.

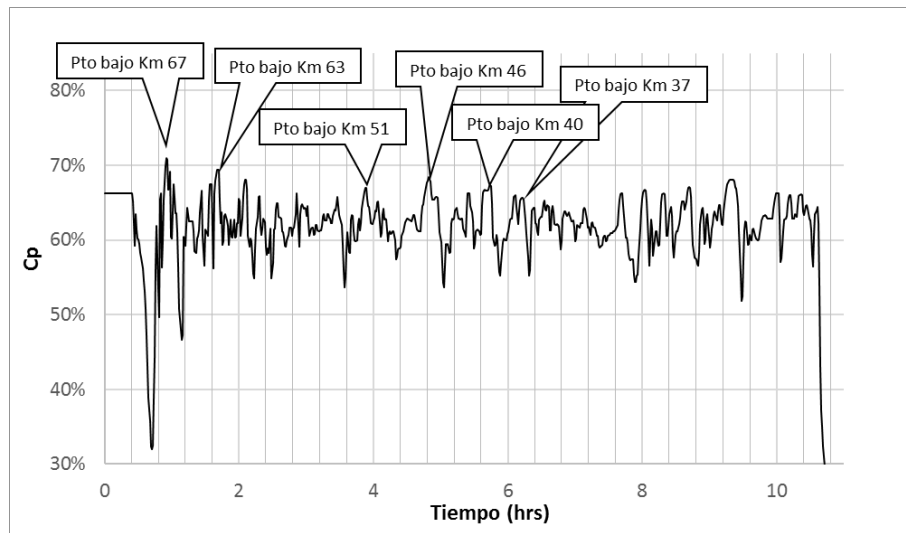


Figura 4-6 Distribución de concentración en re-arranque, en la descarga DHS.

Es posible notar que en los puntos bajos del terreno se observa una mayor concentración de mineral de hierro debido a la migración gravitatoria. De la misma manera, esto genera una menor concentración de mineral de hierro en los puntos altos del terreno. La Figura 4-7 muestra superpuestos el perfil de terreno y la concentración de sólidos estimada en los puntos bajos durante la detención del concentrado.

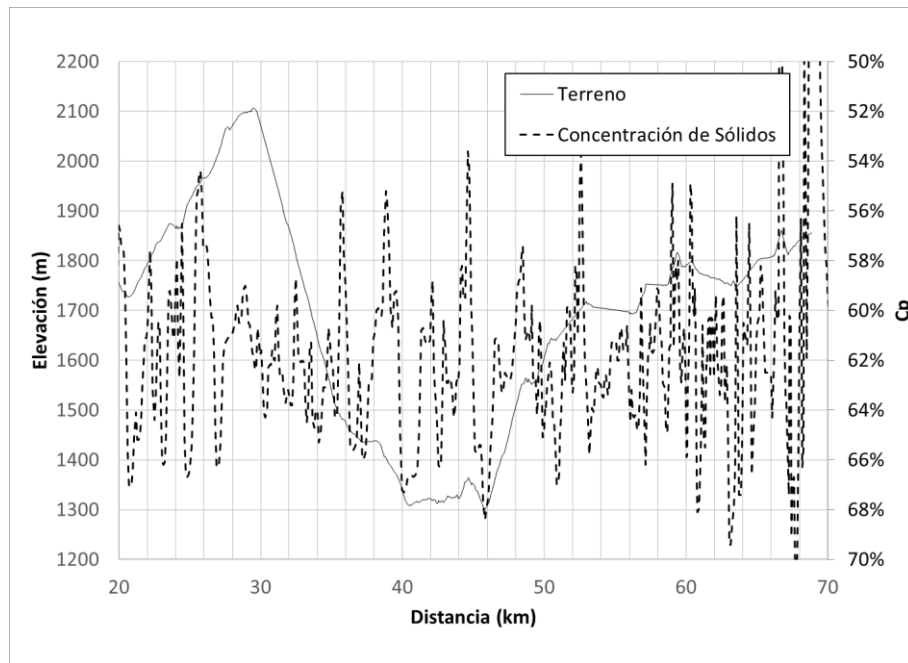


Figura 4-7 Perfil longitudinal y concentración de sólidos mineroducto DHS.

El modelo de dispersión muestra que los peak de concentración no son afectados de manera importante en distancias menores a 142 km, entre el punto bajo y el densímetro, como muestra la Figura 4-8 (0,1%). Esto indica que es posible validar los datos del densímetro en la totalidad del tramo donde se reportó la detención del Batch de concentrado.

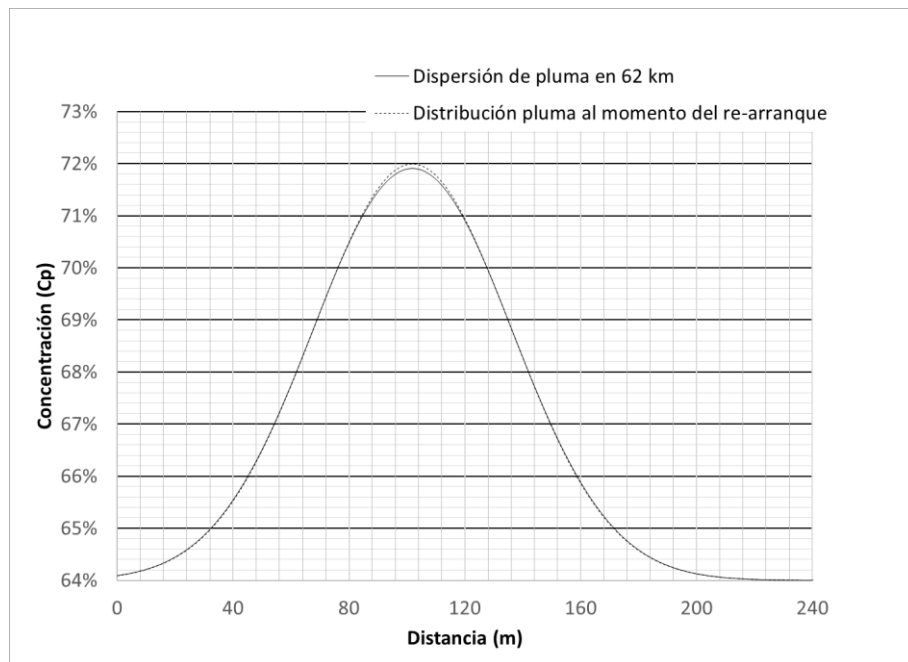


Figura 4-8 Dispersión DHS luego de 62 Km

4.3. Minera Hierro Atacama (MHA)

En el concentraducto MHA se cuenta con registros de datos cada 1 minuto del densímetro de descarga y también de las características geométricas de la conducción y de la pulpa detenida (Ref. [4]), lo que permite junto a los datos de los concentraductos HGP y DHS, construir el predictor de la sección 5. El resumen de datos se muestra en el Anexo A.

La detención estudiada en este trabajo corresponde a la detención completa del mineroducto el día 03-02-2017 a las 15:00 hasta el 04-02-2017 a las 13:12 (22,2 horas de detención).

La concentración media antes de la detención del mineroducto fue de 63%, con una densidad del sólido de 4,5.

Se cuenta con los datos del densímetro y flujómetro en la terminal TS1 durante las 20 horas desde el reinicio de las operaciones (ver Figura 4-9).

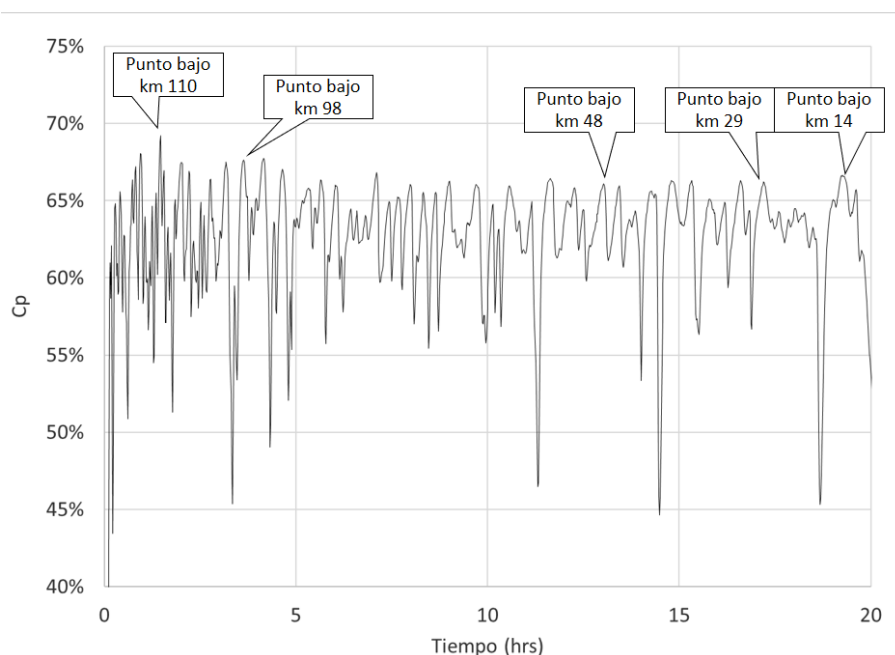


Figura 4-9 Concentración de sólidos en descarga luego de 22 horas de parada MHA.

Al igual que en los dos mineroductos anteriores, se observa una mayor concentración de mineral de hierro debido a la migración gravitatoria, y de la misma manera, esto genera una menor concentración de mineral de hierro en los puntos altos del terreno. La Figura 4-10 muestra superpuestos el perfil de terreno y la concentración de sólidos estimada en los puntos bajos durante la detención del concentraducto.

El modelo de dispersión muestra que los peak de concentración no son afectados de manera importante en distancias de 117 km entre el punto bajo y el densímetro, como muestra la Figura 4-11 (0,2%). Esto indica que es posible validar los datos del densímetro en la totalidad del tramo donde se reportó la detención del Batch de concentrado.

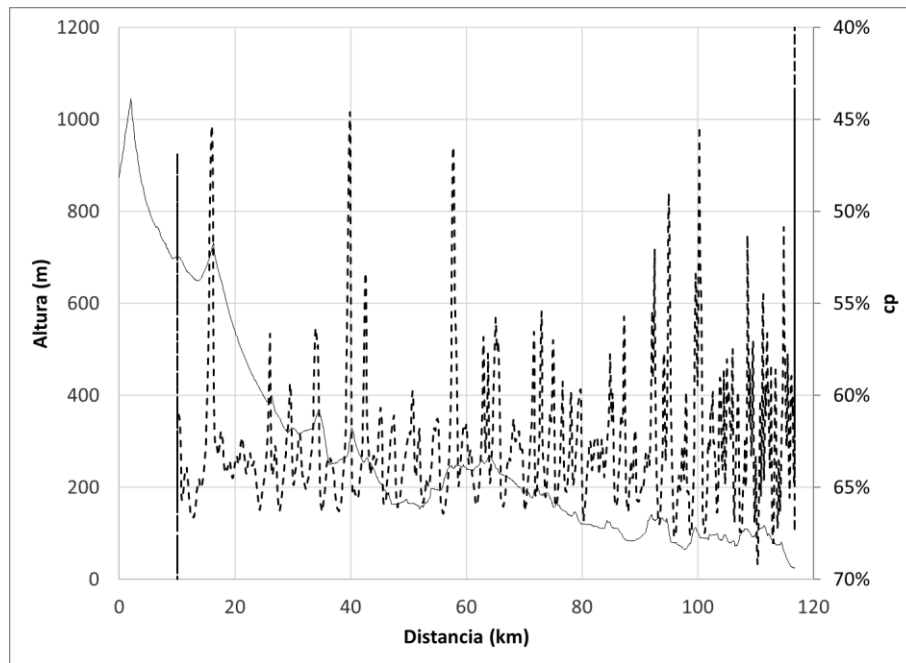


Figura 4-10 Perfil longitudinal y concentración de sólidos mineroducto MHA.

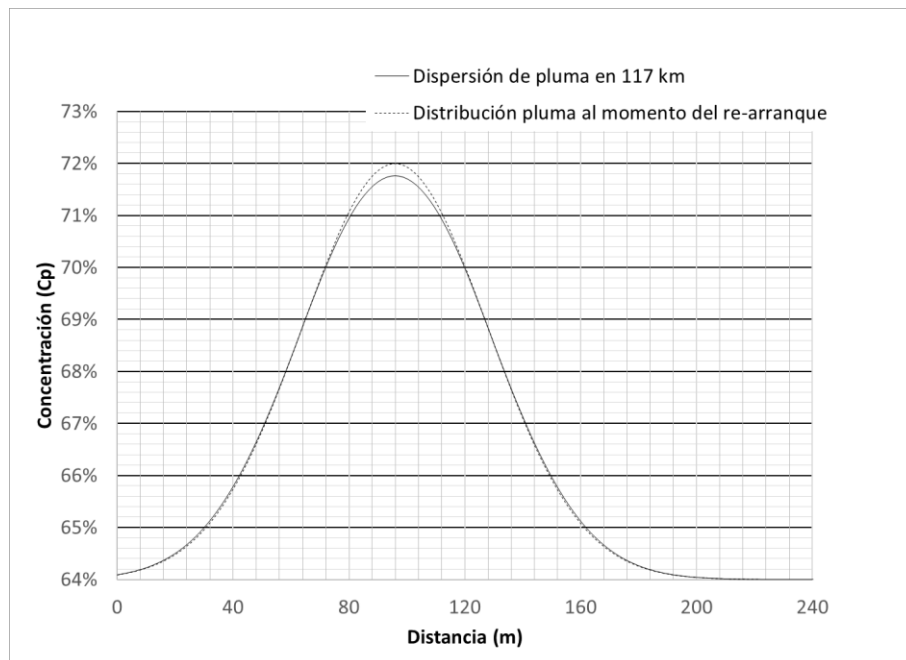


Figura 4-11 Dispersión MHA luego de 117 Km.

4.4. Samarco de Brasil (SAM)

En el concentrado SAM no se cuenta con registros de datos cada 1 minuto del densímetro de descarga, pero si con las características geométricas de la conducción y de la pulpa detenida por 88 horas (Ref. [5]). Con los datos de SAM se valida el predictor de la sección 5, construido sobre la base de datos completa de los Mineroductos HGP, DHS y MHA.

En la Puesta en Marcha del tercer mineroducto de Samarco (SAM) se reportó una detención prolongada del mineroducto el día 09-04-2014, en donde un batch de concentrado de hierro de $c_p = 66\%$ se mantuvo detenido entre los kilómetros 40 y 116 durante 88 horas. Este Batch fue reimpulsado hacia la estación aguas abajo (Estación Intermedia EB7), sin inconvenientes luego de las 88 horas de detención.

No se cuenta con los datos del densímetro de descarga del mineroducto (DIT de EB7) al momento del re-arranque de la operación. No obstante, se utilizará el modelo de la sección 6 para validar el predictor para aumento de concentración, considerando el aumento referencial de 20% y el análisis de tiempo para concentración de empaquetamiento, además de realizar el análisis de sensibilidad y la discusión de los fenómenos ocurridos con esta detención prolongada.

5. Desarrollo de Predictor

5.1. Análisis dimensional

Los datos de los mineroductos obtenidos son caracterizados identificando los puntos bajos y caracterizándolos por parámetros geométricos de la conducción asociados a estos puntos bajos y por las características de la pulpa que se detuvo:

- Diámetro de tubería
- Pendiente aguas arriba o entrante
- Pendiente aguas abajo o saliente
- Concentración media antes de la detención
- Concentración máxima registrada por el densímetro
- Densidad de los sólidos
- Granulometría de la pulpa
- Viscosidad de la pulpa

Cabe destacar que el rango de validez de las formulaciones, dicen relación con la magnitud de los datos utilizados y mostrados en la Tabla 3.5.

Se considera que la concentración máxima en el punto bajo es proporcional la masa de sedimento que se desplaza hacia el punto bajo, lo que se puede expresar mediante la expresión E. 5.1:

$$\sum_{i=e,s} M_i \sim \sum_{i=e,s} v_i \cdot A \cdot t \cdot \bar{c}_v \quad \text{E. 5.1}$$

Donde

M_i : Parámetro que representa la masa de sedimento desplazada hacia el punto bajo

A : Sección de la tubería = $\pi \frac{D^2}{4}$

D : Diámetro interno de la tubería

v_i : Velocidad media del bloque del sedimento hacia el punto bajo

t : Tiempo de detención del concentrado

\bar{c}_v : Concentración volumétrica media de sólidos

e : agua arriba o entrante al punto bajo

s : agua abajo o saliente del punto bajo

Durante la detención, la velocidad del bloque del sedimento hacia el punto bajo (v_i) se considera proporcional al seno del ángulo (θ_i), a la gravedad (g), al cuadrado del diámetro de la partícula (d^2) e inversamente proporcional a la viscosidad cinemática (ν), en forma similar a la

sedimentación de una partícula en una caída por un ángulo inclinado, de acuerdo a la expresión de Stokes para partículas de tamaño pequeño (del orden de 50 micrones y menores) y que es aplicable a concentrados de hierro (ver expresión E. 5.2).

$$v_i \sim \frac{1}{18} \cdot \frac{g \cdot d^2 \cdot (S - 1) \cdot \text{sen}\theta}{\nu} \quad \text{E. 5.2}$$

Se define el parámetro adimensional \hat{M} que representa la cantidad de sedimentos acumulada en el punto bajo

$$\hat{M} = \sum_{i=e,s} \frac{g \cdot d^2 \cdot (S - 1) \cdot A \cdot t \cdot \bar{c}_v \cdot \text{sen}\theta}{\nu \cdot A \cdot D} \quad \text{E. 5.3}$$

$$\hat{M} = \frac{t \cdot \bar{c}_v \cdot g \cdot d^2 \cdot (S - 1) \cdot (\text{sen}(\theta_e) + \text{sen}(\theta_s))}{\nu \cdot D} \quad \text{E. 5.4}$$

El modelo de aumento de concentración se define como:

$$\frac{\Delta c_p}{c_p} = x_1 \cdot \hat{M}^{x_2} \quad \text{E. 5.5}$$

Donde x_1 y x_2 corresponden a los parámetros de ajustables a partir de los parámetros operacionales.

Los datos de los puntos bajos de los mineroductos son ajustados a partir del método de mínimos cuadrados:

$$\min E = \sum_j \left(\frac{\Delta \phi_j}{\bar{\phi}_j} - x_1 \cdot \hat{M}^{x_2} \right)^2 \quad \text{E. 5.6}$$

ajustando los valores de x_1 , x_2 y θ_c

La viscosidad de la pulpa es estimada a partir de la Ref. [12], la cual relaciona la viscosidad equivalente de la mezcla con la concentración de sólidos mediante la siguiente expresión

$$\frac{\mu_p}{\mu_l} = \left(1 - \frac{c_v}{c_{v_m}}\right)^{-2}$$

E. 5.7

Donde

μ_p : Viscosidad dinámica de la pulpa

μ_l : Viscosidad dinámica del fluido transportarte, en este caso agua

c_v : Concentración volumétrica de sólidos

c_{v_m} : Concentración volumétrica de empaquetamiento

5.2. Resultados

Los resultados de los parámetros de ajuste son los siguientes:

Tabla 5-1. Parámetros de ajuste de tendencia según mínimos cuadrados.

Parámetro de ajuste	Valor
x_1	$9,10 \cdot 10^{-3}$
x_2	0,49

La Figura 5-1 muestra la curva de tendencia y los datos de los puntos bajos de los concentraductos Hy Grade Pellets (HGP), Da Hong Shan (DHS) y Minera Hierro Atacama (MHA) en una detención de 22, 8 y 22,2 horas respectivamente.

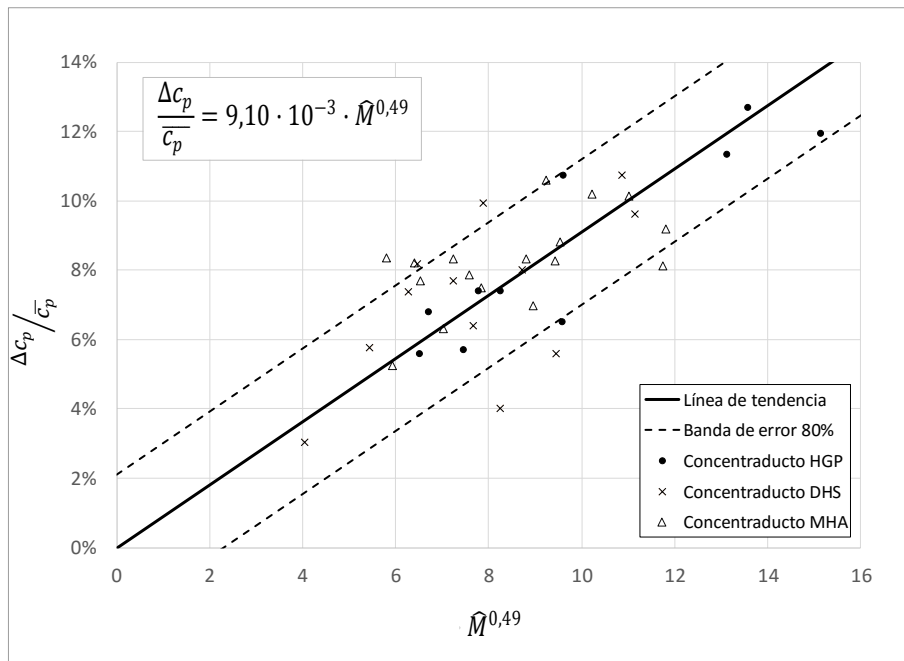


Figura 5-1 Curva de ajuste datos puntos bajos y aumento de concentración

Luego, el modelo que predice el aumento de la concentración de una pulpa ($\frac{\Delta c_p}{c_p}$) en función de la masa de sólidos que se desplaza hacia un punto bajo en un mineroducto (M) es:

$$\frac{\Delta c_p}{c_p} = 9,10 \cdot 10^{-3} \cdot \widehat{M}^{0,49} \quad \text{E. 5.8}$$

O equivalentemente en términos de variación porcentual:

$$\frac{\Delta c_p}{c_p} \% = 0,91 \cdot \widehat{M}^{0,49} \quad \text{E. 5.9}$$

6. Aplicación de Predictor

En la sección 6.1 aplica el modelo predictivo para estimar el tiempo máximo de detención de los 4 casos presentados en esta tesis.

En la sección 6.2, se realiza un análisis de sensibilidad centrado en el caso del mineroducto de SAM.

En la sección 6.3 se presenta la discusión que contempla la adecuada interpretación y análisis de los resultados obtenidos en este trabajo de tesis.

6.1. Estimación de tiempo máximo de detención mineroductos

6.1.1. Tiempo máximo de detención mineroductos HGP, DHS y MHA

En este punto se aplica el predictor obtenido en la sección 5 para estimar los tiempos de detención máxima para un aumento de concentración de 20% respecto de la media antes de la detención y también se estima el tiempo para la concentración de empaquetamiento, en los Mineroductos donde se dispone de datos registrados en la extensión y precisión suficientes en el transmisor de densidad (DIT) de la descarga del tramo detenido con pulpa, es decir, en los Mineroductos HGP, DHS y MHA.

Para una geometría dada, es posible definir el criterio crítico de concentración $\Delta c_p / \bar{c}_p$ y obtener, bajo condiciones dadas de pendiente entrante y saliente del punto bajo, el tiempo máximo de detención para alcanzar la condición crítica, que el caso de la experiencia de diseño y operación se contempla no exceder el aumento del 20% en la concentración de sólidos en peso inicial.

Se considera que la detención ocurre con la concentración de sólidos de diseño que corresponde a 69%, 66% y 67% respectivamente para los mineroductos HGP, DHS y MHA.

A modo de verificación, la Figura 6-1, Figura 6-2 y Figura 6-3 muestran los tiempos de detención para un aumento de concentración $\Delta c_p / \bar{c}_p \% = 20\%$ de los mineroductos HGP, DHS y MHA respectivamente.

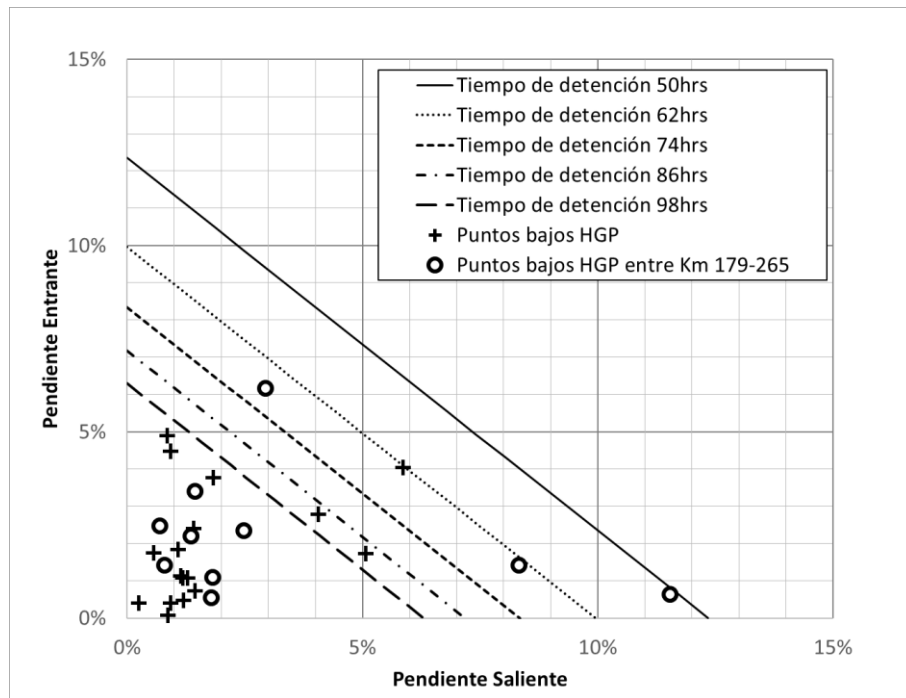


Figura 6-1. Tiempo de detención y pendientes para aumento de concentración de 20% HGP.

El tiempo máximo de detención para llegar a un aumento de 20% de la concentración equivale a 50 horas.

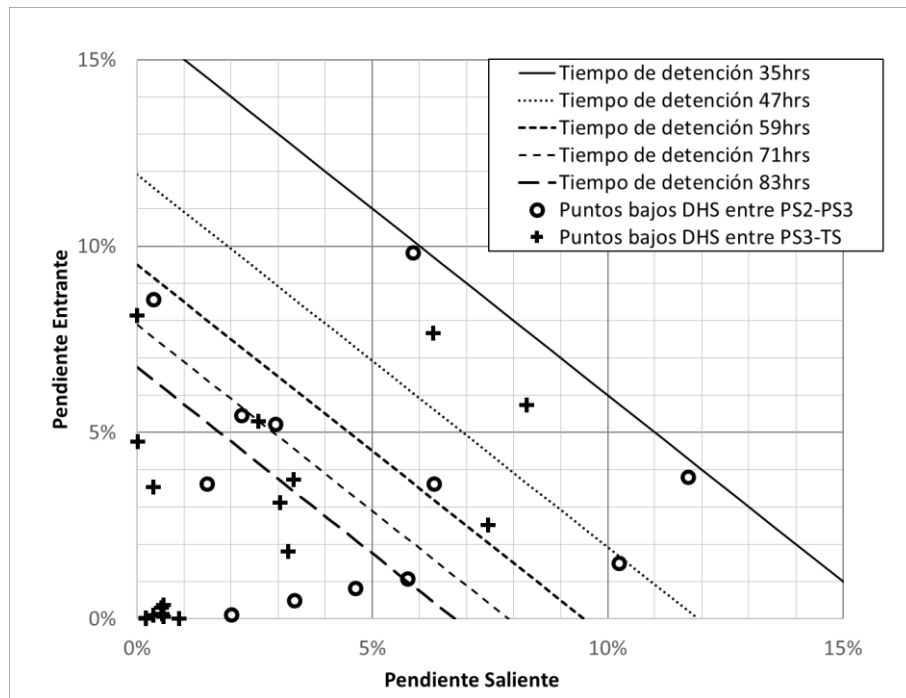


Figura 6-2. Tiempo de detención y pendientes para aumento de concentración de 20% DHS

El tiempo máximo de detención para llegar a un aumento de 20% de la concentración equivale a 35 horas.

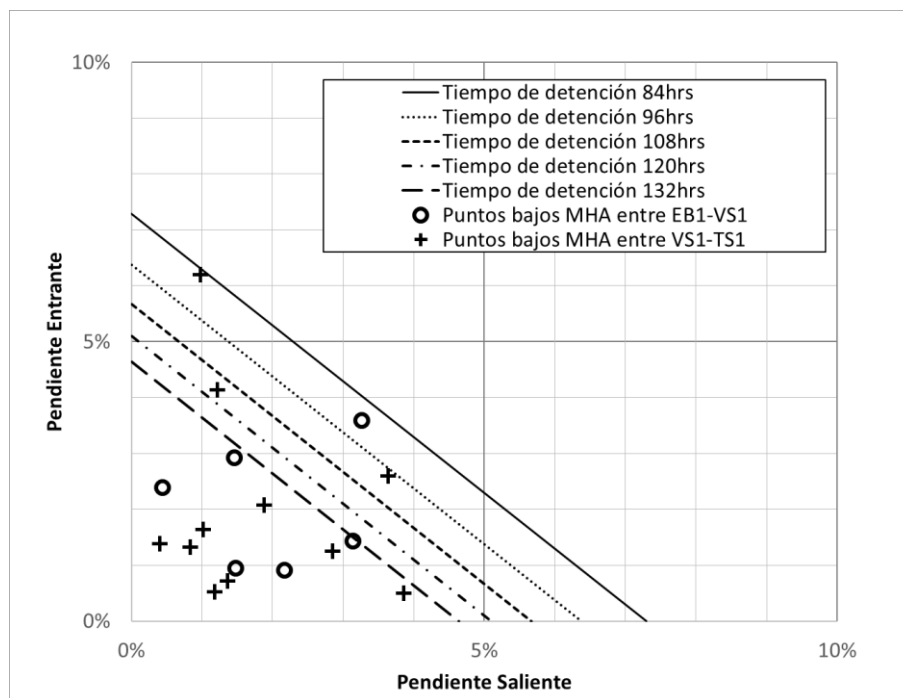


Figura 6-3. Tiempo de detención y pendientes para aumento de concentración de 20% MHA.

El tiempo máximo de detención para llegar a un aumento de 20% de la concentración equivale a 84 horas en el tramo VS1 a TS1 y a 89 horas si se considera el tramo EB1-VS1.

6.1.2. Tiempo máximo de detención mineroducto SAM

En este punto se aplica el predictor obtenido en la sección 5 para estimar los tiempos de detención máxima para un aumento de concentración de 20% respecto de la media antes de la detención y también se estima el tiempo para la concentración de empaquetamiento, en el mineroducto SAM y se analiza las condiciones de concentración estimadas para el re arranque sin problemas registrado luego de 88 horas de detención.

El modelo desarrollado permite predecir el tiempo máximo de detención para las características del mineroducto, características del fluido y criterio de aumento de concentración dado. La Figura 6-4 muestra los resultados de los tiempos de detención para una concentración media antes de la detención de 70% y un aumento de concentración de 20%.

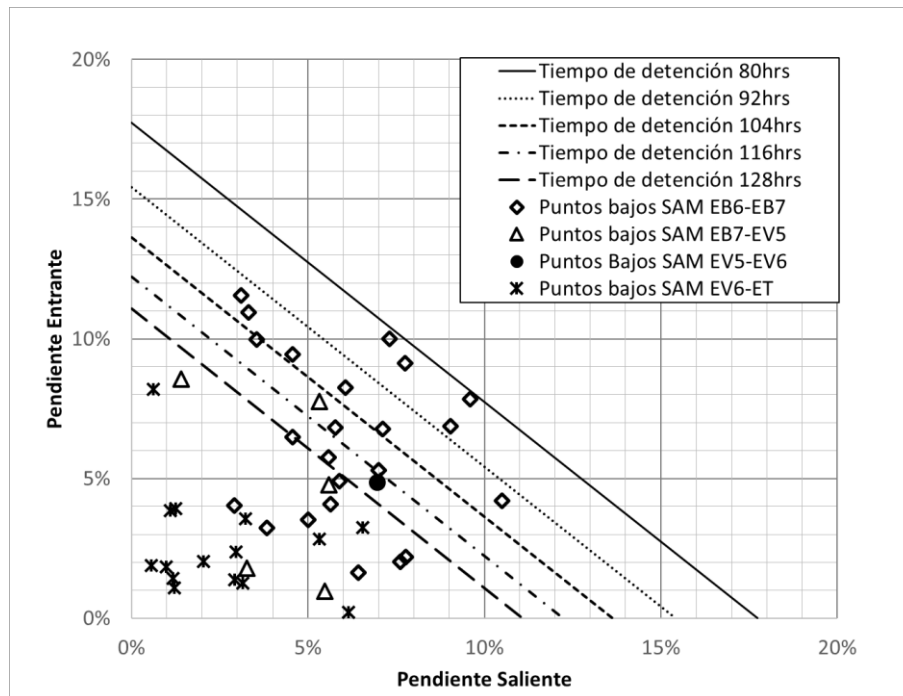


Figura 6-4. Tiempos de detención y pendientes para aumento de concentración de 20% SAM

Se observa que en el mineroducto Samarco, para un aumento de concentración de 20% sobre la concentración media, presenta puntos bajos críticos, ubicados en los km 4,2; 25,3 y 64,3, con un tiempo de detención de 80 horas.

La división de operaciones del Mineroducto SAM reportó el día 09-04-2014 una detención del mineroducto, en donde un batch de concentrado de hierro de $c_p = 66\%$ se mantuvo detenido entre los kilómetros 40 y 116 durante 88 horas. También se reportó que este Batch fue reimpulsado hacia la estación aguas abajo sin mayores intervenciones luego de las 88 horas.

No se cuenta con los datos del densímetro de descarga del mineroducto al momento del re-arranque de la operación.

El modelo desarrollado muestra que, para las condiciones recientemente descritas, la concentración alcanzada en los puntos bajos debió haber alcanzado aproximadamente un 32% de la concentración inicial del batch ($\Delta c_p = 66\% - 81\%$), como muestra la Figura 6-5.

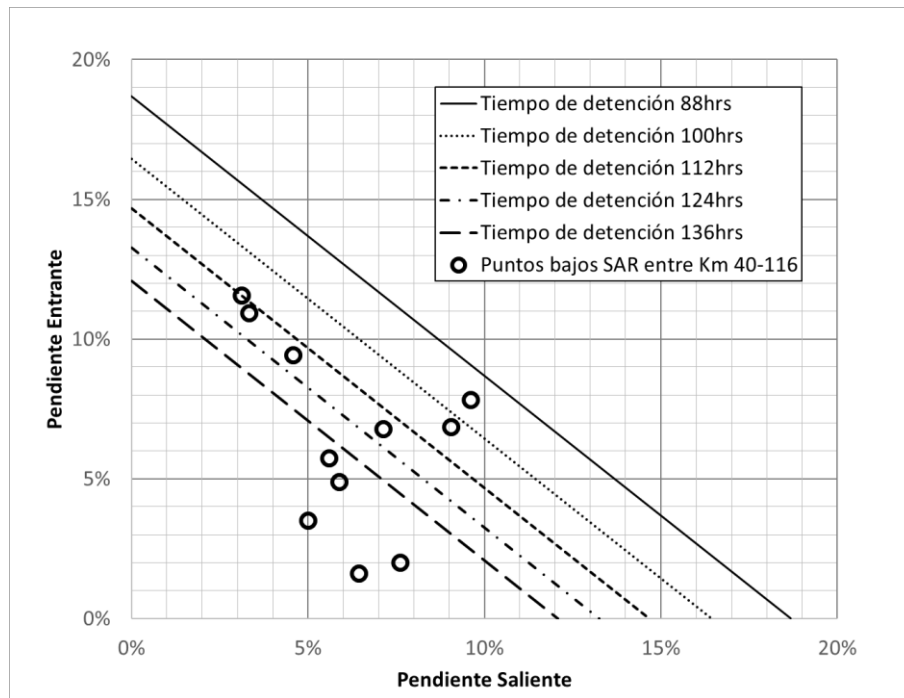


Figura 6-5. Tiempos de detención para un aumento de concentración de 32% SAM

El reinicio de las operaciones del concentrador después de las 88 horas de detención puede explicarse debido a que la línea no alcanzó la concentración máxima de empaquetamiento en el punto bajo crítico.

6.2. Análisis de sensibilidad resultados SAM

A modo de ejemplo, se considera el punto bajo crítico del mineroducto SAM, que corresponde al punto bajo del kilómetro 64,5 de pendientes medias entrante y saliente de 9,6% y 7,8% respectivamente. Más detalles asociados a este punto se pueden observar en la lista Anexo A y en los gráficos del análisis de sensibilidad en el Anexo B.

Este punto bajo cuenta con un tiempo de detención de 71 horas para alcanzar un 20% de concentración sobre la concentración media de inyección al ducto, antes de la detención ($\bar{c}_p = 66\%$), la que corresponde a una concentración de sólidos máxima de 79,2%.

Para el análisis de sensibilidad, se considera una variación dentro de los rangos posibles de concentración media antes de la detención (\bar{c}_p), gravedad específica de sólidos (S), diámetro de tubería (D), pendientes entrantes y salientes del punto bajo (P_e, P_s), diámetro característico 85 (d_{85}) y viscosidad (ν). Las variaciones consideradas y en el tiempo de detención considerando el criterio de aumento de concentración $\frac{\Delta c_p}{c_p} = 10\%$, solo para efectos de análisis de sensibilidad, se presenta en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Sensibilidad de distintas variables sobre el tiempo de detención.

Variable	Valor medio	Valor medio+10%	Tiempo detención para Valor medio+10% (hrs)	Variación en tiempo de detención con aumento 10% de la variable (hrs)
\bar{c}_p	66 %	73 %	14,2	-57
S	4,87	5,36	67,7	-3
D	22 "	24,2 "	78,2	7
P_e	9,6%	10,6%	67,4	-4
P_s	7,8%	8,6%	68,0	-3
d_{85}	4,6E-05 m	5,1E-05 m	58,8	-12
ν	3,6E-06 m ² /s	4,0E-06 m ² /s	78,2	7

La Figura 6-6 muestra gráficamente la sensibilidad al tiempo máximo de detención de las distintas variables del modelo, observándose que la variable más sensible o que más influye en el tiempo máximo de detención es la concentración inicial de sólidos, con una disminución de 57 horas en el tiempo máximo de detención para un aumento de 10% en la concentración de la pulpa, antes de la detención. Efectivamente el tiempo máximo de detención recomendado disminuye de 71.1 horas a 14.2 horas si la pulpa detenida hubiese tenido una concentración en peso de 73% en lugar del 66% de la pulpa realmente detenida.

La segunda variable que más influye en el tiempo de detención es la granulometría, con una disminución de 12 horas en el tiempo máximo de detención para un aumento de 10% en la granulometría asociada al d_{85} . Se observa un tiempo de detención máximo de 58,8 horas en lugar de 71,1 si la partícula hubiese tenido un tamaño d_{85} de 51 micrones en lugar de los 46 micrones reales, manteniendo el resto de las variables constantes.

Se destaca que un aumento porcentual de 10% en las pendientes de entrada y salida al punto bajo tiene una disminución en el tiempo de detención de 4 y 3 horas, respectivamente, lo cual muestra poco impacto del aumento de pendientes convergentes al punto bajo si estas están en el orden del 10%, resultado que avala el criterio histórico de diseño de evitar pendientes mayores al 15% en toda la conducción de pulpas y especialmente las de entrada y salida a los puntos bajos.

Por contrapartida, un aumento de 10% en las variables diámetro de la conducción y viscosidad tiene un efecto positivo al permitir un aumento de 7 horas en el tiempo máximo de detención para no sobrepasar en un 20% la concentración inicial por segregación.

Por otra parte, se observa que los tiempos de detención máxima pueden sectorizarse, permitiendo tiempos mayores si la pulpa detenida se confina en tramos de menores pendientes. En efecto, si una pulpa es detenida en puntos bajos con pendiente 15%, resultan tiempos de detención cercanos a 50 horas, mientras que con pendientes de 7% ese tiempo sube aproximadamente a 80 horas.

Esta observación tiene como implicancia operacional que se puede “eliminar” el problema de puntos bajos específicos rellenando con un batch de agua y considerando el tiempo de detención del mineroducto como el mínimo entre los demás.

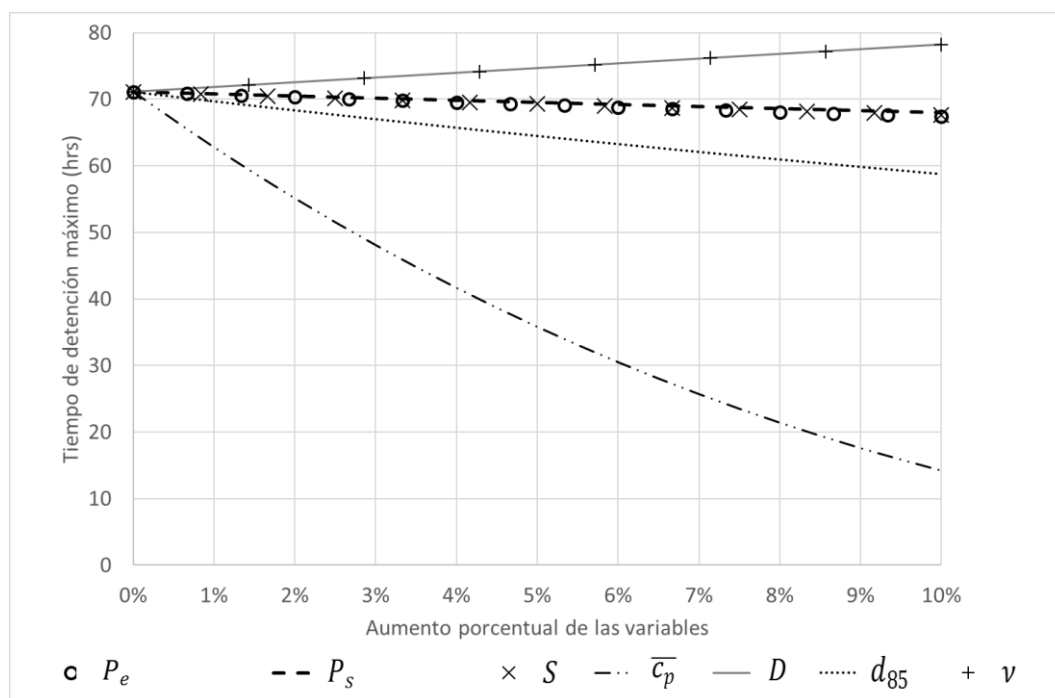


Figura 6-6 Sensibilidad de distintas variables sobre el tiempo de detención.

6.3. Análisis de sensibilidad de la pendiente para una conducción

Se analiza la sensibilidad de las pendientes convergentes a un punto bajo, manteniendo constantes las características de la pulpa (*ceteris paribus*) en un mineroducto de hierro típico, para lo cual se adoptaron valores medios (Tabla 6-2) y se analiza la variación del tiempo máximo de detención en el rango de variación posible de las variables de pendiente de entrada y salida (P_e/P_s).

Tabla 6-2. Valores típicos de mineroductos de hierro.

S	4,9
D (m)	0,406
\bar{c}_p	68%
ν (m^2/s)	4,1E-06
d_{85} (m)	5,0E-05

La Figura 6-7 muestra la variación del tiempo de detención para pendientes de entrada y salida (P_e/P_s) entre 5% y 20%. Se observa que, para un concentrado de hierro típico, el tiempo de detención con pendiente 5%, el tiempo de detención es cercano a las 95 horas, mientras que para una pendiente del 20% es solo de 20 horas.

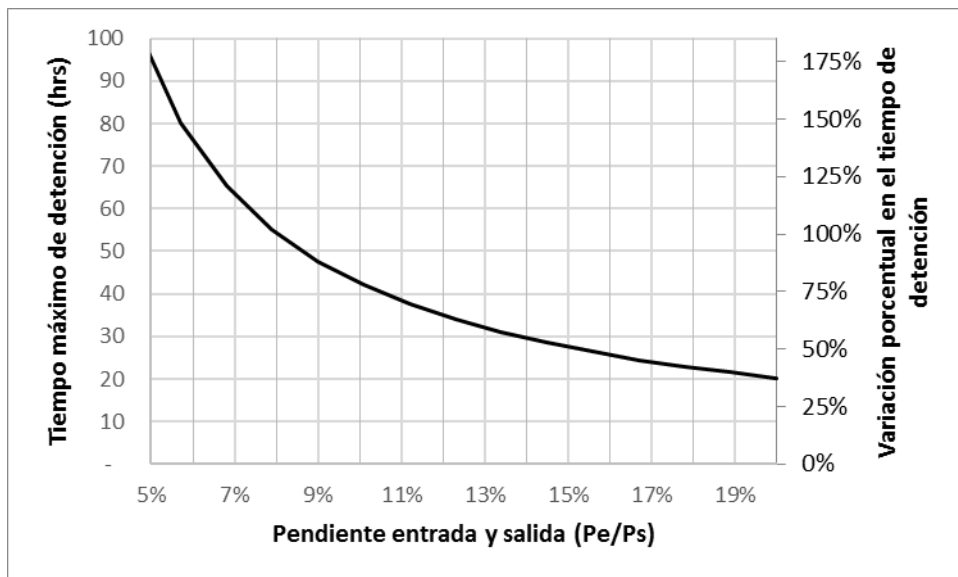


Figura 6-7. Sensibilidad pendiente de entrada y salida.

6.4. Análisis de sensibilidad de la concentración para una conducción típica

Se analiza la sensibilidad de la concentración media antes de la detención (\bar{c}_p), manteniendo constantes las características de la pulpa (*ceteris paribus*) en un mineroducto de hierro típico, para lo cual se adoptaron valores típicos (Tabla 6-3) y se analiza la variación del tiempo máximo de detención en el rango de variación posible de las variables de concentración media antes de la detención (\bar{c}_p).

Tabla 6-3. Valores típicos con pendiente 7,5% para sensibilidad a la concentración.

S	4,9
D (m)	0,406
d_{85} (m)	5,0E-05
P_e y P_s	7,5%

La Figura 6-8 muestra la variación del tiempo de detención para una variación de la concentración inicial de sólidos (\bar{c}_p) entre 65% y 72%. Se observa para una concentración de sólidos de 65%, el tiempo de detención es de 90 horas, mientras que el caso de una concentración de $\bar{c}_p = 72\%$, el tiempo de detención máximo es de 20 horas.

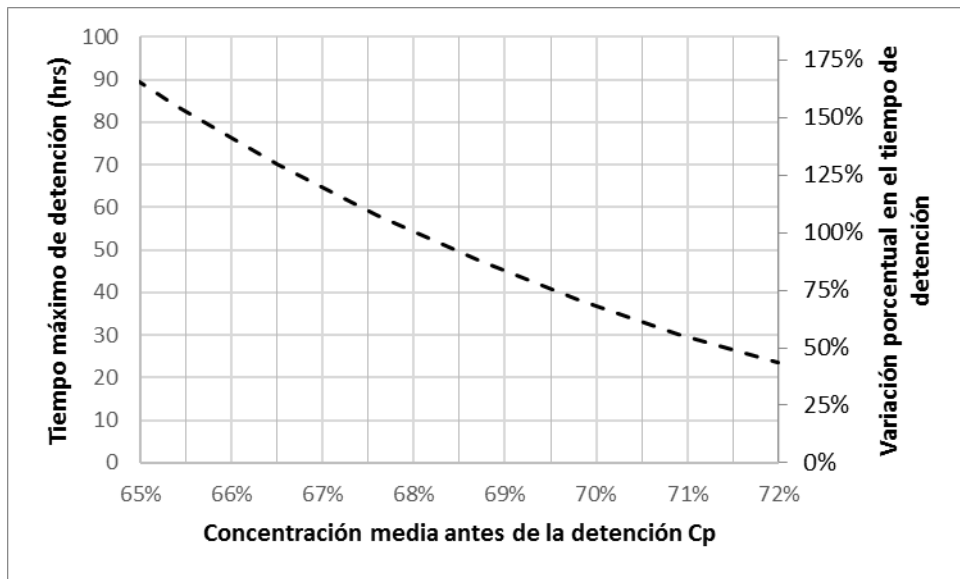


Figura 6-8. Sensibilidad concentración media antes de la detención.

7. Discusión

Es factible establecer un predictor del aumento de la concentración de una pulpa ($\frac{\Delta c_p}{c_p}$) en función de la cantidad de sólidos que se desplaza hacia un punto bajo en un concentrado (\hat{M}). Dicho modelo es:

$$\frac{\Delta c_p}{c_p} \% = 0,91 \cdot \hat{M}^{0,49} \quad \text{E. 7.1}$$

El parámetro adimensional \hat{M} es función del tiempo (t), de la concentración en volumen media (\bar{c}_v) de los ángulos de entrada y salida a los puntos bajos (θ_e y θ_s), de la gravedad específica del sólido (S), de la aceleración de gravedad (g), del diámetro interno de la conducción (D), de la viscosidad de la pulpa (ν) y el diámetro característico (d_{85}), de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\hat{M} = \frac{t \cdot \bar{c}_v \cdot g \cdot d_{85}^2 \cdot (S - 1) \cdot (\text{sen}(\theta_e) + \text{sen}(\theta_s))}{\nu \cdot D} \quad \text{E. 7.2}$$

El modelo es aplicable para el transporte de concentrado de hierro, cuya granulometría tenga al menos un 95% del tamaño bajo la malla #200 y una gravedad específica de sólidos (S) entre 4,5 - 5,1 y que cuenten con sistemas de bombeo con bombas de desplazamiento positivo, que permitan inyectar presiones capaces de remover pulpas previamente detenidas.

El tiempo máximo de detención predice una concentración media en el punto bajo, con una longitud de aproximadamente 110 metros. Esta distancia corresponde a la frecuencia de medición de los datos utilizada y la velocidad media de los mineroductos al momento del re-arranque (medidas cada un minuto, velocidades medias de 1,8 m/s). En los sistemas de información y la instrumentación típica actual se puede obtener información cada un 1 segundo, lo que puede aumentar la precisión del modelo.

El predictor utiliza pendientes y o ángulos entrantes y salientes al punto bajo, correspondientes a la pendiente media entre el punto bajo y punto alto inmediatamente aguas arriba y aguas abajo, respectivamente. No se consideran concavidades o singularidades locales. Esto permite simplificar el modelo y generalizar los casos, sin embargo, algunas singularidades podrían ser el origen de la dispersión de los datos.

Considerando el criterio tradicional de un aumento de concentración máximo $\frac{\Delta c_p}{c_p} = 20\%$, y las concentraciones de sólidos medias informadas antes de las detenciones de los mineroductos, el tiempo máximo de detención de los mineroductos HGP, DHS, MHA y SAM son respectivamente 50, 40, 84 y 80 horas.

La menor cantidad de horas de detención en DHS (40 horas) en relación a la mayor cantidad de horas para MHA (84 horas) se produce principalmente por las diferencias en las pendientes medias

críticas convergentes a los puntos bajos ($P_{entrante}$ y P_{salida}), correspondientes a 6,9-9,8% para MHA y 3,6-3,3% para DHS (Anexo A).

Se observa que según los resultados del predictor para detención del mineroducto SAMARCO, con una duración de 88 horas, el mineroducto aumentó su concentración más de un 20% sobre la media en un punto bajo, sin embargo, la concentración estimada que alcanzó en dicho punto bajo fue de 81% en peso, valor menor a la máxima concentración de empaquetamiento. El re-arranque normal del mineroducto luego de 88 horas detenido se explica debido a que cuenta con bombas de desplazamiento positivo que aportan altas presiones al sistema, al igual que los otros tres mineroductos estudiados en el presente trabajo.

El diseño de las presiones máximas admisibles de los STP debería considerar el tiempo máximo de detención como parte fundamental del diseño y mecanismos de protección como discos de ruptura y piscinas de emergencia, especialmente en los casos donde las detenciones son una práctica de operación normal frecuente, como es la tendencia para evitar transportar agua a largas longitudes, con impactos económicos significativos.

No fue posible efectuar un análisis de aumento de presiones requeridas para remover un batch de pulpa detenido, debido a que tanto los eventos como los re-arranques tienen características muy variables y por seguridad de los sistemas o de la producción, no se permite experimentar en ellos. Distinto sería el caso de contar con una planta piloto para este y otros fines. Sin embargo, se podría avanzar con un análisis conceptual o con una recopilación numerosa de un mineroducto en particular, pero dicho trabajo no forma parte de los objetivos del presente estudio

8. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo con las siguientes:

Se producen aumentos locales de la concentración de la pulpa en los puntos bajos (Δc_p), luego de una detención en el transporte hidráulico y estos aumentos son sensibles al volumen de sólidos que se transporta por gravedad hacia estos puntos.

El volumen de sólidos que se transporta a los puntos bajos es a su vez dependiente del tiempo de duración de la detención y de la velocidad de sedimentación, que a su vez es dependiente de las características de la pulpa y de la geometría, especialmente las pendientes que propician la convergencia de sólidos en estos puntos bajos.

Se establece un modelo que predice el aumento de la concentración en los puntos bajos (c_p), sobre la base de registros de detenciones en concentraductos de hierro, cuya expresión es la siguiente, en función del parámetro adimensional \hat{M} que se transporta a estos puntos bajos:

$$\frac{\Delta c_p}{c_p} \% = 0,91 \cdot \hat{M}^{0,49} \quad \text{E. 8.1}$$

Dicha expresión podrá tener variaciones o modificaciones, especialmente si se incorporan datos de detenciones en sistemas de transporte de otras pulpas diferentes a los concentrados de hierro.

Efectuado un análisis de sensibilidad a las distintas variables que influyen en la determinación del tiempo máximo de detención, se concluye que la variable más influyente es la concentración de la pulpa ingresada.

El efecto de dispersión por turbulencia no es relevante lo que incentiva continuar con los análisis de registro de densidades en la salida de pulpas detenidas por tiempos prolongados.

Se recomienda que los operadores conserven el registro de datos operacionales asociados a una parada para profundizar y extender estos estudios. Dichos registros deben contener, al menos, las concentraciones de ingreso, las secciones donde se encontró el batch detenido, los flujos y presiones antes, durante y después de la detención, las características reológicas y granulométricas de la pulpa y ojala los registros de densidad en terminal con un paso de 1 minuto o menor.

9. Bibliografía

- [1] Ihle, Tamburrino y Ulloa (2010), “Pruebas de laboratorio para determinar factores de riesgo en repartidas de mineroducto”, Fluimin 2010.
- [2] Valencia (2005), “Datos recolectados durante Comisionamiento y Puesta en Marcha Mineroducto Hy Grade Pellets.” Contrato de PSI con ESSAR.
- [3] Valencia (2007), “Datos recolectados durante Comisionamiento y Puesta en Marcha Mineroducto Da Hong Shan”, Contrato de PSI con Kunming Iron & Steel Corporated (KISCO).
- [4] Valencia 2017, “Registros detención programada concentraducto Minera Hierro Atacama 3 y 4 de febrero de 2017”.
- [5] Valencia 2012, “Ingeniería de Detalle Tercer Mineroducto de Samarco Proyecto P4P. 2011-2002” Contrato de SHIMIN do Brasil Engenharia Ltda. con Ausenco Brasil. Contrato ADOB-SBEC-11-2001 Servicios de Ingenieria para el Desarrollo del Proyecto Samarco (Fase de Detalles de Cuarta “Pelotizacao”).
- [6] Vasquez y Rayo (2013) “Fortalezas y Debilidades de los Sistemas de Transportes de Pulpas. Análisis Actualizado”, FLUIMIN 2013.
- [7] Valencia (2012), “Concentraductos de Cobre vs concentraductos de hierro. Similitudes y diferencias”, FLUIMIN 2012.
- [8] Ihle y Tamburrino (2012). Uncertainties in key transport variables in homogeneous slurry flows in pipelines. *Minerals Engineering*, 32, 54-59.
- [9] PSI (2007), “Laboratory Procedure Angle of Slide / Angle of Repose”. Document No.: LB-PR-012.
- [10] Taylor (1954), “The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe”, In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (Vol. 223, No. 1155, pp. 446-468). The Royal Society.
- [11] Phillips, Armstrong, Brown, Graham, y Abbott, (1992), “A constitutive equation for concentrated suspensions that accounts for shear-induced particle migration. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*”, 4(1), 30-40.
- [12] Krieger, (1972), “Rheology of monodisperse latices. *Advances in Colloid and Interface Science*”, 3(2), 111-136.
- [13] Ihle, (2014), “Should maximum pressures in ore pipelines be computed out of system startups or power outages?” *Minerals Engineering*, 55, 57-59.
- [14] SHIMIN Ingeniería SpA (2011), “Curso de Hidráulica Concentraductos CMDIC. Iquique”, Chile. Contrato GPL-2010/26 “Especialistas en Transporte de Pulpas, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi”.
- [15] SRC (2017), “Slurry Pipeline Systems Course and Banking Information for EFT. Saskatchewan Research Council (SRC)”, Canada. 2017.
- [16] Fuentes (2017), “Curso reología de Pulpas”, Curso Interno SHIMIN Ingeniería SPA.

- [17] JRI (2012), “Diplomado de Fluido dinámica”, Curso de JRI.
- [18] Wasp, Kenny y Gandhi (1977), “Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation. Series on Bulk Materials Handling” Vol. 1 (1975/77) N°4
- [19] Abulnaga (2002), “Slurry Systems Handbook”. McGraw-Hill.

Anexos A. Lista de Datos Puntos Bajos

PUNTO BAJO	Mineroducto	Kilometraje	Distancia (m)			Cota (m)			Pendiente entrada	Pendiente Salida	Longitud tramo (m)		Diámetro nominal (")	Longitud al densímetro (km)	Concentración de reanranque (%)	Concentración media antes de la detención (%)	Densidad de pulpa en reanranque (Ton/m3)	Tiempo de detención (hrs)	Densidad de sólidos
			Punto alto aguas arriba	Punto Bajo	Punto Alto Aguas Abajo	Punto alto aguas arriba	Punto Bajo	Punto Alto Aguas Abajo			Aguas Arriba	Aguas Abajo							
			1	HGP	183.2	179346	183222	183438			860.0	537.7							
2	HGP	186.8	183688	186848	187078	535.0	170.5	172.0	11.5%	0.6%	3160	230	14	67	74.0	66.1	2.46	22	5.05
3	HGP	188.6	187808	188587	188970	161.6	151.1	159.5	1.4%	2.2%	779	383	14	65	71.0	66.1	2.32	22	5.05
4	HGP	190.3	189400	190277	191017	160.0	144.2	152.4	1.8%	1.1%	877	740	14	64	69.9	66.1	2.27	22	5.05
5	HGP	199.1	197537	199116	199791	110.9	64.5	106.2	2.9%	6.2%	1579	675	14	55	73.6	66.1	2.44	22	5.05
6	HGP	200.3	199791	200316	200726	106.2	96.8	99.1	1.8%	0.6%	525	410	14	54	70.6	66.1	2.31	22	5.05
7	HGP	205.5	204950	205455	206765	89.5	86.1	118.7	0.7%	2.5%	505	1310	14	49	71.0	66.1	2.32	22	5.05
8	HGP	207.6	206765	207637	208883	118.7	97.2	126.6	2.5%	2.4%	872	1246	14	46	70.4	66.1	2.30	22	5.05
9	HGP	212.3	211194	212319	213312	109.8	101.0	115.2	0.8%	1.4%	1125	993	14	42	69.8	66.1	2.27	22	5.05
10	HGP	218.7	216548	218712	219548	98.7	67.5	96.0	1.4%	3.4%	2164	836	14	35	73.2	66.1	2.42	22	5.05
11	DHS	37.2	36000	37200	38200	1475.0	1435.0	1440.0	3.3%	0.5%	1200	1000	8.5	32	66.0	62.4	2.07	8	4.63
12	DHS	40.5	38900	40500	41900	1400.0	1308.0	1323.0	5.8%	1.1%	1600	1400	8.5	28	67.2	62.4	2.11	8	4.63
13	DHS	42.5	42000	42450	42650	1322.0	1312.0	1318.0	2.2%	5.5%	450	110	8.5	26	66.4	62.4	2.09	8	4.63
14	DHS	43.5	43281	43531	43969	1327.0	1322.0	1325.0	2.0%	0.1%	250	438	8.5	25	64.3	62.4	2.02	8	4.63
15	DHS	45.8	44707	45800	48354	1364.0	1300.0	1551.0	5.9%	9.8%	1093	2554	8.5	23	68.4	62.4	2.17	8	4.75
16	DHS	50.8	50526	50847	52500	1644.8	1640.0	1700.0	1.5%	3.6%	321	1653	8.5	18	67.0	62.4	2.11	8	4.63
17	DHS	58.6	58000	58592	59385	1751.0	1749.0	1817.0	0.3%	8.6%	592	793	8.5	10	64.9	62.4	2.04	8	4.63
18	DHS	59.7	59500	59715	60381	1810.0	1788.0	1798.0	10.2%	1.5%	215	666	8.5	9	65.9	62.4	2.07	8	4.63
19	DHS	61.0	60500	61001	61133	1797.0	1773.8	1774.9	4.6%	0.8%	501	132	8.5	8	67.5	62.4	2.12	8	4.63
20	DHS	63.2	63055	63183	63332	1754.0	1750.3	1758.0	2.9%	5.2%	128	148.59	8.5	6	68.6	62.4	2.16	8	4.63
21	DHS	63.6	63362	63568	64504	1760.0	1747.0	1781.0	6.3%	3.6%	206	936	8.5	5	67.4	62.4	2.12	8	4.63
22	DHS	67.2	66750	67160	67607	1860.0	1812.0	1829.0	11.7%	3.8%	410	447	8.5	2	69.1	62.4	2.18	8	4.63
23	MHA	13.7	10050	13700	16300	701.5	649.2	730.7	1.4%	3.1%	3650	2600	10.0	103	68.5	63.0	2.14	22.25	4.5
24	MHA	25.9	16300	25900	26350	730.7	385.0	399.7	3.6%	3.3%	9600	450	9.9	91	68.1	63.0	2.13	22.25	4.5
25	MHA	29.1	26350	29100	29800	399.7	319.0	329.2	2.9%	1.5%	2750	700	9.9	88	68.2	63.0	2.13	22.25	4.5
26	MHA	31.2	29800	31200	34450	329.2	315.8	363.6	1.0%	1.5%	1400	3250	9.9	86	67.0	63.0	2.09	22.25	4.5
27	MHA	47.2	42900	47150	49700	264.8	163.0	174.0	2.4%	0.4%	4250	2550	9.9	70	68.0	63.0	2.12	22.25	4.5
28	MHA	52.0	49700	52000	54050	174.0	153.0	197.3	0.9%	2.2%	2300	2050	10.0	65	67.7	63.0	2.11	22.25	4.5
29	MHA	61.0	59500	61000	62750	248.9	236.3	259.4	0.8%	1.3%	1500	1750	10.1	56	67.9	63.0	2.12	22.25	4.5
30	MHA	69.9	64050	69850	70350	267.6	188.4	192.0	1.4%	0.7%	5800	500	10.2	47	68.2	63.0	2.13	22.25	4.5
31	MHA	73.4	73250	73400	73950	186.3	182.0	188.8	2.9%	1.2%	150	550	10.2	44	67.4	63.0	2.10	22.25	4.5
32	MHA	83.2	81200	83200	84350	119.0	111.0	126.9	0.4%	1.4%	2000	1150	10.2	34	66.3	63.0	2.06	22.25	4.5
33	MHA	88.7	84350	88650	92100	126.9	83.2	139.8	1.0%	1.6%	4300	3450	10.2	28	68.2	63.0	2.13	22.25	4.5
34	MHA	94.5	93350	94500	94650	135.0	123.7	133.0	1.0%	6.2%	1150	150	10.2	23	68.8	63.0	2.15	22.25	4.5
35	MHA	96.1	94650	96050	96250	133.0	79.0	80.0	3.9%	0.5%	1400	200	10.2	21	69.7	63.0	2.18	22.25	4.5
36	MHA	101.8	99600	101800	102100	112.9	86.0	98.4	1.2%	4.1%	2200	300	10.2	15	69.4	63.0	2.17	22.25	4.5
37	MHA	102.4	102100	102400	103300	98.4	94.9	99.6	1.2%	0.5%	300	900	10.2	15	68.3	63.0	2.13	22.25	4.5
38	MHA	104.1	103300	104100	104700	99.6	84.6	97.0	1.9%	2.1%	800	600	10.2	13	68.2	63.0	2.13	22.25	4.5
39	MHA	106.6	106250	106600	108100	84.0	71.3	110.2	3.6%	2.6%	350	1500	10.2	10	69.4	63.0	2.17	22.25	4.5

Anexo B: Gráficos Resultados Análisis de Sensibilidad

