

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO DE INGRESO DE AGUA-BARRO EN EL
TENIENTE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ÁLVARO ANDRÉS PÉREZ LARA

**PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FRANCISCO ARMIJO ALLENDES
ISAAC NAVIA MORENO**

SANTIAGO DE CHILE

2017

Resumen

El agua-barro es uno de los principales riesgos asociado a la minería de Block/Panel caving, ya que son operaciones inherentemente susceptibles al ingresos súbitos de barro a través de los puntos de extracción, esto debido a que este método de explotación permite la acumulación de agua y genera mineral fino. Para evitar el riesgo de bombeos de agua-barro en DET se ha tomado la decisión de cerrar aquellos puntos de extracción que presentan ingreso de agua-barro en su columna, muchas veces dejando mineral con valor económico sin extraer.

El objetivo de esta investigación es determinar las reservas comprometidas por ingreso de agua-barro de puntos que se encuentran en estado operativo y futuro hasta diciembre del 2015, en las minas Reservas Norte, Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 de DET. Esto se realiza mediante modelos de predicción de ingreso de agua-barro a puntos de extracción, construidos con la técnica estadística de regresión logística.

La metodología utilizada en este estudio se basa en un análisis de los sectores en estudios para comprender el comportamiento del agua-barro, posteriormente se lleva a cabo la construcción de los modelos de ingreso de agua-barro y finalmente se evalúa el PND 2016 para estimar las reservas futuras comprometidas por ingreso de agua-barro.

El análisis del ingreso de agua-barro, indica que existen dos mecanismos de ingreso: uno vertical, que hace referencia a agua-barro que proviene de la parte superior y otro mecanismo lateral, el que se produce por extracción a puntos vecinos que poseían agua-barro con ingreso vertical, por consecuencia de esta extracción se produce una migración lateral de barro.

Se modela el ingreso de agua-barro con regresión logística, este tipo de regresión es utilizada para predecir el resultado de una variable categórica, que en este estudio es el ingreso de agua-barro a las columnas de extracción, en función de variables independientes. De los modelos de ingreso de agua barro, se tienen que las principales variables son: "Porcentaje de extracción de columna in-situ", "Canalón", "Altura de roca primaria", "Estación del año" y "Vecinos barro".

La calibración de los modelos consiste en disminuir la diferencia entre el tonelaje recuperado antes del ingreso de barro por el modelo y el real según los datos mina. Los modelos de ingreso de agua-barro poseen un error medio de: 0,24 % en ES (B1), 13,2% en DR y 13,8% en el caso de NN.

El plan PND 2016 considera la extracción de 14 Mton para ES (B1), 61,6 Mton para DR y 80,9 Mton para RENO. Considera la extracción desde el año 2016 hasta 2037 en ES (B1), para DR la extracción es desde 2016 hasta 2029 y en RENO desde el año 2016 hasta 2027. La recuperación del tonelaje planificado en el plan, para cada sector es la siguiente: 77% para ES (B1), 90,4% para DR, y un 90,7% para NN. El tonelaje remanente respecto al tonelaje económicamente extraíble considerando el criterio de agua-barro de DET, al evaluar el PND 2016 es de: 3,6 Mton en ES (B1), 6,3 Mton para DR, 7,8 Mton en RENO. Por lo cual se dejaría de extraer mineral valioso por ingreso de agua-barro.

Se recomienda incorporar en los modelos de ingreso de agua-barro variables dependientes de la operación, como uniformidad del tiraje o velocidad de extracción. También incorporar modelos de ingreso de agua-barro en la planificación de largo plazo de DET, para cuantificar de mejor forma el riesgo de este fenómeno.

Abstract

The inflow of mud is one of the principal risks associated to production goals in caving operations, Block caving and sublevel caving (SLC) operations are inherently susceptible to mudrushes because they have the potential to accumulate water and generate fines. The inflow of mud causing an important loss of non-planned ore reserves.

The purpose of this research is to development of a multivariable predictive model in order to assess the mud entrance risk for long term mine planning at ES (B1), DR and RENO at El Teniente Mine. By means of models of forecast to inflow of mud to drawpoint, constructed with the statistical technique of logistic regression.

The methodology used in this study is based on an analysis of sectors in studies to understand the behavior of water-mud, then the construction of mud input models is carried out and finally evaluate the PND 2016.

It is observed that the initial mud entrance is a vertical inflow and then it extends laterally to its neighbouring points while extraction is increased. The multivariate model was performed in order to predict the early mud entry. The multivariate predictive model is formed by two equations, which represents both vertical inflow mechanism as well as lateral inflow mechanism. The predictive model was calibrated using the historic extraction of the initial studied mines.

To analyse the ore recovery of a long term cave mine plan, this research developed a method to estimate extracted ore tonnage before mud entry using a logistic regression approach. The independent variables included in the predictive model were ratio between extracted tonnes and in situ tonnes for each period, height of primary rock, mud neighbourhood, topographic depression and season.

The calibration that defines those drawpoint with mud entry minimising the difference of extracted tonnage before mud entrance between real data and modelled data, for each drawpoint. The mud input models have an average error of 0.24% in ES (B1), 13.2% in DR and 13.8% in NN.

The PND 2016 considers the extraction about 14 Mton in ES (B1), 61,6 Mton in DR and 80,9 Mton in RENO. Consider the extraction from 2016 to 2037 in ES (B1), in DR the extraction is between 2016 and 2029 and in RENO from 2016 to 2027.

The predictive model is applied to study case production plan, the recovery of planned tonnage in the plan for each sector is as follows: 77% for ES (B1), 90.4% for DR, and 90.7% for NN. The results show that dry ore reserves no recovery is 3,6 Mt in ES (B1), 6,3 Mt in DR, 7,8 Mt in the case of RENO.

It is recommended to incorporate mud input model in the planning to quantify the mud risk and incorporate others significant short term variables into the model, such as uniformity index and extraction rate.

Agradecimientos

Debo comenzar por agradecer a mis padres y hermana por el amor, alegría y apoyo incondicional que me han dado durante toda la vida. Agradecer también por la educación y valores que me han brindado, siempre inculcándome ser una mejor persona. Han sido quienes me han levantado cuando he caído y quienes han disfrutado mis pequeños logros. René, Jacqueline y Vania son mi mayor orgullo.

Dar las gracias a la comisión, agradecerle a mi profesor guía, el señor Raúl Castro por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de título, y más aún por cada momento que se dio para enseñarme y guiarme en este periodo. Agradecer al profesor co-guía, Francisco Armijo por la excelente voluntad y disposición a enseñarme minería, ser un guía crack y solucionar dudas cada vez que se presentaban. Darle las gracias a Isaac Navia, profesor integrante, por aceptar ser parte de esta comisión. Y una mención de agradecimiento a Diego Garcés, por su disposición a ayudar y aclarar dudas cada vez que lo solicité.

Dar las gracias a todos mis familiares que me han acompañado a lo largo de mi vida, mis abuelitas por el infinito amor que me brindaron, tías, tíos, primas y primos. Todos siempre han sido un gran apoyo, alentándome a superarme y muchas gracias por siempre preocuparse por mí.

Agradecer a mis amigos de la vida, colegio, aquellos amigos que hice en la universidad, en minería, bclab y bctec.

Tabla de contenido

Capítulo 1	1
1 Introducción	1
1.1 Motivación de trabajo	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Alcances	5
1.4 Metodología de trabajo	5
1.5 Contenido por capítulo	7
Capítulo 2	8
2 Revisión Bibliográfica	8
2.1 Introducción	8
2.2 Tipos de barro	8
2.2.1 Barro fluido	8
2.2.2 Barro viscoso	9
2.3 Riesgos de ingreso de agua-barro	9
2.4 Control sobre minas que han presentado ingreso de agua-barro en sus yacimientos.....	11
2.4.1 En Kimberley- Wesselton (Sudáfrica)	11
2.4.2 En Dutoitspan mina	12
2.4.3 La mina Padcal	12
2.4.4 Kimberley minas subterráneas JV	12
2.4.5 PT Freeport Indonesia	12
2.4.6 División El Teniente	13
2.5 Conclusiones del capítulo	20
Capítulo 3	22
3 Análisis de datos de los sectores RENO, DR y ES (B1)	22
3.1 Introducción	22
3.2 Declaraciones de ingreso de agua-barro en sectores analizados	22
3.3 Variables consideradas en el análisis estadístico	25
3.4 Análisis porcentaje entrada de barro	41
3.5 Análisis altura de roca primaria	26

3.6	Análisis altura de roca in- situ	29
3.7	Análisis altura a topografía.....	33
3.8	Análisis estacionalidad	38
3.9	Análisis vecino barro	39
3.10	Análisis canalón.....	40
3.11	Conclusiones del capítulo.....	45
Capítulo 4	.....	46
4	Construcción de modelos de ingreso de agua barro en sectores RENO, DR y ES (B1)	46
4.1	Introducción	46
4.2	Mecanismos de ingreso de agua-barro observados	46
4.3	Bases de datos.....	50
4.3.1	Base de datos para regresión Logística	53
4.4	Modelo de regresión logística multivariable.....	56
4.4.1	Modelo de ingreso vertical.....	56
4.4.2	Modelo de ingreso lateral	60
4.5	Calibración de modelos de regresión logística.....	63
4.6	Análisis de incertidumbre.....	69
4.7	Puntos no barro.....	72
4.8	Conclusiones del capítulo.....	73
Capítulo 5	.....	74
5	Reservas comprometidas por agua barro en sectores RENO, DR y ES (B1)	74
5.1	Introducción	74
5.2	Calculo de mineral remanente por ingreso de agua-barro.....	74
5.3	Conclusiones del capítulo.....	79
Capítulo 6	.....	80
6	Conclusiones y trabajo futuro	80
6.1	Recomendaciones para trabajo futuro	81
7	Bibliografía	82
ANEXO A	.....	84
ANEXO B	.....	89
ANEXO C	.....	93
ANEXO D	.....	93
Anexos E	.....	96

ANEXO F	100
ANEXO G.....	101

Capítulo 1

1 Introducción

La reducción de costos a través de las prácticas de minería eficiente, segura y ambientalmente sensible, es hoy en día un asunto serio y se vuelve cada vez más importante con minas más profundas, por lo cual se está trabajando en roca más dura y regulaciones más estrictas. (Hustrulid, 2000).

Se ha optado por buscar alternativas en minería subterránea masiva, en este aspecto destaca la minería mediante Block/Panel caving, que es un método de explotación de hundimiento gravitacional masivo y a bajo costo respecto a otros métodos subterráneos. Debido a lo último, son métodos económicamente atractivos para explotar yacimientos masivos (Brown 2002). En Block/Panel caving, el bloque mineralizado se prepara (desarrollo y construcción), socava y, posteriormente, se extraen las reservas mineras. Este tipo de minería se ha convertido en el método de minería subterránea de gran elección y se espera que continúe en un futuro (Chitombo, 2010).

Uno de los peligros potenciales que deben ser evaluados durante un estudio de la minería de hundimiento, es el de ingreso de agua-barro. Este produce lesiones, pérdida de vidas, daños a la propiedad, exceso de dilución, retrasos en la producción o el cierre de la mina. Debido a la compleja naturaleza de los materiales que presentan en estos sucesos, la dinámica del caving y la distribución del agua dentro de la columna de quebrado, es muy difícil predecir sucesos como bombeos una vez que el barro se ha formado en el caving.

Los bombeos o estallidos de agua-barro, son definidos como ingreso violento de una mezcla de material fino y agua hacia labores productivas. Block/Panel caving son operaciones inherentemente susceptibles a bombeos internos porque tienen el potencial de acumulación de agua (superficial y subterránea), generan finos (por proceso de conminución), y a través de las actividades de producción, proporciona perturbaciones. La minería de caving también es susceptible a los flujos de barro externo, porque la columna de quebrado conecta la superficie, lo que actúa como un punto de entrada, con las excavaciones subterráneas (punto de descarga). Por lo tanto, es esencial realizar una evaluación de riesgo de ingreso de agua-barro, esto debe formar parte integral de cualquier estudio sobre minería de Block/Panel caving (Jakubec, 2013)

A pesar de que los flujos de barro son más comunes en las minas de caving que cualquier otra mina, cualquier actividad minera que permite la acumulación de partículas finas y de agua, es susceptible a flujos de barro. Por lo que bombeos de barro pueden y han planteado un peligro considerable para la seguridad en la minería subterránea. Hay ejemplos de minas que operan de manera segura con alta precipitación y un gran potencial de formación de barro, usando equipos telecomando y procedimientos de mitigación de riesgo de bombeos de agua-barro, como sucede en las minas IOZ, y DOZ.

Dado que los métodos de explotación utilizados actualmente en la Mina El Teniente corresponden a técnicas de hundimiento gravitacional masivo de bloques o paneles, es que se han visto afectados

por ingreso de agua-barro en sus minas. En DET, la aparición de material saturado o barro en los puntos de extracción, ha llevado al establecimiento de estándares operacionales en base a la práctica misma y la experiencia de otras minas de Block/Panel caving.

Se han tomado variadas medidas, como limitar la altura de columna, clasificación de puntos de extracción según su humedad y cantidad de finos, limitación de velocidad de extracción según clasificación de los puntos de extracción, programas de drenaje, estrategias de planificación entre otras. Una de las medidas que más afecta el negocio minero es el cierre de puntos de extracción, debido a que presenta una combinación de finos y humedad que hace riesgosa la extracción. Por lo cual, no se considera la extracción de material saturado, lo que ha llevado a tener pérdidas de reservas, por cerrar puntos de extracción tempranamente, dejando mineral remanente valioso sin extraer.

1.1 Motivación de trabajo

Debido al impacto en la recuperación de columnas extraíbles que ha traído el cierre prematuro de puntos de extracción en DET, es importante cuantificar el mineral saturado que se deja de extraer, si bien el principal motivo de esta medida es la seguridad del personal de trabajo, esto ha dejado reservas mineras comprometidas y que presentan un valor económico para DET.

Las reservas se estiman basados en el criterio de costo de oportunidad, cuyo objetivo es la maximización del VAN, y cumple restricciones de tipo operacional y económicos. Por lo que no extraer las reservas estimadas afecta el negocio minero.

La planificación de largo plazo en División El Teniente considera criterios, tanto económicos como técnicos, para la determinación de altura extraíble de los puntos de extracción de cada sector. Cada sector tiene condiciones particulares, por lo tanto, los criterios difieren entre sectores. Actualmente, en la planificación, los criterios económicos se basan en precio de Cu, costo mina, costo planta, descuento a concentrado, recuperación metalúrgica, ley de corte crítica y tasa de descuento (DET, 2015). Por otra parte, los criterios técnicos son definidos para cada punto de extracción y se indican a continuación:

1. **Altura extraíble máxima:** la altura extraíble no puede superar los 400m, equivalentes a 20 UBC (UBC=20m).
2. **Altura extraíble bajo topografía:** la altura extraíble debe ser menor a la altura a topografía del punto menos 2 UBC, es decir, 40m.
3. **Altura máximo de quebrado:** la altura máxima extraíble debe considerar a lo más 5 UBC de material quebrado (100m). Esta restricción depende de cada sector.
4. **Diferencia máxima entre columnas extraíbles de puntos vecinos:** la diferencia no debe superar 2 UBC (40m).
5. **Altura máxima extraíble por riesgo de agua-barro:** se establece que dependiendo del sector, la altura máxima extraíble no puede superar la altura in-situ. Se definen dos zonas para cada sector: una de alto riesgo de ingreso de agua-barro, la que está definida por los puntos de extracción que se encuentran bajo la proyección en planta del canalón (González,

2014) y una zona de riesgo medio, definida por aquellos puntos que se encuentran fuera de la proyección en planta del canalón.

Tabla 1 Criterios técnicos adoptados para la definición de altura máxima extraíble según DET, 2015.

Sector	Zona Alto Riesgo Entrada de Barro	Zona Medio Riesgo Entrada de Barro
ES(B1)	Altura Máxima = 1,6 x altura in-situ	Altura Máxima = 2,1 x altura in-situ
DR	Altura Máxima = 1,37 x altura in-situ	Altura Máxima = 1,5 x altura in-situ
RENO	Altura Máxima = 1,4 x altura in-situ	Altura Máxima = 1,6 x altura in-situ

Luego, se define aquella altura de extracción para cada punto como la mínima determinada por los criterios descritos previamente. Finalmente, se tiene:

Caso 1: la altura extraíble de los puntos está dada por la metodología descrita previamente.

Caso 2: la altura extraíble de los puntos está dada por la metodología previamente sin considerar el criterio de agua-barro.

En la Ilustración 1 se muestra un esquema conceptual de la definición de tonelaje remanente para los puntos de extracción que han sido cerrados por diferentes criterios y se indican los Caso 1 y 2 descritos previamente. Para este estudio interesa determinar el tonelaje remanente (considerando criterio de agua-barro) de aquellos puntos cerrados por ingreso de agua-barro.

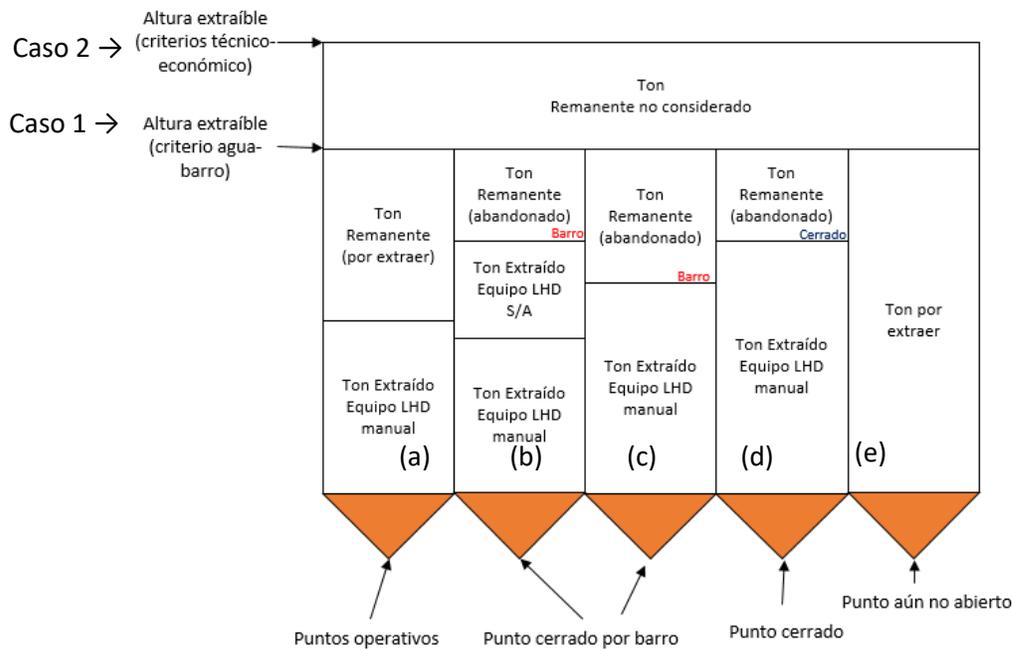


Ilustración 1 Clasificación de tonelaje remanente.

(a) Puntos Operativos: Son aquellos puntos que se encuentran en condiciones aptas para la extracción de mineral y aún poseen mineral extraíble en su columna.

(b) y (c) Puntos cerrados por barro: Puntos que debido a la penetración de agua y material fino presenta riesgo de bombeo y por seguridad son cerrados, dejando mineral económicamente extraíble en su columna.

(d) Puntos cerrados: Puntos en que se detiene temporal o definitivamente la extracción por baja ley de Cu, impurezas o cumplimiento de programa.

(d) Puntos aún no abiertos: Puntos de extracción en los que no se ha realizado la voladura de zanja.

En el presente trabajo se cuantificará el tonelaje remanente (abandonado) por lo puntos de extracción cerrados por barro a la fecha 01-01-2016 y aquellos que serán cerrados en un futuro por ingreso de agua-barro, lo que se estimará mediante la utilización de PND 2016.

1.2 Objetivos

Los objetivos, generales y específicos, de esta investigación son los que se listan a continuación.

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este estudio es cuantificar las reservas comprometidas del PND 2016 por ingreso de agua-barro en los sectores Reservas Norte, Esmeralda Bloque 1 y Diablo Regimiento.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para llevar a cabo el objetivo general, se consideran los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un análisis de los sectores con condición de agua-barro, considerando la extracción histórica de los sectores Reservas Norte, Esmeralda Bloque 1 y Diablo Regimiento.
- Preparar y diseñar una base de datos para la construcción de un modelo de regresión logística multivariable para ingreso de agua-barro.
- Construir un modelo de regresión logística para los sectores Reservas Norte, Esmeralda Bloque 1 y Diablo Regimiento que permita cuantificar el riesgo de ingreso de agua-barro en estas minas y poder definir la recuperación de reservas.
- Calibrar los modelos de ingreso de agua-barro construidos para los sectores Reservas Norte, Esmeralda Bloque 1 y Diablo Regimiento.
- Calcular la recuperación de reservas definidas en el PND 2016 de DET para los sectores Reservas Norte, Esmeralda Bloque 1 y Diablo Regimiento con el modelo construido para cada sector.

1.3 Alcances

Para el desarrollo, construcción de base de datos y modelos de ingreso de agua-barro se utilizan los datos de las minas RENO, DR y ES (B1). Para los modelos se utilizará la extracción mensual de los puntos de extracción. Se posee registros de extracción entre los años 1989 – 2015 para el sector Reservas Norte, entre los años 2011 – 2016 para el sector Esmeralda Bloque 1 y entre los años 2005 – 2015 para el sector Diablo Regimiento.

Los modelos de regresión logística construidos son solo aplicables para las minas que fueron construidos.

Para la evaluación del PND 2016, no se modifica ni se categorizan los puntos de extracción, es decir, no se limita extracción en puntos vecinos de agua-barro cuando los modelos declaran un punto en este estado, como se realiza en la mina.

El PND 2016 solo será evaluado, queda fuera de los alcances recomendar un plan de extracción para las minas analizadas.

Los modelos de ingreso de agua-barro son aplicables en la planificación a largo plazo, para estos modelos se consideran variables físicas y de secuenciamiento. Variables operacionales como velocidad de extracción y uniformidad del tiraje a escala día quedan fuera de los alcances.

1.4 Metodología de trabajo

La metodología adoptada para el presente trabajo busca lograr los objetivos planteados, tanto generales como específicos.

Este trabajo comienza con la realización de análisis de las minas DR, ES (B1) y NN de DET. Para realizar este estudio se recolecta información de los puntos de extracción de los sectores en estudio, extracción histórica mensual, registro histórico de estados de puntos, altura a topografía, altura de columna de roca primaria, altura de columna de roca in-situ (compuesta de roca primaria y secundaria) y modelo de bloques.

Posteriormente se realiza un análisis de bases de datos de extracción, estados y tonelaje extraíble de los sectores en estudio. En base a esto se calcula el tonelaje remanente de las reservas extraíbles por ingreso de agua-barro a los puntos de extracción que se encuentran en estado agua-barro a la fecha del 01-01-2016.

Para determinar las reservas comprometidas en el futuro, se utilizan los puntos operativos a la fecha del 01-01-2016. Para estos puntos operativos se debe determinar cuándo serán cerrados por ingreso de agua-barro, esta estimación se calcula construyendo un modelo de predicción de entrada de agua-barro basado en la técnica de regresión logística.

Para la construcción del modelo de regresión logística se utiliza la información y análisis de variables realizado previo a la construcción de un modelo multivariable de regresión logística. El modelo de

regresión logística para ingreso de agua-barro permite estimar la probabilidad de ingreso de agua-barro a los puntos de extracción.

Al implementar el modelo se puede estimar el tonelaje que será extraído de cada uno de los puntos de extracción previo al ingreso de agua-barro. Una vez definido el tonelaje al cual ingresa agua-barro, se calcula el tonelaje remanente que queda respecto a las reservas técnico-económicas que incluyen criterio de agua barro según DET de cada punto.

Por último, al tener el modelo de ingreso de agua-barro, se evalúa el PND 2016 y se determinan las reservas comprometidas por ingreso de agua-barro. Finalmente se suman los tonelajes remanentes de puntos cerrados por barro (según base de datos) y operativos (según modelo de predicción) para cada sector.

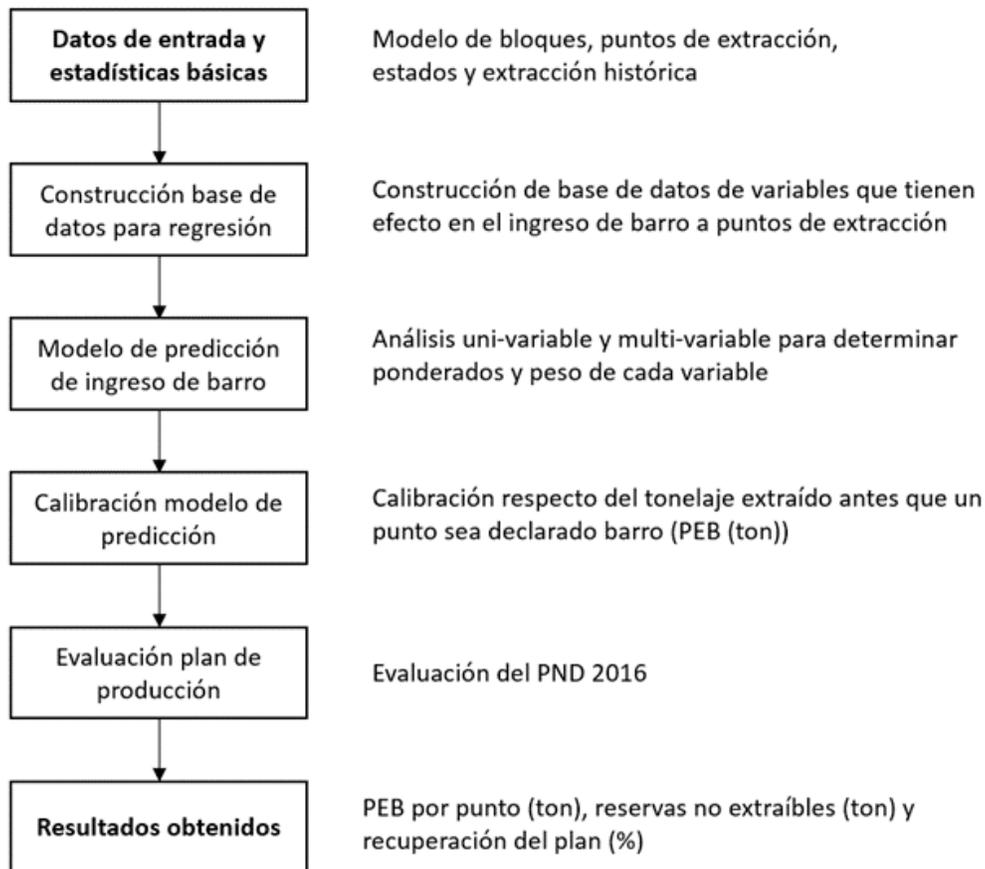


Ilustración 2 Metodología de trabajo

1.5 Contenido por capítulo

Los contenidos de esta investigación se discuten en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Corresponde a la introducción del trabajo, donde se exponen: motivación, objetivos, alcances y la metodología de investigación.

Capítulo 2: Son los antecedentes de esta investigación donde se explican los trabajos realizados a la fecha y los factores que influyen en el ingreso de agua-barro.

Capítulo 3: Se muestran los resultados del análisis de datos de los sectores RENO, DR y ES (B1)

Capítulo 4: Se detalla la metodología y construcción de bases de datos, y modelos de ingreso de agua-barro para los sectores RENO, DR y ES (B1).

Capítulo 5: Se presenta la evaluación del PND 2016 de DET y se estiman las reservas comprometidas por ingreso de agua-barro.

Capítulo 6: Conclusiones generales y recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo 2

2 Revisión Bibliográfica

2.1 Introducción

El Block/Panel caving y Sub level caving (SLC) son operaciones inherentemente susceptibles a bombeos o estallidos de agua-barro internos, porque tienen el potencial de acumulación de agua (superficial y subterránea), generan material fino (debido al proceso de fragmentación secundaria), y a través de las actividades de producción se proporcionan perturbaciones (Jakubec, 2012). Block/Panel caving también es susceptible a los flujos de barro externos debido a que su columna de material quebrado, conecta la superficie con las excavaciones subterráneas (punto de descarga).

Se definen bombeos como la entrada incontrolable de agua-barro en los trabajos subterráneos. Los bombeos ocurren con bastante frecuencia en las minas. Sin embargo, la mayoría de ellos son de poca importancia y no son potencialmente mortales. A pesar de esto, los bombeos o estallidos de agua-barro, han traído consecuencias fatales a los mineros. Estos sucesos suelen ser objeto de una investigación detallada, que a menudo han tenido consecuencias legales y financieras.

Aunque los bombeos son más comunes en las minas Block/Panel caving que en cualquier otro minas, cualquier actividad minera que permita la acumulación de partículas finas y agua, es susceptible a bombeos o estallidos de agua-barro. Hay casos de lesiones e incluso muertes causadas por las descargas de paso de mineral repentino.

2.2 Tipos de barro

Sobre la base de la movilidad del barro, existen dos categorías principales que se han reconocido: barro fluido y barro viscoso (Butcher, 2000).

2.2.1 Barro fluido

Barro fluido tiene un alto contenido de agua (sobre 50%), fluye horizontalmente grandes longitudes. El barro es uniformemente gradual e incluye grandes rocas de hasta 3 m de tamaño. El bombeo de barro en este caso se asemeja a una suspensión fina y generalmente es considerado más como una descarga de agua, que un flujo barro. Un ejemplo de bombeo fluido se muestra en la Ilustración 3.



Ilustración 3 Ejemplo de barro fluido

2.2.2 Barro viscoso

Un barro viscoso tiene bajo contenido de humedad (17-23 %). Por lo general, tiende a ser rígido. Este material no fluiría libremente por gravedad, pero si lo hará bajo esfuerzos y ciertas condiciones, esto podría hacer movilizar y expulsar el flujo de barro fuera de los puntos de extracción. Tal barro movilizado, a pesar de la alta viscosidad, puede ser destructivo y puede escurrir por alguna abertura disponible. Un caso de barro viscoso de muestra en la Ilustración 4.



Ilustración 4 Ejemplo de barro viscoso

El barro puede tener una consistencia distinta, es decir, es un fenómeno que puede tener orígenes muy diversos, pero puede producir los mismos resultados: lesiones, pérdida de vidas, daños a la propiedad, exceso de dilución, y retrasos en la producción o en el caso extremo, el cierre de minas.

2.3 Riesgos de ingreso de agua-barro

Bombes de barro pueden y han planteado un peligro considerable para la seguridad en la minería subterránea. La rapidez del flujo de lodo es tal que el escape de personal en su trayectoria es muy poco probable, con terribles consecuencias para la seguridad.

Los mecanismos de activación y señales de advertencia son en general bastante bien entendidos (Butcher, 2000, 2005; Brown, 2007), la predicción precisa de la hora exacta y la ubicación de un escurrimiento o ingreso abrupto de barro, no es posible determinar.

Uno de los peligros potenciales que deben ser evaluados durante un estudio de la minería caving es el de ingreso de agua-barro. Debido a la compleja naturaleza de los materiales que se presentan en estos sucesos, la dinámica del caving y la distribución del agua dentro de la columna de quebrado, hace muy difícil predecir sucesos como bombeos una vez que el barro se ha formado.

El fenómeno de ingreso de agua-barro en labores mineras, es un evento que se ha ido repitiendo en varias minas a través del mundo, a continuación se señalan minas que han sido afectadas por ingreso de agua-barro.

Tabla 2 Faenas mineras que han presentado ingreso de agua-barro en el mundo

Faena	ubicación	Descripción
Kimberley y De Beers	Sudáfrica	Son minas de diamantes donde se produce agua-barro debido a la mezcla de Kimberlita que contiene arcillas y esquistos, con agua proveniente de lluvias, con esta mezcla se forma barro. El ingreso del agua es a través de una operación a cielo abierto ubicada en la superficie
Ue	Zambia	Es una mina que se explotó bajo Block Caving y posteriormente mediante Sublevel Caving. Se produjo una irrupción de relaves en la mina. En este ingreso de barro, 89 personas murieron. Fleischer (1976) plantean la hipótesis de que una capa de arcilla debajo de la presa puede haber actuado como base flexible y haber provocado un cierto grado de deformación del terreno. La amenaza de una oleada de barro debido a residuos no sólo proviene de los barros, sino que también se puede atribuir a la falta de relleno subterráneo.
Dutoitspan Mine	Sudáfrica	Mina explotada mediante Sulevel caving, un impulso importante de barro se produjo en el nivel 870 m de producción, en noviembre de 2011, durante el cual se estima que más de 4.400 m ³ de barro ingresaron en las labores mineras. El barro debe haber venido de relativamente alto de la columna. Algunas de las causas encontradas fueron que las galerías de drenaje superficial no estaban bien cuidadas y / o bloqueadas, había un pobre control en las aguas superficiales de la mina en el área de la planta y filtración de aguas subterráneas en los pozos.
Hubei	China	En una mina SLC de mineral de hierro en China, en la provincia de Hubei, experimentó un bombeo devastador en 2004, lo que resultó en al menos una víctima mortal. Una característica interesante es que la masa de roca de la minera de hierro es muy competente y no genera finos

		excesivos, prácticamente no posee arcillas. En 1998, esta región experimentó eventos extremos de lluvia e inundaciones. Lo más probable, finos (y posiblemente arcillas) generados desde el cráter se desplazaron en la columna de extracción en ese momento y provocaron el evento de ingreso de barro.
IOZ y DOZ	Indonesia	PT Freeport Indonesia opera un complejo minero de cobre y oro en el distrito minero de Ertsberg de las montañas Sudirman en la provincia de Papúa, Indonesia a una elevaciones de 3000 a 4500 metros sobre el nivel del mar. El yacimiento Deep Zone (DOZ) es la tercera mina panel caving en el Sistema Ertsberg Medio skarn (SETS) después de Gunung Timur Bijih (GBT) y la zona de mineral Intermedio (IOZ). Características geológicas e hidrológicas complejas, escarpada topografía montañosa en el hundimiento, la precipitación promedio anual de 5500 mm. Estas altas precipitaciones, sumado al material fino generado por el método de Block Caving ha generado una gran cantidad de ingreso de agua-barro.
El Teniente	Chile	El Teniente es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta. Está ubicado en la comuna de Machalí, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, a 50 kilómetros de la ciudad de Rancagua. Mezcla de agua proveniente de deshielos y los finos generados por el hundimiento, asociado a sobre tiraje, son las principales causas de bombeos. Se han registrado una serie de eventos de este tipo, incluso provocando la muerte de personas.

2.4 Control sobre minas que han presentado ingreso de agua-barro en sus yacimientos.

Debido a que diferentes minas han presentado ingreso de agua-barro, estas han tomado diferentes medidas para combatir este fenómeno. A continuación se muestran algunas soluciones que se han implementado en diferentes lugares.

2.4.1 En Kimberley- Wesselton (Sudáfrica)

El problema de ingreso del barro comenzó a combatirse mediante el aumento de drenaje con la construcción de túneles (Butcher, 2000). Estas excavaciones se iniciaron en 1891.

Estos túneles eran sólo un éxito parcial, ya que no impedían que el agua de lluvia llegue a los botaderos.

2.4.2 En Dutoitspan mina

El desarrollo de un sistema de galerías de drenaje se inició en 1908, con la necesidad de impedir la entrada de agua-barro. Dos túneles de drenaje fueron desarrollados inicialmente a 20 m y 45 m de la superficie, y estos túneles fueron relativamente exitosos en la reducción de la frecuencia de ingreso de barro.

2.4.3 La mina Padcal

Para operar con un menor riesgo de bombeos se propuso rellenar la cavidad sobre el nivel de desagüe natural hacia una quebrada, para evitar el ingreso de agua lluvia a la zona de subsidencia. La operación de relleno es ejecutada permanentemente, operando con equipos livianos en la cavidad. La práctica ha permitido evitar la ocurrencia de bombeos, aun cuando no elimina el ingreso de agua al material fragmentado (NCL, 2010).

2.4.4 Kimberley minas subterráneas JV

Tiene como medidas para combatir bombeos de barro (Butcher, 2000):

- Asegurar perfiles de tiraje uniforme, lo que aumenta las posibilidades de evitar el ingreso de agua-barro y la planificación debe incorporar los criterios hidrogeológicos en el cálculo de reservas.
- No deben permitirse tasas de extracción altas ya que generan una extracción irregular y a menudo puntos aislados que provocan la ocurrencia de estos eventos.

2.4.5 PT Freeport Indonesia

El manejo de barro húmedo en las tres minas Panel Caving (GBT, IOZ, y la mina DOZ) ha proporcionado información valiosa para el desarrollo del procedimiento y la mitigación de los problemas actuales de agua-barro. Este procedimiento actual ha considerado temas críticos relacionados con la seguridad, tales como:

- Clasificación de agua-barro y su requerimiento de manipulación (fragmentación, la humedad, y el tipo de cargador requerido) según la matriz de clasificación que se muestra en Tabla 3.

• *Tabla 3 Clasificación de puntos de extracción en mina DOZ*

Wetness/Water content	Material size ≥ 5 cm (M)		
	M > 70% (dominated by coarse grain)	30% < M \leq 70%	M \leq 30% (dominated by fine grain)
< 8.5% (dry)	A1	B1	C1
8.5 - 11%	A2	B2	C2
\geq 11% (wet)	A3	B3	C3

Note:
 Green box: any loader
 Yellow box: any loader with close supervision
 Red box: remote loader
 For Class B2 and A3, HOD/Fragmentation information is critical to consider surely

- Inspección visual más frecuente ya que la mayoría de los ingresos de agua-barro proceden de los puntos de extracción que se identificaron previamente como posible ingresos de agua-barro mediante inspección del ingeniero.
- Elaboración de drenaje en puntos de agua-barro.
- Más capacitación a los mineros, supervisores e ingenieros sobre las condiciones indicadoras de barro húmedo.
- Un "comité de agua-barro" que consiste en personas con diferentes conocimientos técnicos para revisar, trabajar juntos y tomar decisiones relacionadas con las problemáticas de agua-barro.

2.4.5.1 *Infraestructura y equipamiento adicional*

Medidas tales como cargadores de telecomando adicionales y un sistema de carga completamente automático se han puesto en marcha para mejorar la infraestructura y equipos para el manejo de barro.

2.4.5.2 *Potencial de Aplicación de Tecnología Avanzada*

Uno de los retos geotécnicos es cómo determinar y cuantificar los cambios de agua perjudiciales dentro de la columna de quebrado. Gracias a una mejor comprensión de la condición del agua dentro de la columna, debería ser posible obtener información crítica para evaluar los posibles ingresos de agua-barro. Monitoreo remoto en tiempo real podría observar los cambios de agua dentro de puntos de extracción.

2.4.5.3 *Programa de Drenaje Continuo*

El programa de perforación de drenaje en los últimos años en la periferia de la mina DOZ ha mostrado resultados prometedores.

2.4.5.4 *Seguimiento constantes precipitaciones*

Con el fin de aumentar el conocimiento de los efectos de los períodos de alta precipitación sobre los posibles eventos de agua-barro, un sistema de alerta se ha introducido en la sala de control que destaca los periodos críticos de lluvia.

2.4.6 *División El Teniente*

El yacimiento El Teniente es un mega depósito tipo pórfido cuprífero con leyes económicas de cobre y molibdeno, emplazado en rocas volcánicas de la Formación Farellones.

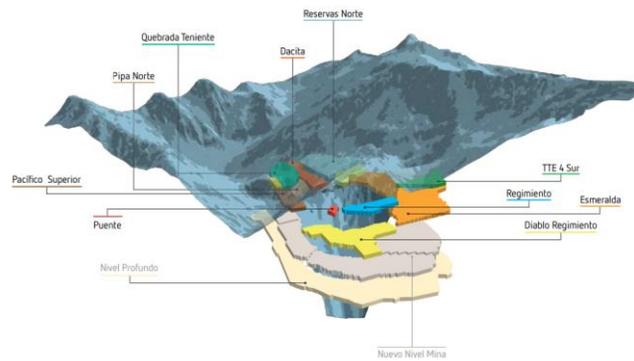


Ilustración 5 Yacimiento El Teniente

En la zona se presenta un clima mediterráneo, con veranos cálidos y secos e inviernos lluviosos, frescos y húmedos, los cuales poseen variaciones por el efecto de la altura.

Las precipitaciones en la zona fluctúan entre 700 mm y 1400 mm al año, estas lluvias son concentradas en los meses de mayo, junio y agosto. Dentro de los fenómenos que afectan la zona donde se ubica la faena, se presentan riesgos geológicos producto de la fisiografía de la zona y las condiciones climáticas resultantes de las altas precipitaciones. Las temperaturas aumentan el caudal de agua de los cauces, siendo así, afectados principalmente por aluviones.

2.4.6.1 Condiciones Superficiales

El yacimiento está conformado por un cuerpo geológico que tiene la forma de un cono o pipa de mineral, el cual no posee valor económico. Sin embargo, alrededor de éste hay importante mineral.

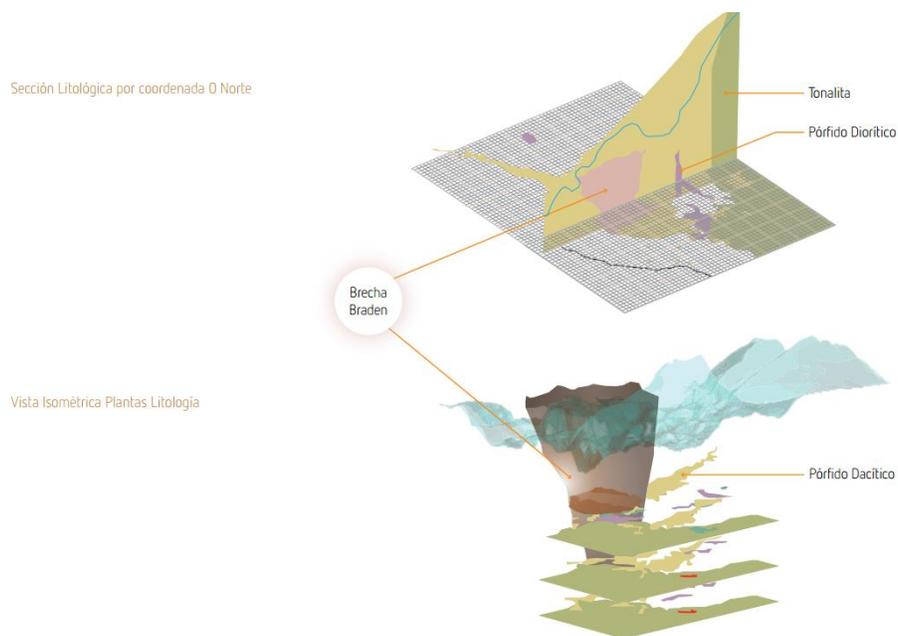


Ilustración 6 Superficie mina El Teniente

2.4.6.2 Parámetros hidrogeológicos

En los actuales sectores productivos de la mina El Teniente se encuentran intervenidas por las cuencas hidrológicas de Quebrada Diablo y Quebrada Teniente, situadas al sur y al norte del yacimiento, respectivamente. La cuenca Quebrada Diablo abarca una superficie de 7.2 km² y se extiende entre un rango aproximado de los 2100 msnm a 3700 msnm, drenando hacia el oeste hasta conectar con la Quebrada Teniente al sur de Sewell.

El cráter de subsidencia que se genera en la zona de explotación, permite la disposición para el desarrollo y la intercepción de la cuenta Quebrada Teniente, de esta forma se captan de manera directa las aguas provenientes de las zonas superiores, ya sean subterráneas o superficiales.

El avance del cráter va incidiendo en la interacción con los sectores adyacentes, debido a que la subsidencia se acerca a la división de las aguas que están limitadas en el este por la cuenca Quebrada Los Puquios. Lo anterior implica la incorporación de nuevos drenajes hacia el interior de la mina.

Dentro de las actividades realizadas para el control hidrogeológico, se tiene el desarrollo de mediciones de los niveles freáticos desde el 2005, además se habilitaron siete pozos en la Quebrada Teniente y tres en la Quebrada Coya. Conjuntamente estudios el 2006 concluyen que el nivel freático de la Quebrada Teniente aumenta hasta 20 m durante las estaciones del año de deshielo, alcanzando su máximo valor en el mes diciembre, mientras que por su parte la Quebrada Diablo indica que las profundidades máximas de los niveles freáticos varían entre 18 m a 172 m. El monitorio realizado en la Quebrada Coya indica que los niveles se mantienen relativamente constantes.

En los últimos años se han registrado varios eventos de bombeos en división El teniente, teniendo incluso consecuencias fatales. En la siguiente tabla se presenta un resumen de los eventos de bombeos registrados:

Tabla 4 Bombeos ocurridos en DET

Sector	Fecha	Tipo de Barro
Teniente 4 Norte	Sep - 1989	Acuoso
Teniente Sub 4 Dacita	Dic - 1995	Acuoso
Teniente 6 Quebrada Teniente	Oct - 1999	Acuoso
Teniente 4 Regimiento	Oct - 2007	Pastoso
Teniente 6 Quebrada Andes	May - 2008	Acuoso
Teniente 6 Pipa Enlace	May - 2009	Acuoso
Teniente 6 Recursos Norte	Mar - 2010	Acuoso
Teniente Sub5 Esmeralda Sur	Dic - 2015	Acuoso

Para poder combatir los riesgos de bombeos La División ha determinado limitar la extracción para los puntos que registran humedad, dichos puntos tienden a terminar cerrados por ingreso de agua barro a la columna, es decir, con ello se termina la extracción del punto lo que implica pérdidas de las reservas en la columna. Estas medidas consideradas implican pérdidas económicas y seguridad.

2.4.6.3 Clasificación de puntos de extracción

Una de las medidas adoptadas por DET, ha sido la clasificación de los puntos de extracción en función de la granulometría y humedad presente en el punto, algunos de estos estados son:

Puntos de extracción Limitados: Punto con extracción restringida a un tonelaje máximo para un periodo determinado.

Puntos de extracción Barrera: Punto que debido a la penetración de agua y material fino presenta riesgo de bombeo.

Puntos de extracción Agua-Barro: Punto que debido a la penetración de agua y material fino presenta riesgo de bombeo.

La declaración anterior de los estados de los puntos se basa en humedades cualitativas (H0, H1, H2, H3, H4, A) y porcentaje de granulometría fina (G(x)) como se muestra en la Tabla 5. Estos parámetros son recolectados en terreno diariamente.

Tabla 5 Matriz de criticidad utilizada en DET

MATRIZ DE CRITICIDAD		G(x): Granulometría fina (menor a 25 cm)			
		G(x) < 25%	25% ≤ G(x) < 50%	50% ≤ G(x) < 75%	G(x) ≥ 75%
Humedad cualitativa	H0: Seco	Normal	Normal	Normal	Normal
	H1: Levemente húmedo	Normal	Normal	Observación	Observación
	H2: Húmedo	Normal	Observación	Alerta	Alerta
	H3: Barro incipiente	Observación	Alerta	Alerta	Alerta
	H4: Barro	Alerta	Alerta	Alerta	Alerta
A: Agua		Normal	Observación	Alerta	Alerta

Normal
 Observación
 Alerta

Tabla 6 Comentarios de la escala de colores de la matriz de criticidad

Leyenda		Comentario
	Normal	Humedad y granulometría favorable para la continuidad operacional.
	Observación	Observación de la evolución de humedad y granulometría.
	Alerta	Alerta por la condición de humedad y granulometría

De reconocer un punto de extracción en alerta, se debe considerar la matriz de criticidad como una referencia, la cual debe ser respaldada además con inspección a terreno por personal técnico (Operaciones, Geólogos de Producción, Planificadores y Jefe Control Producción Mina), muestreo por humedad cuantitativa (laboratorio), análisis de porcentaje de extracción y/o interacción del punto de extracción con sectores abandonados que tengan un historial de presencia de humedad y porcentaje de material quebrado, para ser abandonados definitivamente en estado Agua-Barro.

2.4.6.4 Estrategia de planificación

La Superintendencia de Gestión Producción SGP (corto plazo) y la Superintendencia de Planificación de Largo Plazo SPL (largo plazo) han tomado medidas con el objetivo de evitar la aparición repentina y expansión del barro en los sectores con riesgo.

Como una medida adoptada de largo plazo, se ha limitado la velocidad de extracción [t/m^2 -día] de puntos que alcancen un 130% de extracción de la columna de mineral primario. Una vez que el punto supera su etapa de quiebre (extracción<30%) este pasa a su etapa de régimen (extracción>30%). En la etapa de régimen, se planifica para el punto una velocidad de 1 [t/m^2 -día]. Una vez que el punto alcanza una extracción del 130%, la velocidad asignada al punto disminuye a la mitad, 0,5 [t/m^2 -día]. Esta estrategia de planificación supone que limitar la velocidad de extracción de puntos que ya han extraído su columna de primario (>130%), retrasaría el ingreso de barro a puntos con menor porcentaje de extracción. Esto supone que los puntos con extracción superior al 130% están extrayendo mineral secundario o quebrado, materiales acumuladores de agua (González, 2014) y este podría moverse de manera lateral a otros puntos.

La estrategia adoptada en el corto plazo consiste en la definición de estados para puntos de extracción. Cada estado se caracteriza por tener una velocidad de extracción restringida y encontrarse en las cercanías de un punto con barro.

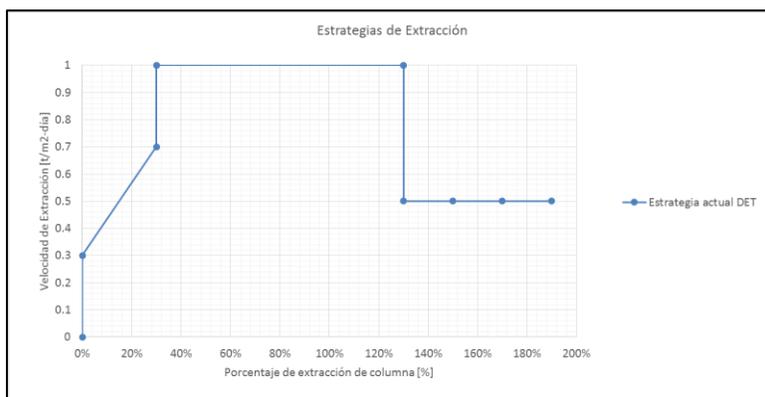


Ilustración 7 Estrategia de extracción DET. Limitación de la velocidad de extracción de puntos cuando alcanzan un 130% de extracción de la columna de primario.

2.4.6.5 Análisis general del ingreso de agua-barro en Mina Diablo Regimiento

Un estudio centrado en la mina Diablo Regimiento fue desarrollado por Navia (2014), donde realizó un análisis de ingreso de agua-barro en este sector. En primer lugar se cuantifican las reservas comprometidas por ingreso de agua-barro, considerando dos casos, el primero fue considerar los puntos de extracción cerrados por ingreso de agua-barro hasta Noviembre de 2013, y un segundo caso donde se incluye además los puntos que se ubican bajo la zona de riesgo, para una ley de corte de 0,5 y 0,4% de CuT. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 7 Potencial económico de mineral saturado remanente y mineral saturado potencialmente extraíble en sector DR (Navia, 2014)

Consideraciones	Mineral (Mt)	Ley (% CuT)	Tiempo de producción a 25 Kt/d (años)
Mineral saturado remanente respecto a reservas estimadas a principio del año 2013 determinadas por ley de corte optima	4,4	0,72	0,5
Mineral saturado remanente respecto a altura marginales; ley de corte 0,5% de CuT	18,8	0,63	2,1
Mineral saturado remanente respecto a altura marginales; ley de corte 0,4% de CuT	26,6	0,57	3

Las leyes de cierre de puntos que pasaron a estado agua-barro, son superiores a las leyes comunes de cierre de puntos por agotamiento. Por lo que el remanente que se deja de extraer posee un interés económico para DET.

El ingreso inicial de agua-barro en ciertos puntos ocurrió una vez que se extrajo una altura similar a la altura de columna in situ.

Navia, plantea la existencia de puntos precursores, es decir, se observa un ingreso inicial a puntos que luego son fuente de barro para sus vecinos (migración lateral). Los puntos precursores tienen una relación con la estrategia de caving, es decir, la aparición de agua-barro fueron en su mayoría los primeros puntos de extracción que conectaron con los sectores antiguos.

Al estudiar la evolución de perfiles de alturas extraídas, se observa que existió un tiraje mayormente irregular en el sector. Cuando los puntos de extracción cambia a estado agua-barro, la irregularidad en el tiraje aumenta, por lo tanto, se crea una zona de flujo preferencial de agua-barro hacia sus vecinos. Las razones de la migración lateral de agua-barro corresponden a aplicación de tasas de extracción mayores a la vecindad de un punto que ya contiene agua-barro.

2.4.6.6 Análisis general del ingreso de agua-barro en Mina Reservas Norte

Un estudio centrado en la mina Reservas Norte fue desarrollado por Lara (2014), donde realizó un análisis de ingreso de agua-barro en este sector. En primer lugar se cuantifican las reservas comprometidas por ingreso de agua-barro, considerando dos casos, el primero fue considerar los puntos de extracción cerrados por ingreso de agua-barro hasta Noviembre de 2013, y un segundo caso donde se incluye además los puntos que se ubican bajo la zona de riesgo, para una ley de corte de 0,5 y 0,4% de CuT. La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos. Como resultado se obtiene:

Tabla 8 Potencial económico de mineral saturado remanente y mineral saturado potencialmente extraíble en sector RENO (Lara, 2014)

Consideraciones	Mineral (Mt)	Ley (% CuT)	Tiempo de producción a 25 Kt/d (años)
Mineral saturado remanente respecto a reservas estimadas a principio del año 2013 determinadas por ley de corte optima	8,97	0,91	0,7
Mineral saturado remanente respecto a altura marginales; ley de corte 0,5% de CuT	17,79	0,85	0,92
Mineral saturado remanente respecto a altura marginales; ley de corte 0,4% de CuT	13,38	0,8	1

También se calculó las reservas remanente de puntos con alta probabilidad de ingreso de barro, al ubicarse bajo zonas de riesgo de ingreso de agua-barro, esta área está situada bajo labores antiguas superiores ya explotadas del nivel Teniente 5, que durante su operación sufrieron problemas de ingreso de agua-barro. Se supone que todos los casos cumplen una extracción de 300 metros. Como resultado se obtuvo

Tabla 9 Reservas remanentes potencialmente extraíbles de puntos con alta probabilidad de ingreso de agua-barro al estar bajo zonas de riesgo (Lara, 2014)

Consideraciones	Mineral (Mt)	Ley (% CuT)	Tiempo de producción a 25 Kt/d (años)
Mineral saturado remanente respecto a alturas marginales; ley de corte 0,5% de CuT	4,45	0,57	0,35
Mineral saturado remanente respecto a alturas marginales; ley de corte 0,4% de CuT	5,78	0,53	0,45

El 80% de los puntos en sector RENO, fueron cerrados con leyes superiores al 0,8% de CuT, lo que corresponde a leyes mayores a las leyes de corte del sector (entre 0,4 y 0,5% CuT).

Lara en su estudio plantea que el origen del barro en sector proviene de labores antiguos de RENO, luego de conectar, éste se propaga en sentido del avance de la frente de hundimiento.

Respecto a las precipitaciones, se demuestra que no existe una relación entre el cierre de puntos y la Estación del año de deshielos.

Los puntos de extracción que se encuentran situado bajo sectores antiguos en presencia de agua-barro, presentan ingreso de agua-barro, sin embargo esta situación puede retardarse si se cumple regularidad en la extracción

Las estrategias de extracción implementadas desde el 2010 generan un leve estancamiento en la declaración de puntos como agua-barro, pero luego sigue aumentando, lo que puede atribuirse a que las tasas de extracción impuestas por planificación no son aplicadas totalmente en la operación.

El sobre-tiraje guarda relación principalmente con la disponibilidad de área del sector Reservas Norte, ya que al incorporar puntos de extracción en forma de escalera, para evitar pandeos en la

frente, se pierde flexibilidad en la extracción de la operación. Por otro lado se tienen 3 líneas de puntos limitados, lo que dificulta la producción y a veces con tal de cumplir las metas productivas se extraen a mayores velocidades que las permitidas por planificación.

En cuanto a la comparación de la situación de barro entre Reservas Norte y Diablo Regimiento, se concluye que:

En ambos casos se determinó que el ingreso del barro fue causado al conectar con labores antiguas concentradoras de barro histórico. Los primeros puntos de ingreso de agua-barro se encuentran situados bajo estas labores antiguas.

La propagación del barro se debe a la generación de planos preferenciales de flujo causado por el cierre de 1 o más puntos de la vecindad.

El canalón central produce flujos preferenciales de ingreso de agua en Estación del año de deshielos hacia zonas ubicadas bajo él.

2.5 Conclusiones del capítulo

Al revisar lo que existe en la literatura sobre agua-barro, se pueden identificar aspectos importantes relacionados con el ingreso de este:

El Block/Panel caving y sub level caving (SLC) son operaciones inherentemente susceptibles al ingreso de agua-barro, por lo que el riesgo de agua-barro en este tipo de minería debe ser considerado tanto en el diseño como la planificación minera.

Las principales variables que se involucran en el ingreso o de agua-barro son la sobre extracción, tamaño del mineral, humedad, velocidad de extracción y altura de columna in-situ extraída.

La política de cierre de puntos de extracción por registro de agua-barro en DET, si bien busca resguardar la seguridad de las personas, está provocando pérdida de valiosas reservas, lo que hace disminuir la recuperación. El cierre de esos puntos de extracción provoca un tiraje menos uniforme lo que genera condiciones para ingreso de agua-barro.

Respecto a DR de DET se identificó dos mecanismos de ingreso de agua-barro, uno de ingreso vertical o precusores, que generalmente son puntos de extracción situados bajo un sector que presentó agua-barro y el otro mecanismo es de tipo lateral, es decir, el barro de un punto de extracción bajo mecanismo vertical crea un flujo preferente de barro hacia sus vecinos.

El canalón central de DET produce flujos preferenciales de ingreso de agua en la época de deshielos hacia zonas ubicadas bajo él.

Conforme a lo presentado en la revisión bibliográfica a continuación se muestran las variables que pueden afectar en el ingreso de agua-barro y también se comenta el comportamiento esperado.

Tabla 10 Resumen de variables que influyen en ingreso de agua-barro.

Variable	Tipo	Comportamiento esperado
Altura de columna primario [m]	Entorno	A mayor altura de primario menor riesgo de ingreso de agua-barro
Altura de columna in-situ [m]	Entorno	A mayor altura in-situ menor riesgo de ingreso de agua-barro
Altura a topografía [m]	Entorno	A mayor altura a topografía menor riesgo de ingreso de agua-barro
Razón de extracción de columna in-situ [%]	Operacional	A mayor razón de extracción de columna in-situ mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Uniformidad [%]	Operacional	A mayor uniformidad menor riesgo de ingreso de agua-barro
Velocidad de extracción [t/m ² -día]	Operacional	A mayor velocidad de extracción mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Estación del año	Entorno	Al estar en época de deshielo mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Bajo zona de riesgo	Entorno	A estar bajo zona agua-barro mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Drenaje [m ³]	Operacional	A mayor volúmenes de agua drenada menor riesgo de ingreso de agua-barro
Granulometría (un)	Entorno	A mayor presencia de finos en punto de extracción mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Humedad (un)	Entorno	A mayor humedad en punto de extracción mayor riesgo de ingreso de agua-barro
Vecino Barro (un)	Entorno	Al tener vecinos declarados agua-barro hay mayor riesgo de ingreso de agua-barro

Capítulo 3

3 Análisis de datos de los sectores RENO, DR y ES (B1)

3.1 Introducción

En el presente capítulo se presenta el análisis estadístico de ingreso de agua-barro en los sectores Reservas Norte, Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1. En específico, se detalla el comportamiento de ingreso de agua-barro bajo diferentes condiciones, tales como, estación del año o bajo zonas de riesgo. Se muestran las diferencias que poseen los puntos de extracción que presentan registro de agua-barro versus los que aún no se encuentran bajo esta condición.

3.2 Declaraciones de ingreso de agua-barro en sectores analizados

Diferentes puntos de extracción presentan múltiples declaraciones de ingreso de agua-barro, por esto se define la primera fecha de ingreso de agua-barro registrada dentro de los antecedentes como el evento a predecir. Como ejemplo, en el caso mostrado en Ilustración 8, el dato utilizado para efectos del estudio, considera como fecha de ingreso de agua-barro el período donde se alcanza 26.000 toneladas extraídas, es decir, la primera fecha de declaración de barro y no la segunda declaración, que fue cuando se habían extraído 28.000 toneladas.

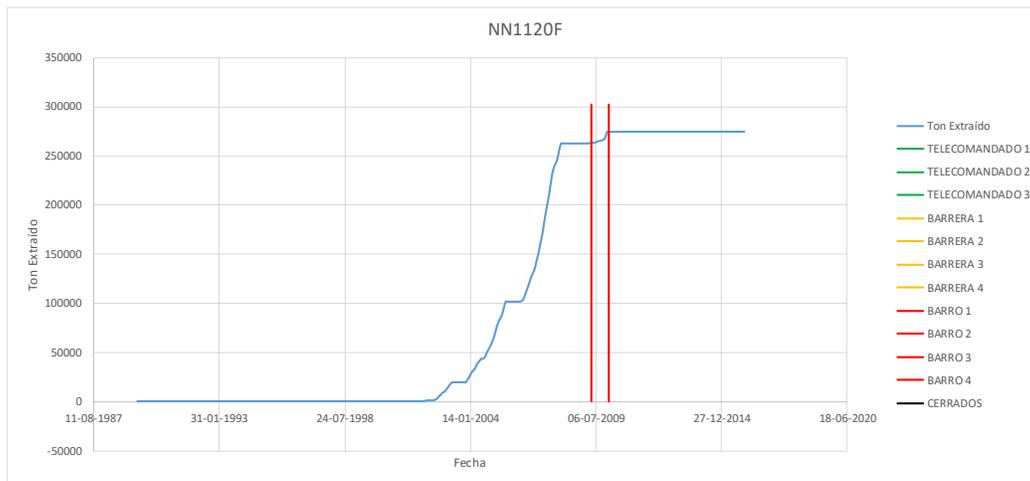


Ilustración 8 Punto 1120F del sector RENO con dos declaraciones de barro.

Los tres sectores en estudio, Reservas Norte, Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1 presentan más de una declaración de ingreso de agua-barro. Del Sector RENO, 139 puntos de extracción presentan más de una declaración de agua-barro, estos puntos presentan en promedio 2.4 ± 0.7 registros de estado agua-barro.

En el caso de Diablo regimiento se presentan 39 puntos de extracción con más de una declaración de agua-barro, estos puntos poseen en promedio 2.4 ± 0.7 registros de este estado y en Esmeralda Bloque 1 se tienen 9 puntos con más de una declaración de agua-barro, estos puntos tienen en promedio 2.1 ± 0.34 declaraciones.

En algunos casos se observa que para los puntos de extracción que presentan más de una declaración de ingreso de agua-barro, tienen extracción entre registros, estos resultados se aprecian en la Tabla 11.

Tabla 11 Comparación de tonelaje extraído entre primera y última declaración de ingreso de agua-barro para sectores ES (B1), DR y RENO.

Sector	Tonelaje acumulado promedio extraído en primera declaración de ingreso de agua-barro (ton)	Tonelaje acumulado promedio extraído en última declaración de ingreso de agua-barro (ton)	Diferencia de tonelaje promedio entre última y primera declaración de ingreso de agua-barro (ton)
ES (B1)	124.643 ± 41.259	124.643 ± 41.259	0
DR	183.138 ± 42.732	186.308 ± 41.388	3.170 ± 10.921
RENO	136.032 ± 101.127	169.807 ± 97.976	33.775 ± 64.773

Como se aprecia en la Tabla 11, la diferencia de tonelaje que presenta el sector Reservas Norte entre la primera y última declaración de ingreso de agua-barro es considerable.

Debido a la gran cantidad de puntos declarados agua-barro en el sector Reservas Norte (139 puntos de extracción registran más de una declaración de barro) y la gran cantidad de mineral extraído entre la primera y última declaración de agua-barro, es que para este sector se estudia la última declaración de ingreso de agua-barro.

Otro factor para esta decisión es la antigüedad de la mina, el sector RENO comenzó su extracción en 1989, tiempo en el cual las políticas de cierre de los puntos de extracción no eran las mismas que las actuales. En la Tabla 12 se muestra la cantidad de registros agua-barro para cada uno de las situaciones en análisis.

Tabla 12 Número de declaraciones de agua-barro

Sector	Número de datos de declaraciones de barro
DR	157
RENO	263
B1 de ES	29

Los sectores de Reservas Norte y Diablo Regimiento fueron utilizados por División El Teniente para realizar pruebas de extracción de mineral saturado mediante equipos telecomando. En la Ilustración 9 e Ilustración 10 se muestran dos puntos de extracción de extracción (DR2328H y NN1016H) que fueron utilizados para esas pruebas.

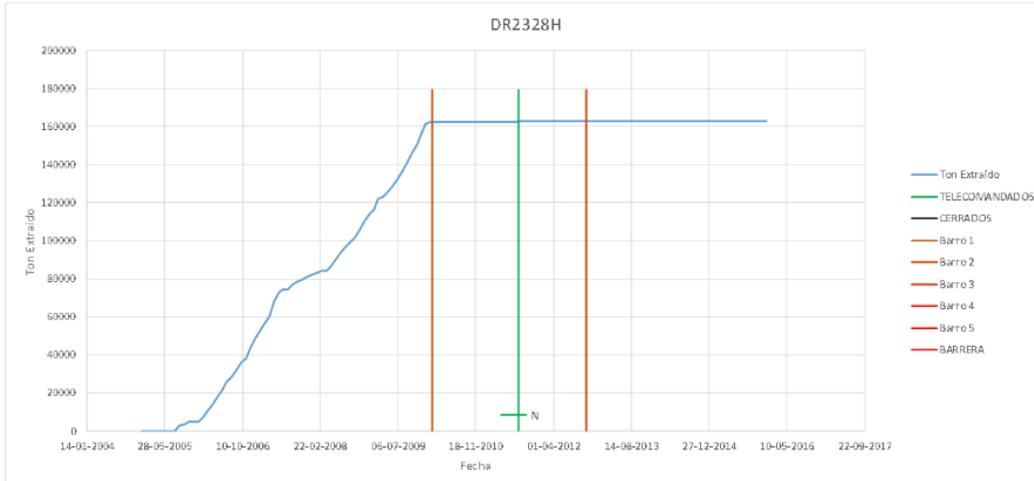


Ilustración 9 Punto 2328H del sector DR con extracción mediante equipo telecomando.

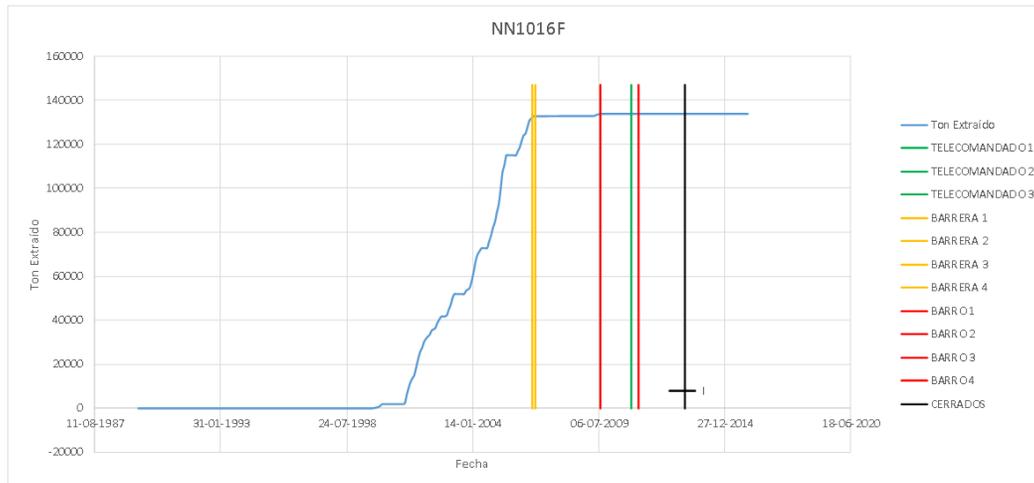


Ilustración 10 Punto 1016F del sector DR con extracción mediante equipo telecomando.

Las pruebas de equipos telecomando en el sector RENO se realizaron entre Agosto de 2010 a Febrero de 2012. En el caso de Diablo Regimiento se efectuaron entre Agosto de 2011 a Octubre de 2012.

Al estudiar la primera declaración de ingreso de agua barro en el sector DR, se obtiene, según la base de datos, que el 100% de estos puntos no se encuentra en zonas de prueba de equipos telecomandos.

Al evaluar la última declaración de ingreso de agua-barro en el sector RENO, se tienen que 10 puntos de extracción son declarados en estado agua-barro cuando estos están siendo extraídos por un equipo telecomando o un punto vecino se encuentra en extracción bajo esta condición. Por lo tanto, de los 273 puntos de extracción con registro de ingreso de agua-barro para su última declaración, se utilizan para este estudio 263.

Esto debido a que se pretende evaluar el ingreso de agua-barro para puntos con LHD de extracción manual. El que un punto presente extracción mediante equipo telecomando genera diferentes condiciones, por ejemplo, una velocidad de extracción menor o la extracción de un punto con barro actúa como drenaje lo que proporciona diferentes condiciones tanto para el punto de extracción como para sus vecinos.

3.3 Variables consideradas en el análisis estadístico

El análisis estadístico busca mostrar la relación que tienen las siguientes variables con el fenómeno de ingreso de agua-barro.

1. Porcentaje de extracción de columna in-situ a la cual un punto se declara en estado agua-barro, según la base de datos y estados. Se denomina PEB%.
2. Altura de la columna de mineral primario sobre cada punto de extracción (m).
3. Altura de la columna in-situ sobre cada punto de extracción (m).
4. Altura desde un punto de extracción a la topografía (m).
5. Estacionalidad, la que indica si un punto de extracción fue declarado en estado barro en las estaciones de precipitaciones (Invierno-Otoño) o deshielo (Primavera-Verano).
6. Vecino Barro, indica si un punto al momento en que es declarado barro ya tenía un punto en su vecindad (6 puntos) con estado barro.
7. Bajo canalón.

Una vista en general de DET que indica la disposición de los sectores analizados se muestra en la Ilustración 11.

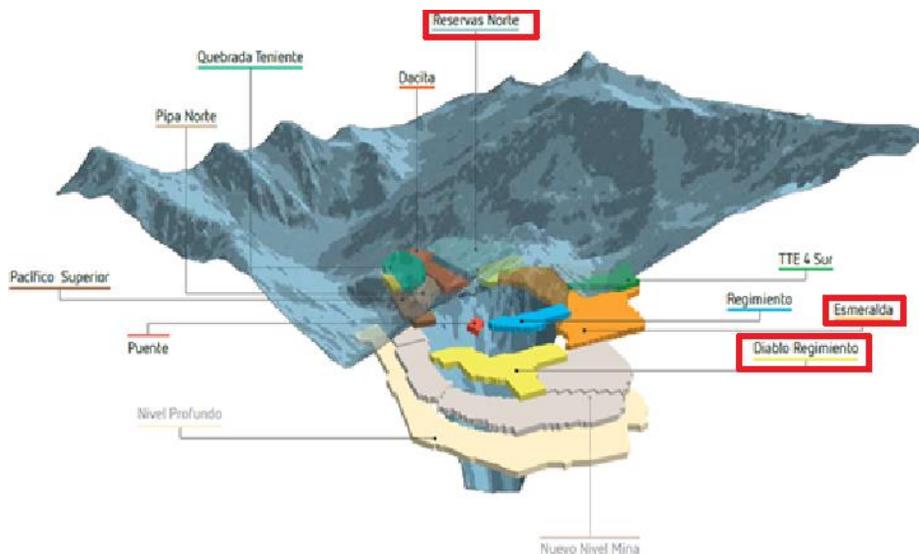


Ilustración 11 Ubicación de espacial de minas Esmeralda, Diabolo Regimiento y Reservas Norte.

3.4 Análisis altura de roca primaria

Para el desarrollo del estudio de altura de primario se utilizó el modelo de bloques entregado por DET, correspondiente a la fecha de febrero del año 2016. En esta sección se muestra la frecuencia relativa de la altura de roca primaria de los puntos de extracción con registro de agua-barro.

En la Ilustración 12 se muestra el histograma de frecuencia relativa de altura de roca primaria para aquellos puntos registrados con ingreso de agua-barro en sector Diablo Regimiento, se aprecia que el 93% de estos untos poseen una altura de primario entre 100-150 metros.

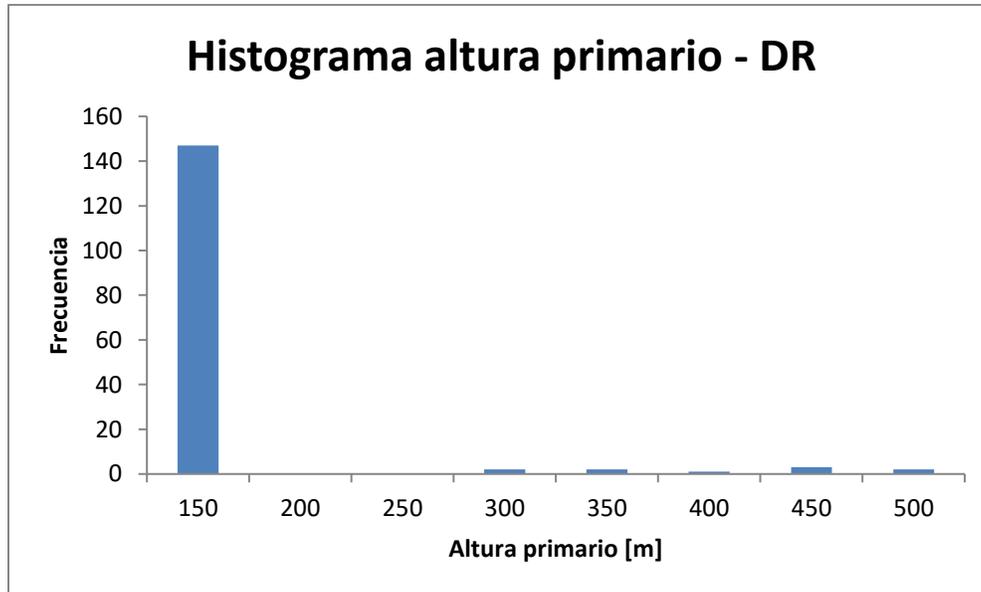


Ilustración 12 Histograma de altura de roca primaria para puntos de extracción declarados agua-barro, sector DR

En la Ilustración 13 se presenta el histograma de frecuencia relativa de altura de roca primaria para aquellos puntos registrados con ingreso de agua-barro en sector Reservas Norte, se aprecia que el 80% de estos untos poseen una altura de primario entre 150 200 metros.

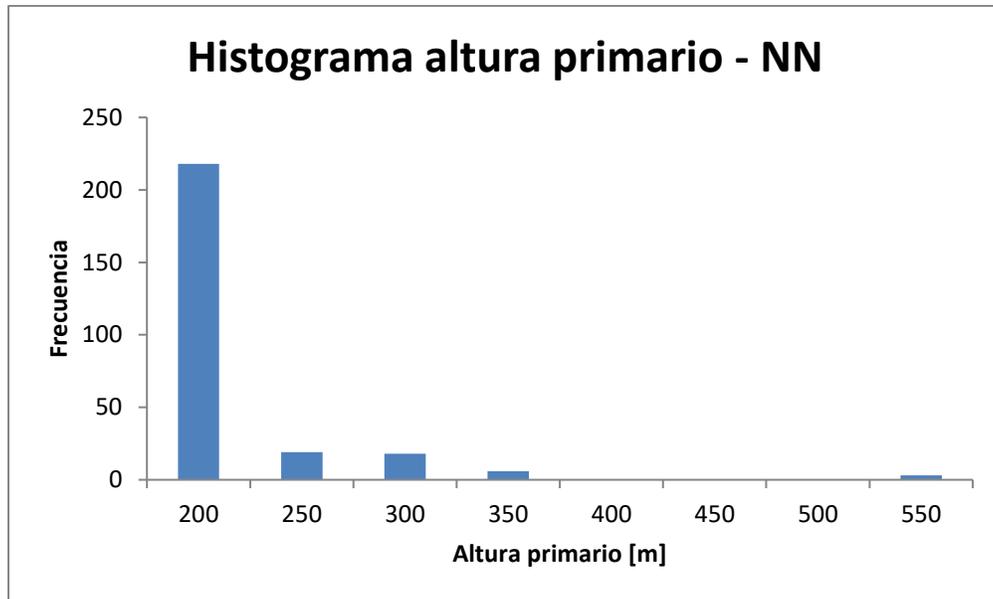
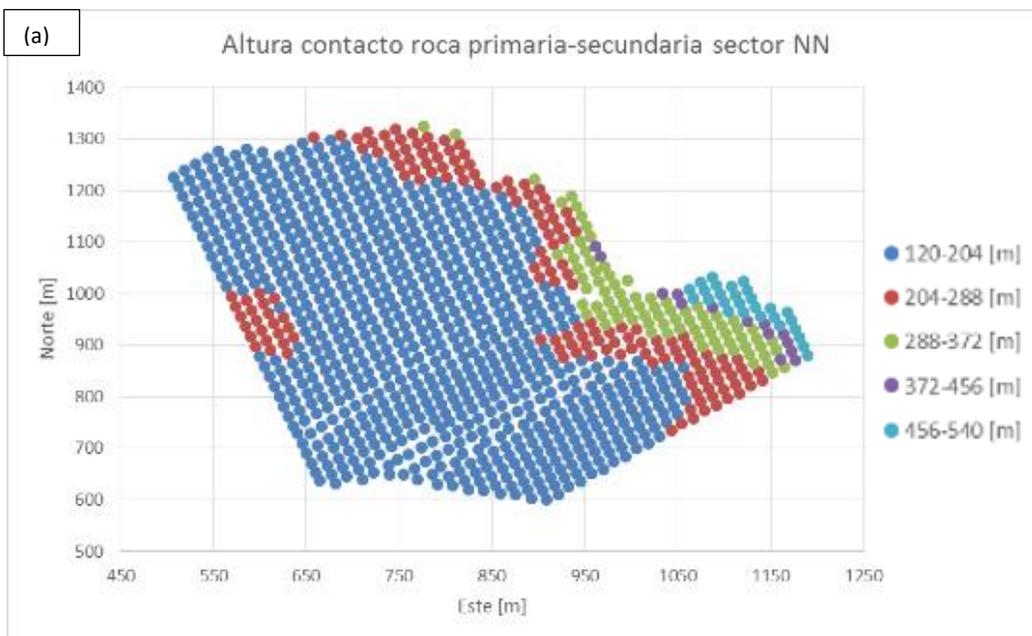


Ilustración 13 Histograma de altura de roca primaria para puntos de extracción declarados agua-barro, sector RENO.

Para el caso de Esmeralda Bloque uno, no se presenta su histograma debido a que todo este sector posee una altura de roca primaria de 149 metros.

En la Ilustración 14 se muestra las alturas de roca primaria en los sectores RENO y DR.



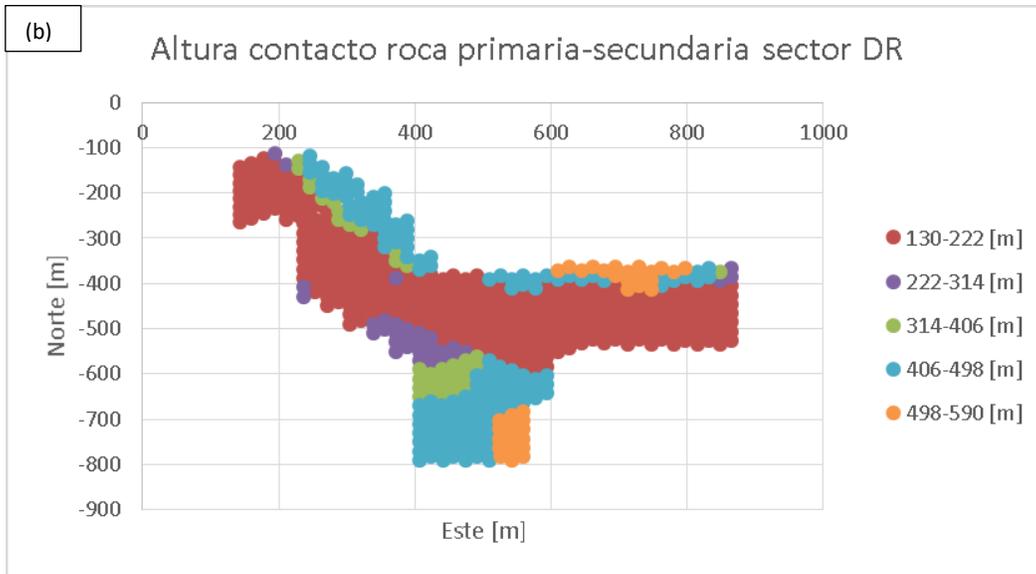
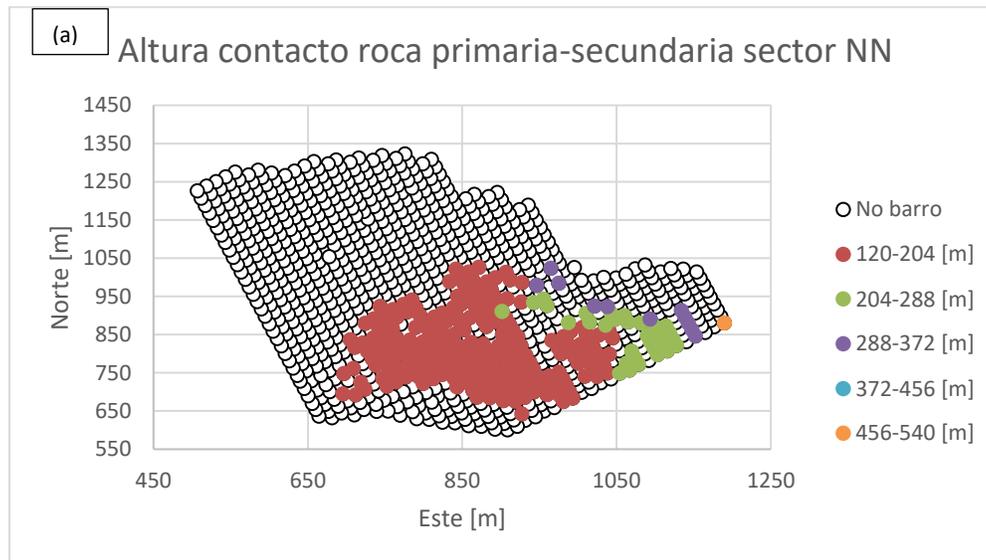


Ilustración 14 (a) Altura de roca primaria en sector Reservas Norte y (b) Diablo Regimiento.

En la Ilustración 15 se muestra la altura de primario de aquellos puntos de extracción en estado agua-barro a diciembre del 2015.



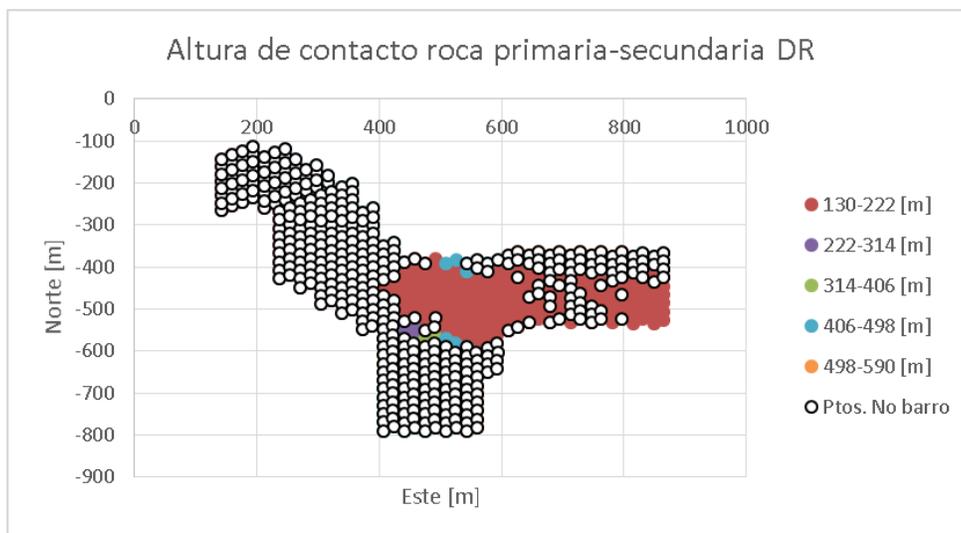


Ilustración 15 (a) Altura de roca primaria en sector Reservas Norte y (b) Diablo Regimiento para los puntos en estado agua-barro a Diciembre del 2015.

A continuación se presenta los resultados de altura de roca primaria para cada sector.

Tabla 13 Resumen de altura de roca primaria para puntos en estado agua-barro y puntos no declarados en estado agua-barro

Sector	Altura de roca primaria puntos en estado agua-barro (m)	Altura de roca primaria puntos no declarados agua-barro (m)
Esmeralda (B1)	149 ± 0	149 ± 0
Diablo Regimiento	164 ± 59	297 ± 146
Reservas Norte	189 ± 43	211 ± 83

De lo anterior se desprende que aquellos puntos de extracción de los sectores DR y NN que presentan agua-barro, estadísticamente poseen una altura de roca primaria inferior al compararla con los puntos de extracción que no han sido declarados en estado agua-barro (para mayor detalle ver ANEXO A).

3.5 Análisis altura de roca in- situ

La altura in-situ se refiere a la suma de alturas de material de roca primaria y secundaria. Para el desarrollo del estudio de altura in-situ se utilizó el modelo de bloques entregado por DET, correspondiente a la fecha de febrero del año 2016.

En esta sección se presentan histogramas de frecuencia de altura in-situ de los puntos registrados como agua-barro según base de datos.

En la Ilustración 16 se muestra el gráfico de frecuencia relativa de la altura in-situ para los puntos de la mina Diablo Regimiento declarados en estado barro según base de datos. Se muestra que la

altura donde se encuentra la mayor frecuencia de datos es en 100-150 metros, esto se encuentran en una frecuencia aproximadamente de 93 % del total de puntos agua-barro.

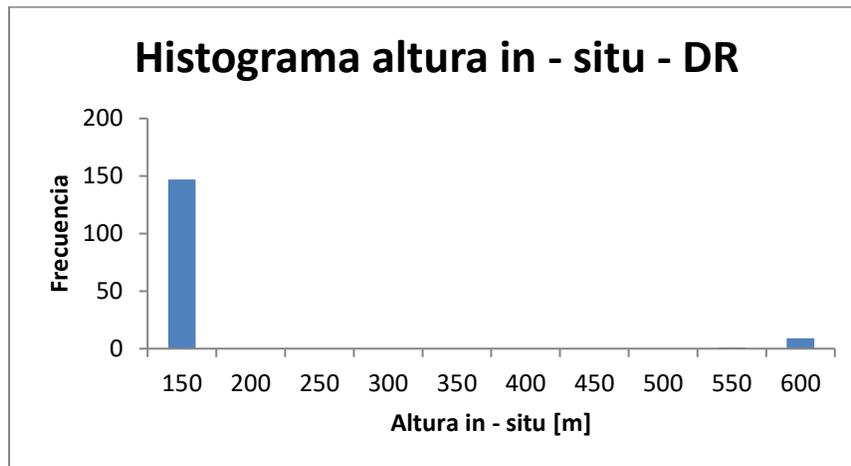


Ilustración 16 Histograma de altura in-situ para puntos de extracción declarados agua-barro, sector DR

En la Ilustración 17 se presenta el grafico de frecuencia relativa de la altura in-situ para los puntos de mina Reservas Norte declarados en estado agua-barro según base de datos.

Se muestra que la altura donde se encuentra la mayor frecuencia de datos es en 150-200 metros, esto representan el 80 % del total de puntos agua-barro.

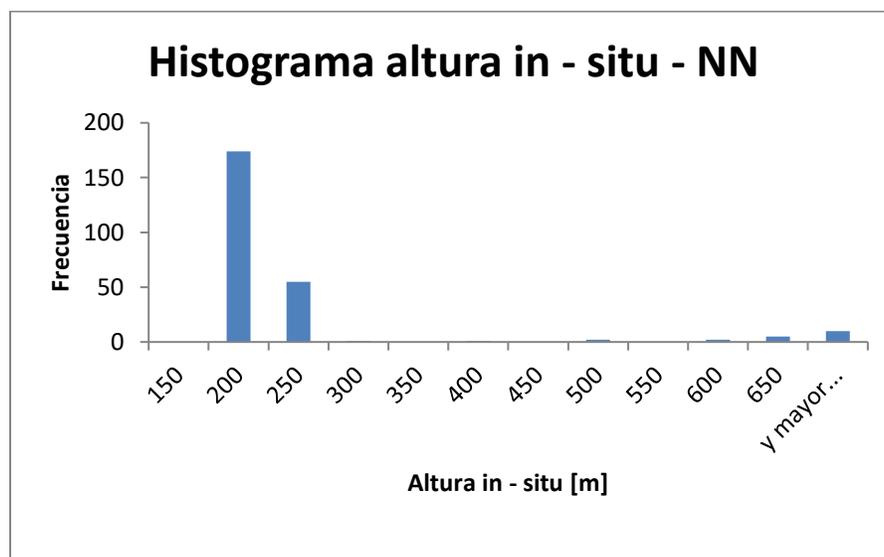


Ilustración 17 Histograma de altura in-situ para puntos de extracción declarados agua-barro, sector RENO, para último registro de ingreso

Para el caso de Esmeralda Bloque uno, no se presenta su histograma debido a que todo este sector posee una altura in-situ de 149 metros.

En la Ilustración 18 se muestra las alturas de roca in-situ en los sectores RENO y DR.

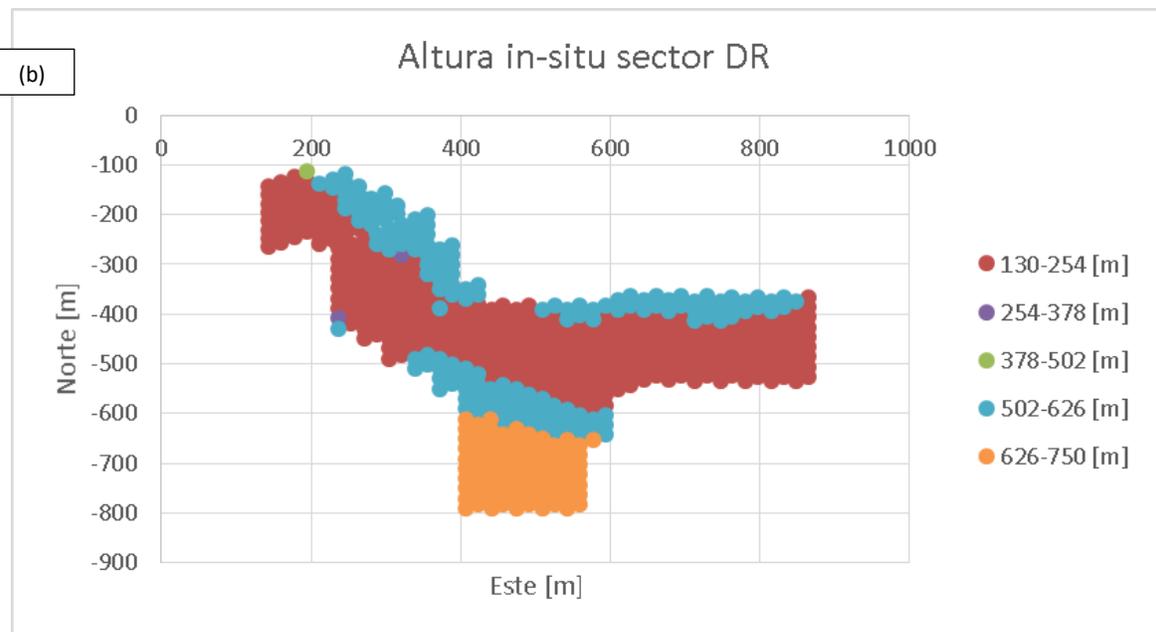
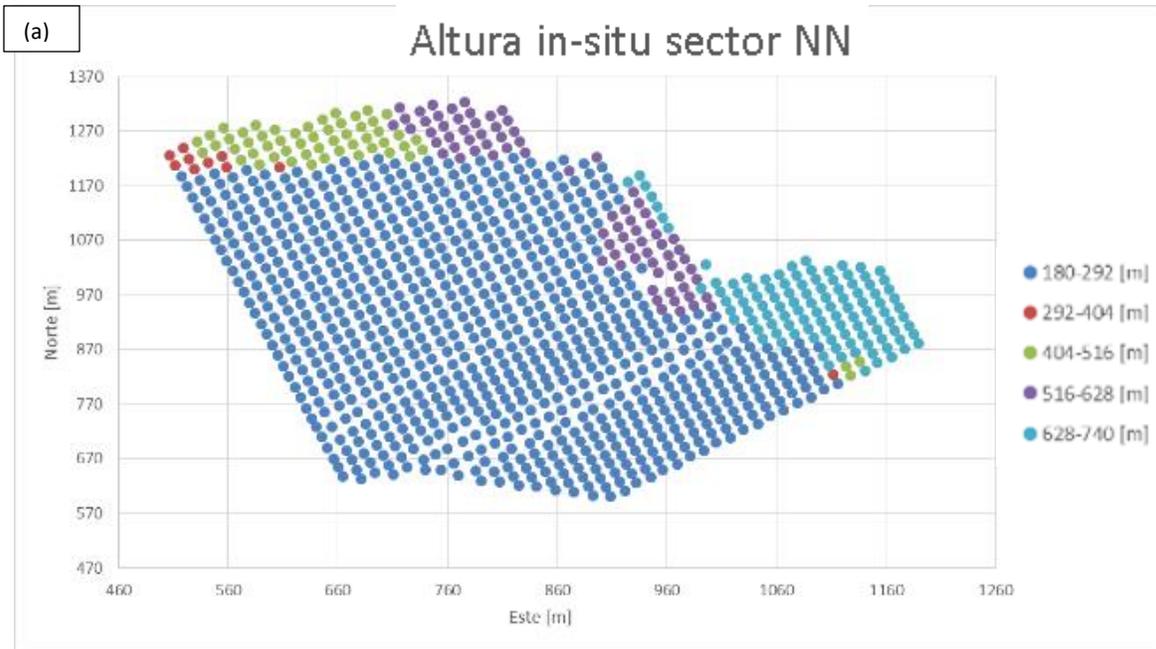


Ilustración 18 (a) Altura de roca in-situ en sector Reservas Norte y (b) Diablo Regimiento.

En la Ilustración 19 se muestra la altura de roca in-situ de aquellos puntos de extracción en estado agua-barro a diciembre del 2015.

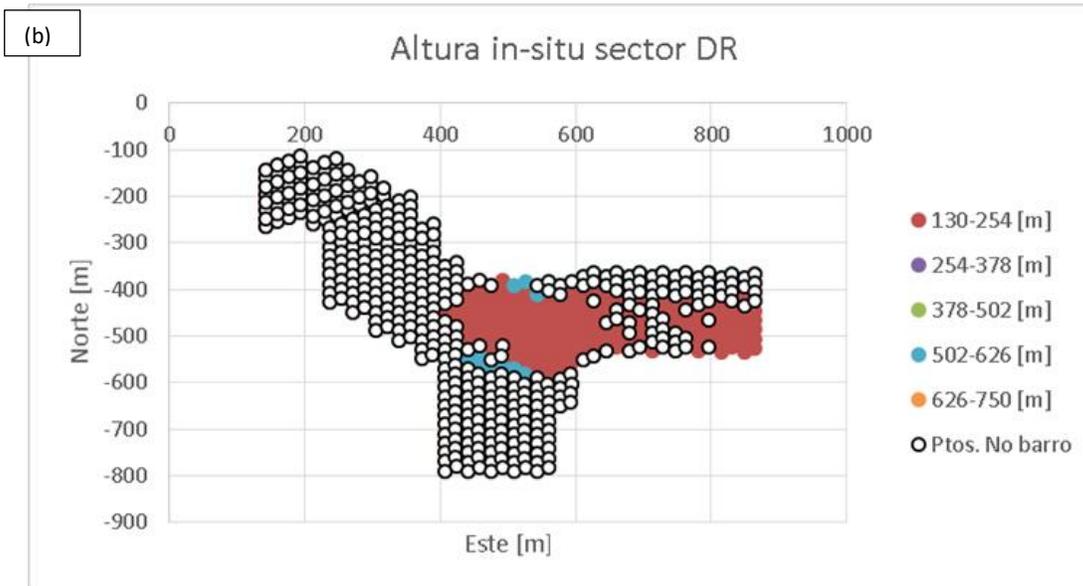
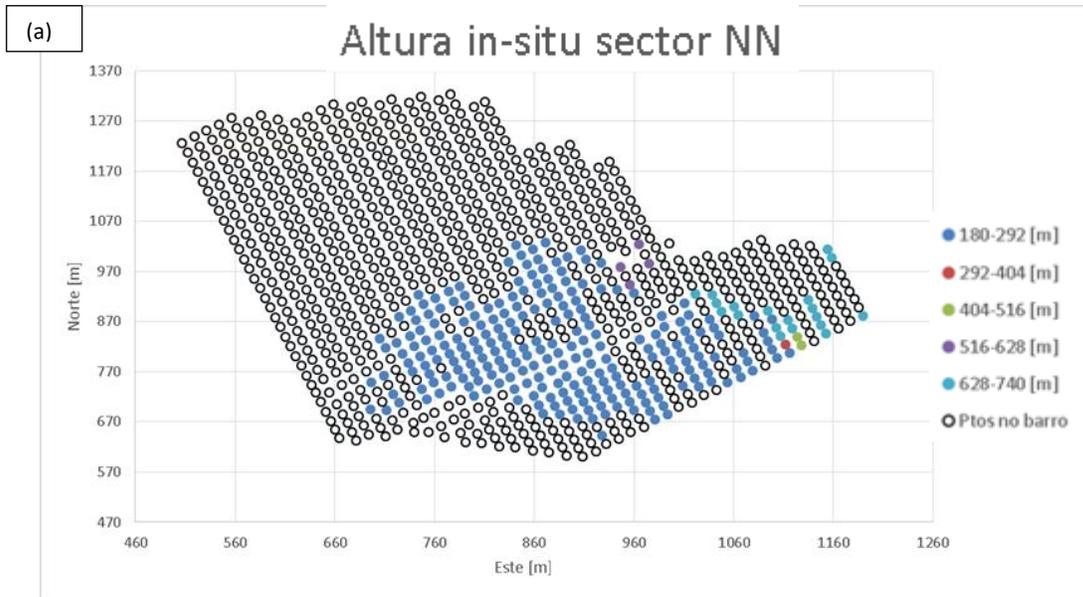


Ilustración 19 (a) Altura de roca in-situ en sector Reservas Norte y (b) Diablo Regimiento para los puntos en estado agua-barro a Diciembre del 2015.

A continuación se presenta los resultados de altura de roca in-situ para cada sector.

Tabla 14 Resumen de altura de roca in-situ para puntos en estado agua-barro y puntos no declarados en estado agua-barro

Sector	Altura de roca in-situ puntos en estado agua-barro (m)	Altura de roca in-situ puntos no declarados agua-barro (m)
Esmeralda (B1)	149 ± 0	149 ± 0
Diablo Regimiento	177 ± 106	398 ± 235
Reservas Norte	233 ± 131	303 ± 188

De lo anterior se puede decir que aquellos puntos de extracción de los sectores DR y NN que presentan agua-barro, estadísticamente poseen una altura in-situ inferior al compararla con los puntos de extracción que no han sido declarados en estado agua-barro (para mayor detalle ver ANEXO A).

3.6 Análisis altura a topografía

Para obtener la altura a topografía, se determinó desde el modelo de bloques del entregado por DET, correspondiente a la fecha de febrero del año 2016. Solo se utilizó el modelo de bloques, ya que no se cuenta con los perfiles de topografía.

En esta sección se presentan los histogramas de frecuencia de altura a topografía de los puntos registrados como agua-barro según base de datos.

En la Ilustración 20 se muestra el grafico de frecuencia relativa de la altura a topografía para los puntos declarados en agua barro (según base de datos) del sector Esmeralda (B1). Se observa que la altura donde se encuentra la mayor frecuencia de datos es en 640-650 metros, esto se encuentran en una frecuencia aproximadamente de 90 % del total de puntos agua-barro.

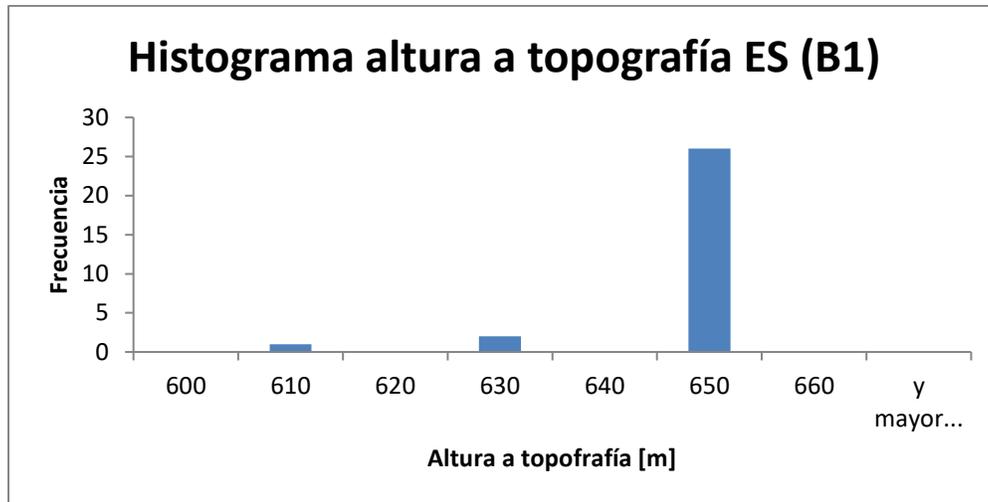


Ilustración 20 Histograma de altura a topografía para puntos de extracción declarados agua-barro, sector ES (B1)

En la Ilustración 21 se muestra el gráfico de frecuencia relativa de la altura a topografía para los puntos declarados en agua-barro (según base de datos) de la mina Diablo Regimiento. Se aprecia que la altura donde se encuentra la mayor frecuencia de datos es en 540-550 metros, esto se encuentran en una frecuencia aproximadamente de 32 % del total de puntos agua-barro.

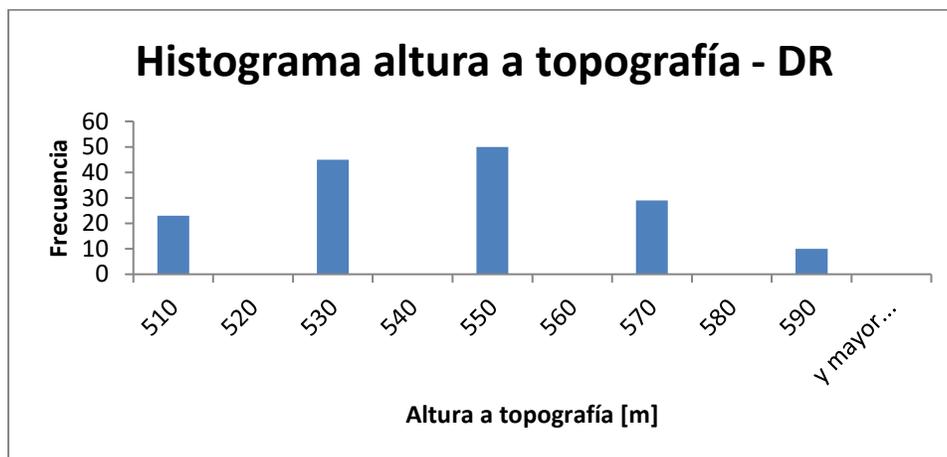


Ilustración 21 Histograma de altura a topografía para puntos de extracción declarados agua-barro, sector DR

En la Ilustración 22 se muestra el gráfico de frecuencia relativa de la altura a topografía para los puntos de mina Reservas Norte declarados en estado barro según base de datos. Se muestra que la altura donde se encuentra la mayor frecuencia de datos es en 480-490 metros, esto se encuentran en una frecuencia aproximadamente de 16 % del total de puntos agua-barro.

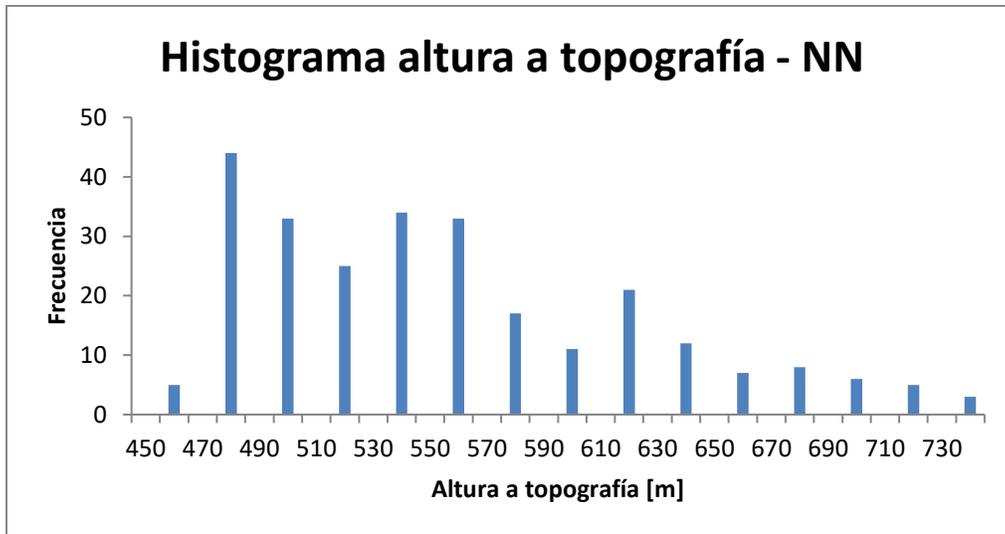
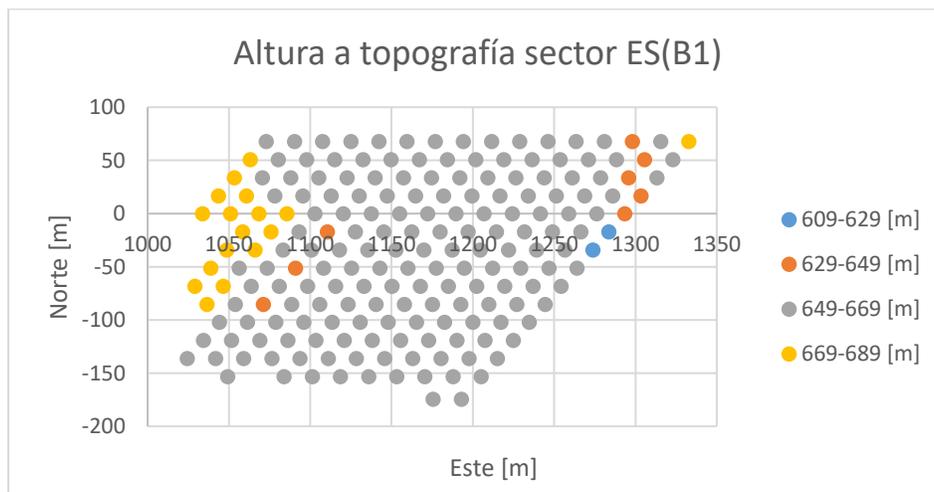


Ilustración 22 Histograma de altura a topografía para puntos de extracción declarados agua-barro, sector RENO, para último registro de ingreso

En la Ilustración 23 se muestra las alturas a topografía de los sectores ES (B1) RENO y DR.

(a)



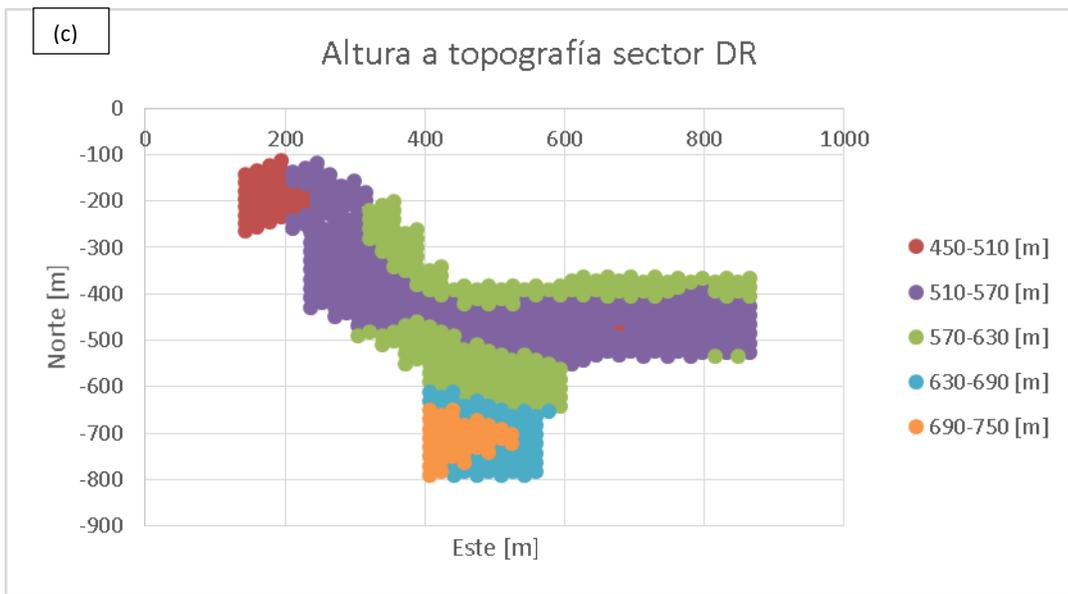
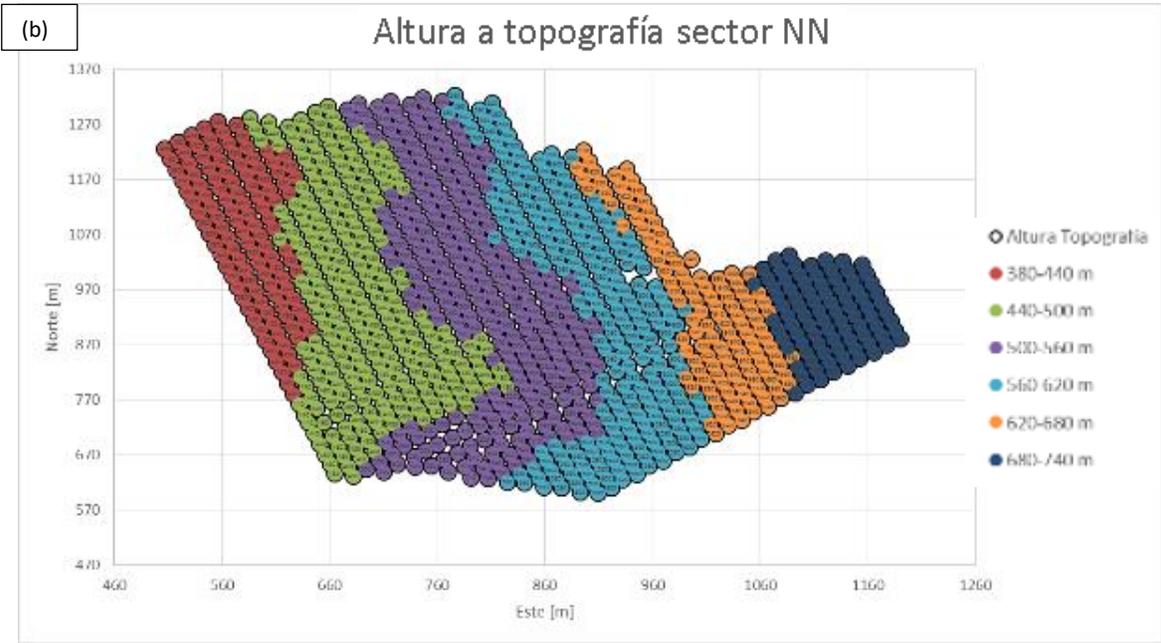
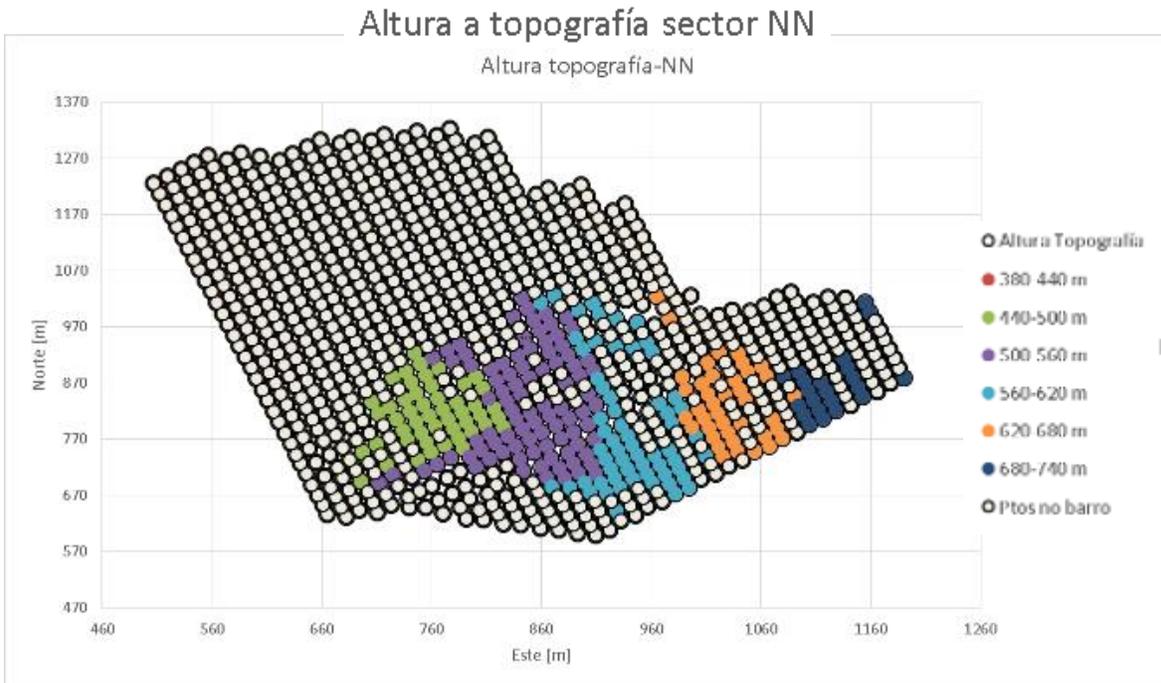
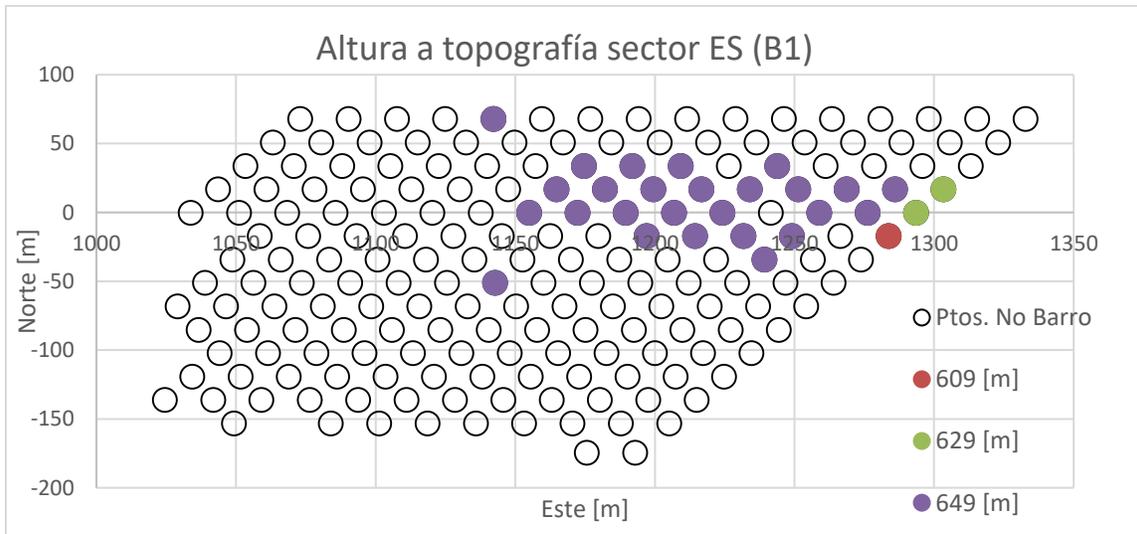


Ilustración 23 (a) Altura a topografía en sector Esmeralda Bloque 1, (b) Reservas Norte y (c) Diabolo Regimiento.

En la Ilustración 24 se muestra la altura a topografía de aquellos puntos de extracción en estado agua-barro a diciembre del 2015.



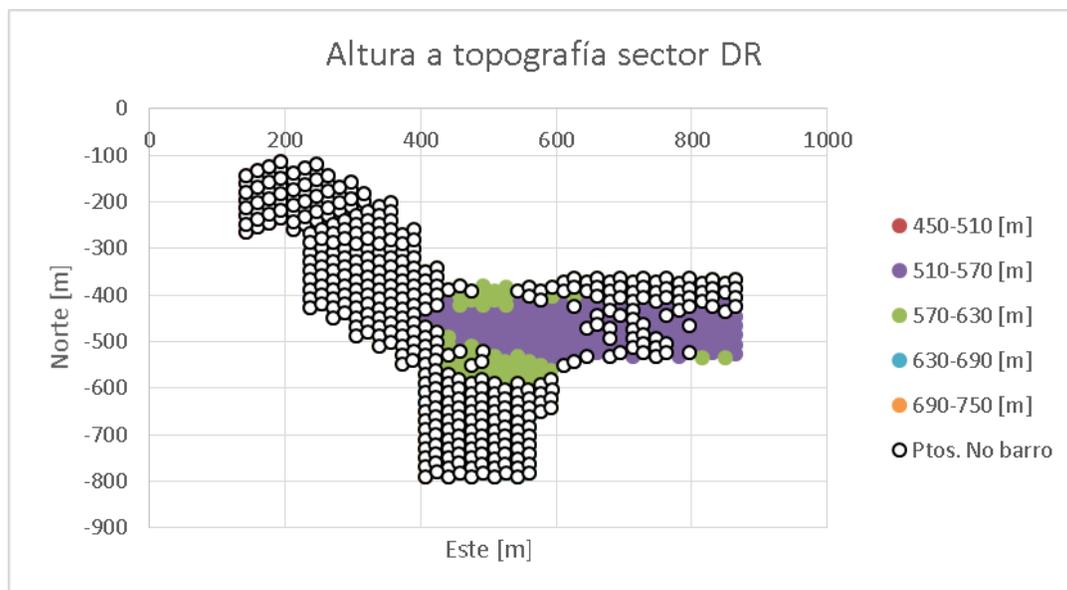


Ilustración 24 (a) Altura a topografía de los puntos de extracción declarados en estado agua barro a Diciembre del 2015 en sector Esmeralda Bloque 1, (b) Reservas Norte y (c) Diablo Regimiento.

A continuación se presenta los resultados de altura a topografía para cada sector.

Tabla 15 Resumen de altura a topografía para puntos en estado agua-barro y puntos no declarados en estado agua-barro

Sector	Altura a topografía de puntos en estado agua-barro (m)	Altura a topografía de puntos no declarados agua-barro (m)
Esmeralda (B1)	646 ± 9	649 ± 9
Diablo Regimiento	544 ± 22	571 ± 62
Reservas Norte	555 ± 66	529 ± 88

De lo anterior se puede decir que aquellos puntos de extracción de los sectores ES (B1) y DR que presentan agua-barro, estadísticamente poseen una altura a topografía inferior al ser comparada con los puntos de extracción que no han sido declarados en estado agua-barro (para mayor detalle ver ANEXO A). En el caso del sector NN, los puntos en estado agua-barro poseen una altura a topografía mayor que aquellos puntos de extracción que no han sido declarados en estado agua-barro, por lo que se puede decir que esta variable no incide en el ingreso de agua-barro, ya que el comportamiento es contrario a lo esperado.

3.7 Análisis estacionalidad

Para esta variable, se registra el mes en que se detecta el ingreso de agua-barro a la columna de extracción y se busca relacionar este evento a posibles precipitaciones que se registran en la zona durante el invierno, o deshielo en la montaña en la estación del año de verano. La variable, no analiza caudales de ingreso de agua por precipitaciones o lluvias.

Tabla 16 Resumen de análisis de estacionalidad en puntos de extracción declarados como barro para sector ES (B1).

Estación	Sector	Ingreso de barro/barro total	Porcentaje relativo [%]
Primavera – verano (0)	ES (B1)	23/29	79
Otoño – invierno (1)	ES (B1)	6/29	21

De lo anterior se tiene que el deshielo que se produce en estación del año de verano influye de gran manera sobre el ingreso de agua-barro en esta zona.

Tabla 17 Resumen de análisis de estacionalidad en puntos de extracción declarados como barro para sector DR.

Estación	Sector	Ingreso de barro/barro total	Porcentaje relativo [%]
Primavera – verano (0)	DR	71/157	45
Otoño – invierno (1)	DR	86/157	55

Tabla 18 Resumen de análisis de estacionalidad en puntos de extracción declarados como barro para sector RENO.

Estación	Sector	Ingreso de barro/barro total	Porcentaje relativo [%]
Primavera – verano (0)	RENO	132/263	50
Otoño – invierno (1)	RENO	131/263	50

Por lo que se muestra en la tabla anterior para los sectores RENO Y DR, no se observa una relación clara que relacione el ingreso de agua-barro con agua proveniente de deshielo o precipitaciones. Por lo tanto no es directo relacionar el ingreso de agua-barro con esta variable.

3.8 Análisis vecino barro

Se estudió el estado de los puntos de extracción que presentaron ingreso de agua-barro según la base de datos entrega por DET, de forma tal, de observar si estos poseían puntos pertenecientes a su vecindad (6 puntos vecinos) con declaración de agua-barro.

Tabla 19 Análisis de vecindad de puntos en estado agua-barro

Sector	Puntos de extracción en estado agua- barro (un)	Puntos de extracción declarado agua-barro con al menos un vecino en estado agua-barro (un)
Esmeralda Bloque 1	29	21
Diablo Regimiento	157	131
Reservas Norte	263	222

Por lo tanto, se puede entender que esta variable es significativa con el ingreso de agua-barro, ya que una gran cantidad de puntos declarados en este estado poseían un vecino con registro de barro.

3.9 Análisis canalón

La mina El teniente se caracteriza por poseer una pipa en el centro del depósito, la cual posee material que no contiene valor económico, es por esto que se genera una depresión en la superficie llamada canalón. Este canalón produce acumulación de agua-nieve que puede producir susceptibilidad al ingreso de agua-barro a los sectores que se encuentran bajo esta formación.

En las Ilustración 25 e Ilustración 26 se muestra en puntos de color rojo los puntos de extracción de los sectores RENO y DR que se encuentran bajo el canalón.

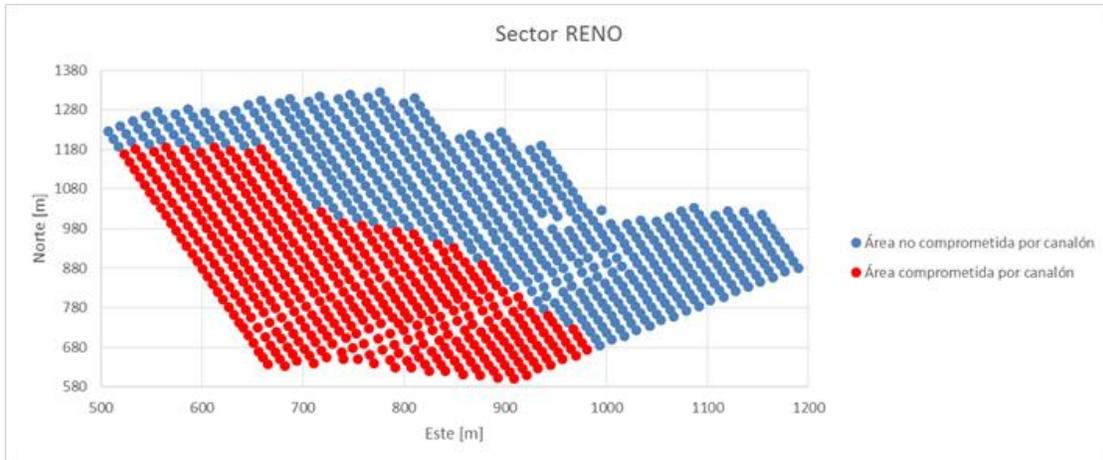


Ilustración 25 Área comprometida por estar bajo canalón en sector Reservas Norte

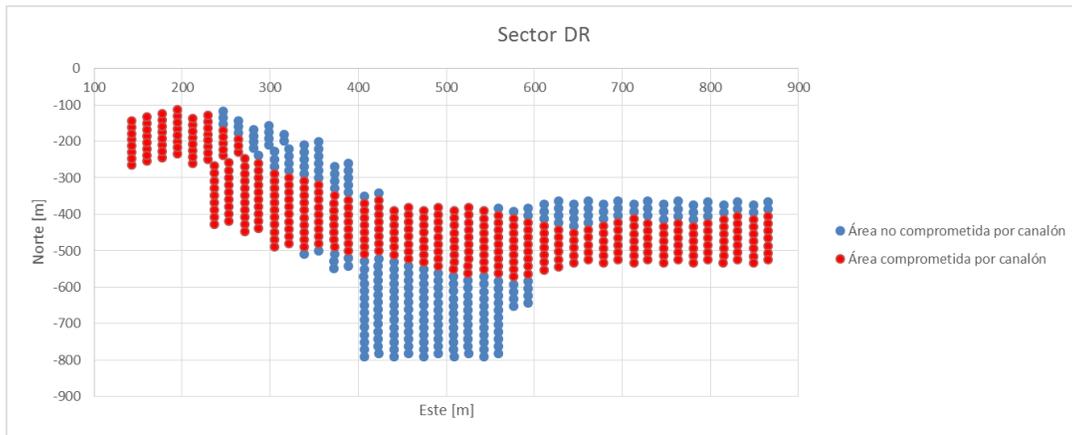


Ilustración 26 Área comprometida por estar bajo canalón en sector Diablo Regimiento

Tabla 20 Resumen de efecto de canalón en sectores de estudio.

Sector	Porcentaje de área total bajo canalón (%)	Porcentaje de puntos de extracción en agua-barro que se encuentran bajo canalón (%)
ES (B1)	100	100
DR	60	90
NN	48	56

Por lo apreciado en la tabla anterior, se puede determinar que el canalón es una variable que influye en los puntos de extracción se han declarado en estado agua-barro.

3.10 Análisis porcentaje entrada de barro

Se realiza el cálculo del porcentaje de columna in-situ extraída para cada punto de extracción declarado en estado de agua-barro.

En la Ilustración 27, Ilustración 28 e Ilustración 29 Se muestran los histogramas del PEB%. De los sectores ES (B1), DR y NN respectivamente. Se puede observar la frecuencia relativa en número de puntos y la frecuencia acumulada en porcentaje.

La utilidad de estos histogramas es que permite determinar la probabilidad de extraer un determinado porcentaje de la columna in-situ de los puntos en estado agua-barro. Para el caso del sector Esmeralda Bloque 1 la probabilidad de extraer un porcentaje de columna in-situ mayor a 100% de un punto de extracción que será declarado en estado agua-barro es de 66%, como se muestra en la Ilustración 27.

En el caso del sector Diablo Regimiento, 1 la probabilidad de extraer un porcentaje de columna in-situ mayor a 100% de un punto de extracción que será declarado en estado agua-barro es de 77%, como se muestra en la Ilustración 28. Y como se puede observar en la Ilustración 29, la probabilidad de extraer un porcentaje de columna in-situ mayor a 100% de un punto de extracción que será declarado en estado agua-barro es de 68%.

Histograma PEB - (ES B1)

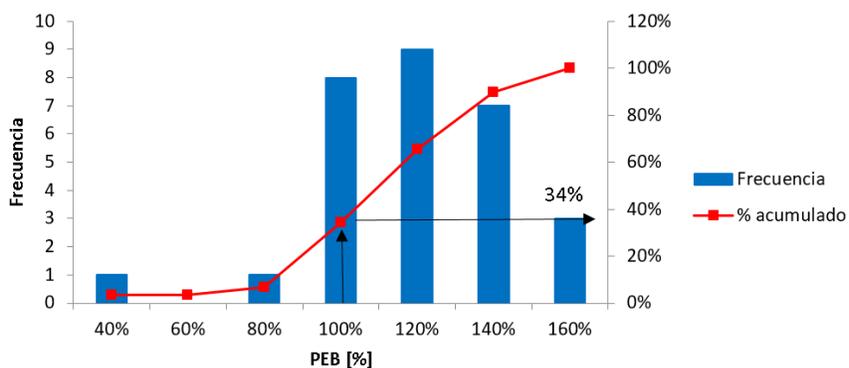


Ilustración 27 Histograma PEB% del sector ES (B1)

Histograma PEB - DR

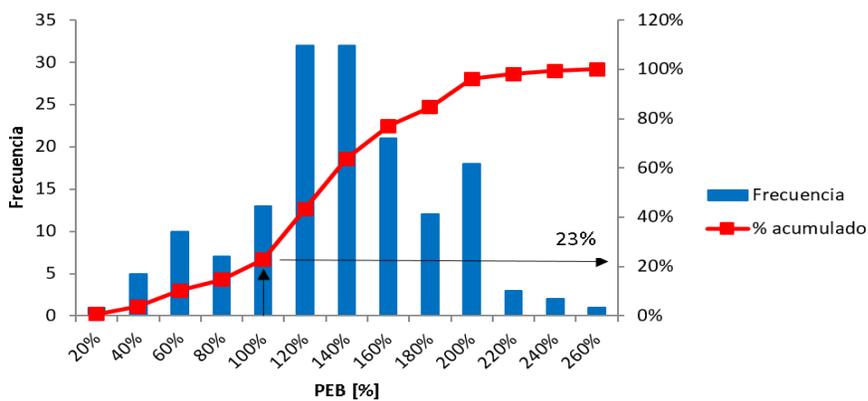


Ilustración 28 Histograma PEB% del sector DR

Histograma PEB - NN

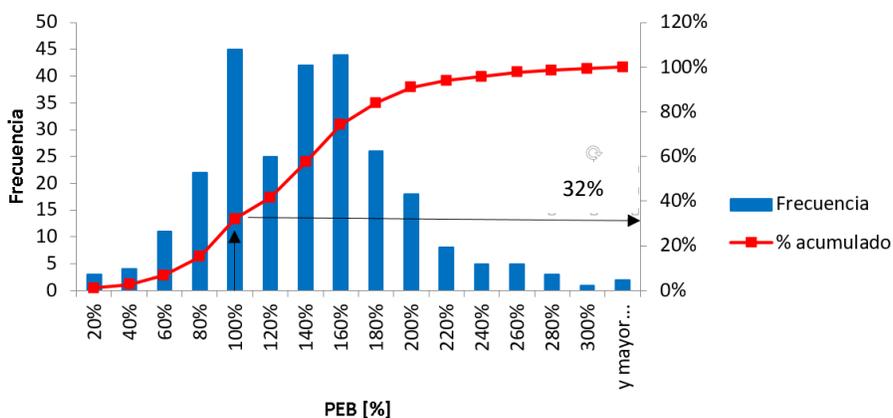


Ilustración 29 Histograma PEB% del sector NN

Tabla 21 Probabilidad de extraer la columna in-situ para puntos que serán declarados en estado agua-barro.

% Extracción de columna in-situ	Probabilidad de % de extracción in-situ sector ES (B1) (%)	Probabilidad de % de extracción in-situ sector DR (%)	Probabilidad de % de extracción in-situ sector NN (%)
>20%	100	99	99
>40%	97	96	97
>60%	97	90	93
>80%	93	85	85
>100%	66	77	88
>120%	34	57	68

En la Tabla 22 se presenta el PEB (%) promedio de cada uno de los sectores en estudio

Tabla 22 Resumen de PEB (%) en los sectores ES (B1), DR y NN

Sector	PEB (%)
Esmeralda (B1)	110 ± 25
Diablo Regimiento	127 ± 46
Reservas Norte	132 ± 53

El PEB (%) menor se encuentra en el sector ES (B1) lo que es de esperar, debido a que este sector presenta las menores alturas de columnas de extracción al comparar los tres sectores y posee la totalidad de su área bajo canalón.

A continuación se representa el PEB (%) de cada punto de extracción en los tres sectores analizados.

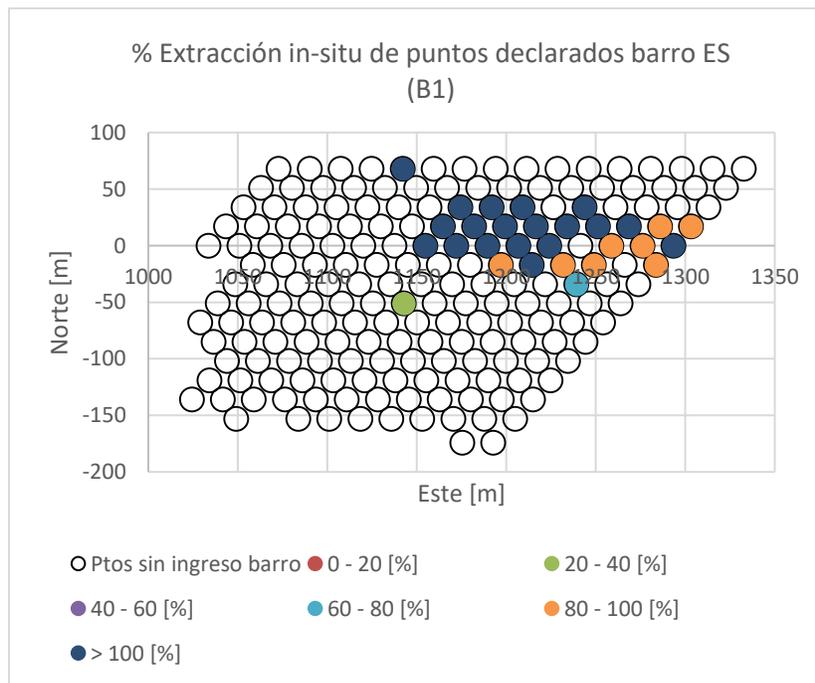


Ilustración 30 PEB% para los puntos de extracción de ES (B1).

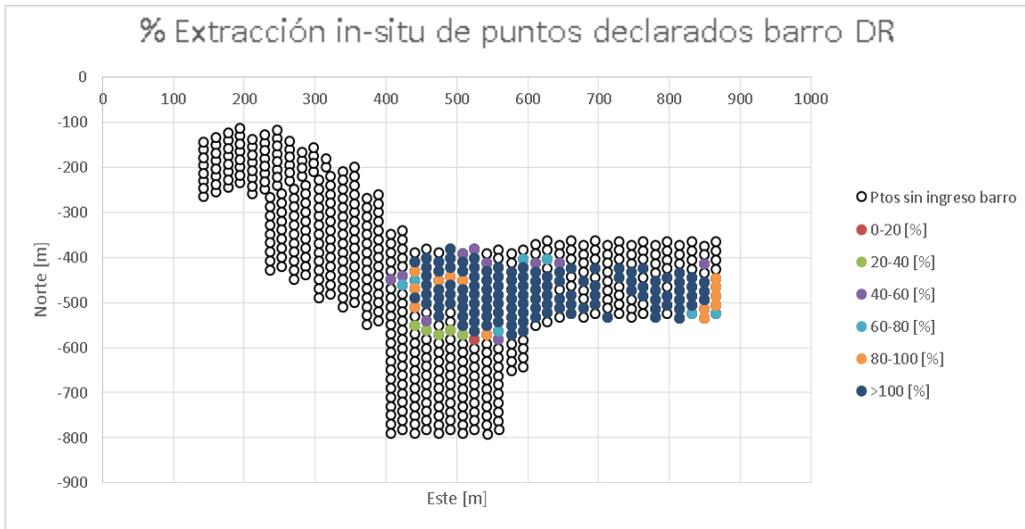


Ilustración 31 PEB% para los puntos de extracción de DR

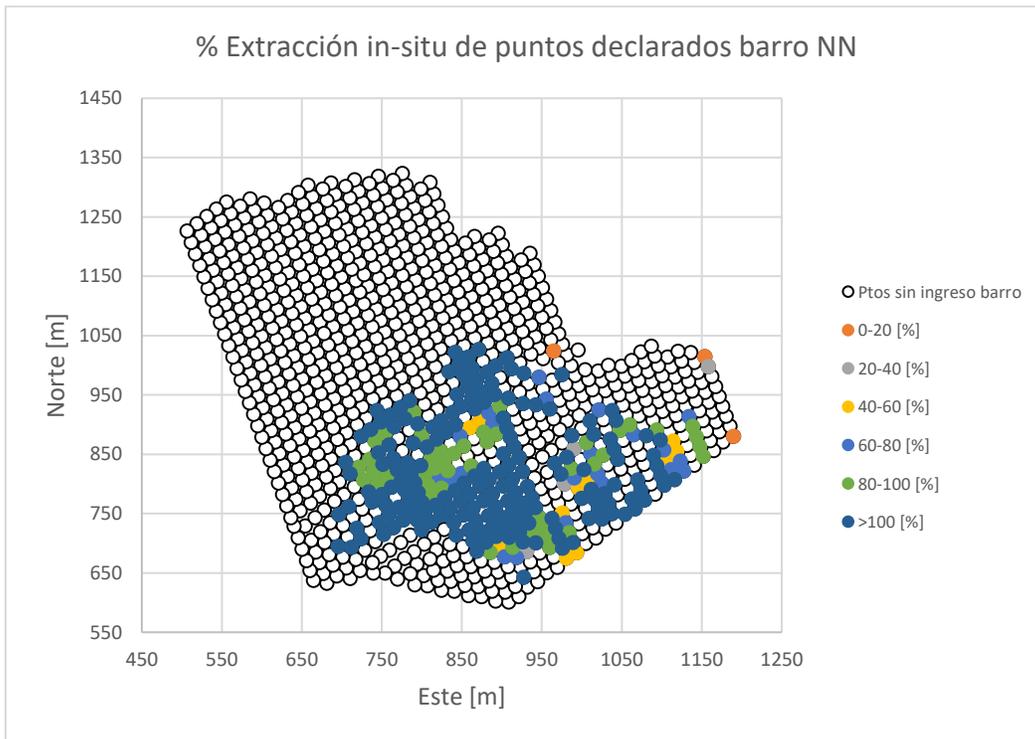


Ilustración 32 PEB% para los puntos de extracción de RENO.

3.11 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó los principales resultados del análisis de los puntos en estado agua-barro para los sectores Reservas Norte, Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1. De los resultados se tiene que:

Los puntos de extracción que se encuentran en estado agua-barro a la fecha de diciembre 2015, en promedio presentan una altura de roca primaria, in-situ y altura a topografía inferior que los puntos que no han presentado ingreso de agua-barro (salvo en el sector NN donde la altura a topografía de los puntos de extracción en estado operativo es menor a aquellos declarados agua-barro). Por lo cual estas son variables que deben ser evaluadas en el ingreso de agua-barro.

Los puntos de extracción en estado de agua-barro, generalmente poseían un vecino en estado agua-barro previo a su declaración, por lo tanto es importante estudiar el entorno de los puntos de extracción.

La estación del año es una variable que no muestra un comportamiento claro en el ingreso de agua-barro, salvo en el sector ES (B1), por lo que el efecto de esta variable en el ingreso de agua-barro debe ser evaluado en mayor detalle.

Un gran porcentaje de puntos de extracción en estado agua-barro se encuentran bajo el canalón, por lo que esta puede ser significativa en el ingreso de agua-barro, ya que crea flujos preferenciales de agua.

En relación a la variable PEB% en los puntos declarados en barro hasta diciembre de 2015, los puntos agua-barro presentan un PEB% de 132 ± 53 en RENO, en Diablo Regimiento se tiene un PEB% de 127 ± 46 y Esmeralda Bloque 1 de 110 ± 25 .

Capítulo 4

4 Construcción de modelos de ingreso de agua barro en sectores RENO, DR y ES (B1)

4.1 Introducción

Para poder determinar el ingreso de barro en los puntos de extracción que aún no se declaran en este estado, se construye un modelo de regresión logística. Con este modelo se predice el ingreso de agua-barro a los puntos que se encuentran en estado operativo o comenzarán su extracción en el futuro.

En el presente capítulo se muestran los resultados y metodología para construir modelos multivariantes de ingreso de agua-barro en las minas Reservas Norte, Diablo Regimiento y Esmeralda Bloque 1. Se presenta en detalle la construcción de bases de datos, construcción de modelos de ingreso de agua-barro y calibración.

.

4.2 Mecanismos de ingreso de agua-barro observados

Al realizar una revisión de estudios anteriores sobre el ingreso de barro, Navia (2014) señala que este aparece de forma vertical en los puntos de extracción, para posteriormente expandirse de forma lateral hacia sus vecinos (en sector DR). En la Ilustración 33 se muestra éste fenómeno de ingreso de agua-barro, donde se diferencian dos mecanismos, uno de ingreso de agua-barro vertical y otro lateral.

El ingreso de agua-barro vertical o precursor, proviene de la parte superior, puede ser de sectores antiguos que poseían barro o proveniente de la superficie, este tipo de ingreso de agua-barro se manifiesta en los primeros puntos de extracción declarados en estado de agua-barro.

El ingreso de agua barro lateral se produce por extracción a puntos vecinos que poseían agua-barro con ingreso vertical, por consecuencia de esta extracción, los puntos vecinos del punto de extracción declarado con agua-barro, se van contaminando.

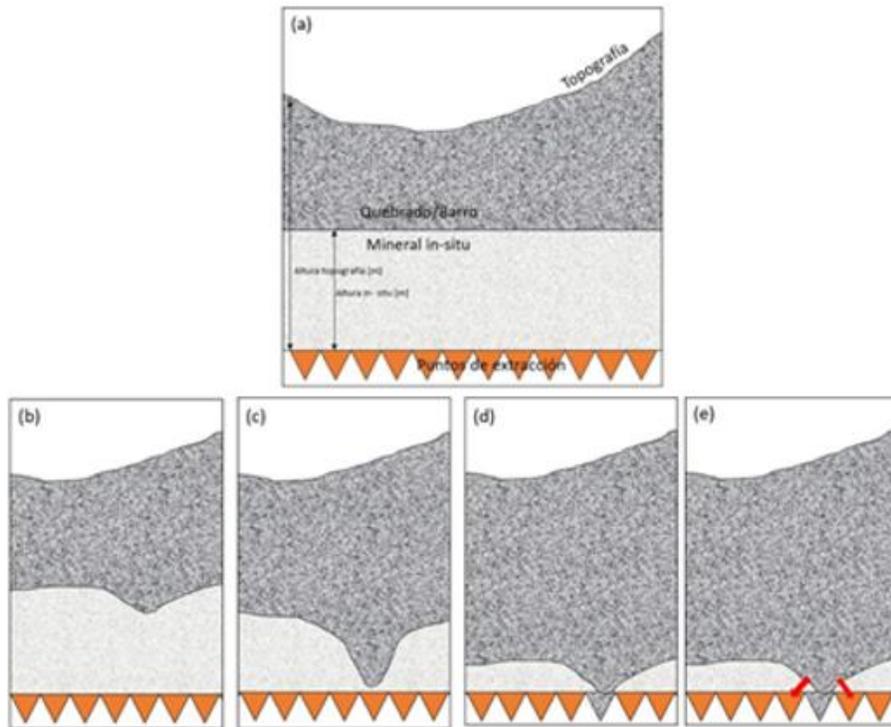


Ilustración 33 Esquema conceptual del mecanismo de ingreso de barro vertical y lateral.

En la Ilustración 34 se muestra el ingreso de agua-barro a los puntos de extracción del sector Diablo Regimiento entre las calles 17 y 34. En la Ilustración 34 (a) en rojo se observan los puntos declarados en estado de agua-barro, para la fecha de 31-03-2009, se declaran dos puntos en este estado, por lo tanto, estos puntos presentaron un mecanismo de ingreso vertical de barro.

En la Ilustración 34 (b) se puede apreciar que los puntos vecinos de los que ya presentan agua-barro, se contaminan bajo el mecanismo de ingreso de barro lateral en la fecha 23-04-2010. Se entiende que el barro emigró desde un barro precursor o de ingreso vertical hacia sus vecinos.

Posteriormente los puntos vecinos de los declarados en estado agua-barro se comienzan contaminar con este fenómeno, como se aprecia en la Ilustración 34 (c) correspondiente a la fecha 29-01-2013. Por último se muestran todos los puntos en estado de agua-barro para la fecha de 03-02-2016.

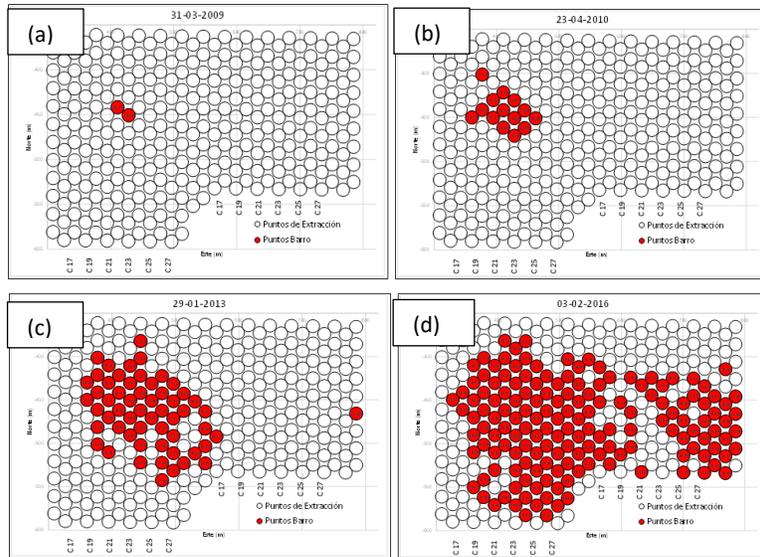


Ilustración 34 Secuencia de declaración de puntos con barro para el sector DR (vista comprendida entre C17-C43). Las fechas de las ilustraciones son: (a) 31-03-2009, (b) 23-04-2010, (c) 29-01-2013, (d) 03-03-2016.

Con los mecanismo de ingreso de agua-barro mencionados anteriormente, se analizan los sectores en estudio (DR, ES (B1), NN).

En la Ilustración 35 se muestran los mecanismos de ingreso de agua-barro que presentaron los sectores Diablo Regimiento, Esmeralda (B1) y Reservas Norte. Los puntos de extracción coloreados de rojo indican que se produjo un ingreso de agua-barro vertical y los puntos de extracción de color azul presentaron un mecanismo de ingreso de agua barro lateral.

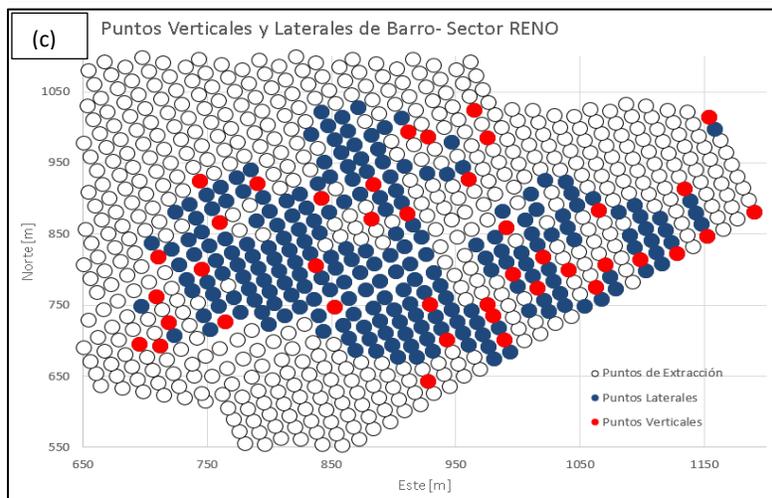
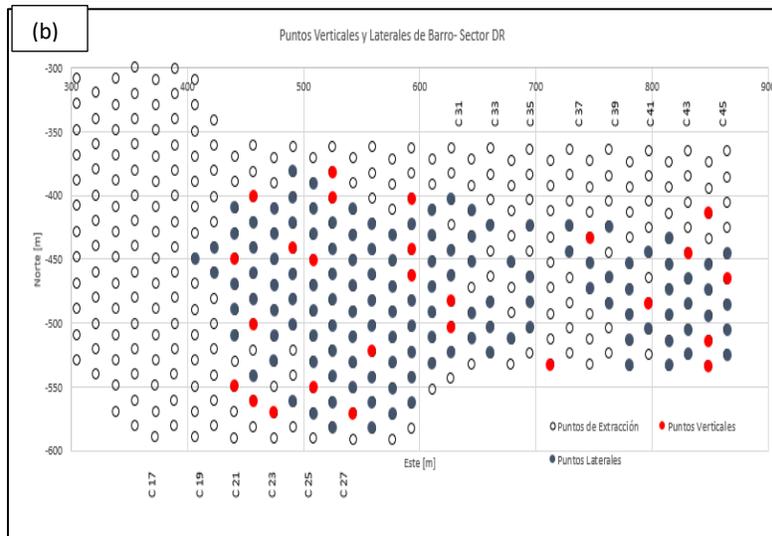
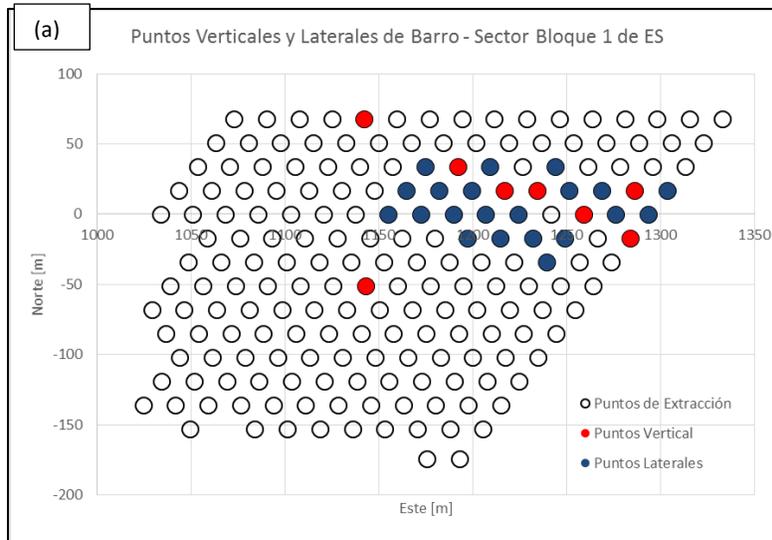


Ilustración 35 (a) Puntos con ingreso de barro vertical y lateral, sector ES (B1) (b) sector DR (vista entre Calle 13 y 45y (c) sector RENO.

Al definir dos mecanismos de ingreso de agua-barro e identificar estos en los puntos de extracción, se sugiere modelar el ingreso de agua-barro para cada uno de los sectores con la combinación de dos modelos de regresión logística. Se construye un modelo de ingreso de agua-barro para puntos de extracción que se presentan un ingreso de agua-barro vertical y otro para ingreso de agua-barro lateral.

4.3 Bases de datos

En esta sección se presenta la construcción de las bases de datos necesaria para elaborar los modelos de regresión logística. Estas bases de datos recogen información de los sectores Reservas Norte, Diablo Regimiento y Esmeralda bloque 1. La información utilizada es considerada a escala mensual, en la Tabla 23 se muestran la cantidad de puntos de extracción con información, fecha de la recolección de datos y el tonelaje extraído en el periodo correspondiente.

Tabla 23 Resumen de la base de datos de extracción de los sectores ES (B1), DR y RENO.

Sector	Puntos con extracción	Periodo de Extracción	Tonelaje extraído en periodo (Mt)
ES (B1)	196	Junio-2011 / Diciembre-2015	17,3
DR	456	Enero-2005 / Diciembre-2015	63,8
RENO	860	Diciembre-1989 / Diciembre-2015	145,6

Desde los datos entregados por DET, se analizaron variables a considerar dentro del modelo de regresión logística que tiene relación con el ingreso de agua-barro, según lo mostrado en el Capítulo 2. A continuación se describen las variables analizadas dentro de la base de datos y la forma de obtenerlas:

1. **Razón de extracción:** Esta variable hace referencia a la razón de tonelaje extraído respecto al tonelaje in-situ de la columna en cada instante del tiempo. Para calcular esta razón se procede a efectuar la división entre el tonelaje extraído acumulado del punto de extracción con el tonelaje in-situ del punto analizado. El tonelaje in-situ de cada punto de extracción fue calculado desde los archivos de modelo de bloques de cada sector que fueron entregados por personal de DET, estos se detallan a continuación (los mismos archivos fueron utilizados para calcular las variables 2. Altura in-situ (m), 3. Altura de primario (m) y 4. Altura a topografía (m)):
 - a. **Sector DR:** DR_PND2016_ABR_15_Mob_Bloq_Dil.txt
 - b. **Sector ES:** ES_SOBRECARGA_PND_2016_ABR_15_Mob_Bloq_Dil.csv
 - c. **Sector RENO:** NN_CORBATA_PR_PND_2016_FEB_15_Mob_Bloq_Dil.txt
2. **Altura in-situ (m):** variable que indica la altura in-situ (sin fragmentar por efectos del caving) de cada punto de extracción. La altura in-situ de un punto de extracción está formada por mineral

primario y secundario. En algunos casos, la altura in-situ puede llegar hasta la topografía o hasta un sector superior antiguo.

3. **Altura de primario (m):** variable que señala la altura de columna de mineral primario de cada punto de extracción. En algunos casos esta altura puede llegar hasta un nivel superior antiguo o bien hasta la interface quebrado-secundario, en el caso de que la columna in-situ de un punto esté constituida por mineral primario y secundario.
4. **Altura a topografía (m):** Variable que determina la altura desde el nivel de hundimiento de un punto de extracción hasta la topografía.
5. **Vecindad Barro:** Indica el estado de barro o no barro en el entorno inmediato (6 puntos vecinos) para un punto determinado. El cálculo de esta variable se basa en la información de estado de puntos de extracción. Por ejemplo, si un punto de extracción fue declarado barro en un periodo determinado, y a su vez, tenía dos de sus vecinos declarados previamente en estado agua-barro. La variable toma el valor numérico 2.
6. **Estación del año:** Esta variable toma 0 cuando la extracción se realiza en los meses de primavera – verano (octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo) y 1 en los meses de otoño – invierno (abril, mayo/, junio, julio, agosto, septiembre).
7. **Bajo canalón:** Esta variable es de carácter dicotómica, toma los valores de 0 – 1. Se categoriza como 0 cuando un punto de extracción determinado se ubica fuera de la zona de mayor riesgo de entrada de barro, es decir, fuera de la zona más baja de la topografía o canalón (González, 2014) y 1 cuando el punto de extracción se encuentra bajo esta zona.
8. **Velocidad de extracción (t/m²-día):** se calculó a partir de la extracción mensual, es decir, se calculó la velocidad de extracción mensual (t/m²mes) y se dividió por los días del mes, por lo tanto se asumió extracción todos los días del mes.
9. **Uniformidad:** se calcula según el índice de uniformidad VUI de Susaeta (2004). El VUI es un indicador de la regularidad de la extracción entre un punto y sus seis vecinos inmediatos. El VUI se calculó por punto a una escala mensual.

En la Tabla 24 se muestran los rangos de las variables analizadas para este estudio según la base de datos recopilada de los sectores en Esmeralda Bloque 1, Diablo Regimiento y Reservas Norte.

Tabla 24 Rangos de valores para las variables analizadas para cada sector. (*Valores en escala mensual)

SECTOR ES (B1)			
Variable	Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio
Razón de Extracción	0	2,3	0,47 ± 0,48
Altura in-situ (m)	149	149	149 ± 0
Altura de primario (m)	149	149	149 ± 0
Altura a topografía (m)	609	689	649 ± 9
Vecindad Barro	0	6	-
Estación del año	0	1	-
Bajo Canalón	0	1	-
*Velocidad de extracción (t/m ² día)	1,1*10 ⁻⁴	1,8	0,35 ± 0,3
*Uniformidad	0%	100%	69 ± 36%
SECTOR DR			
Variable	Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio
Razón de Extracción	0	2,5	0,59 ± 0,5
Altura in-situ (m)	150	750	322 ± 225
Altura de primario (m)	150	590	248 ± 136
Altura a topografía (m)	490	750	568 ± 49
Vecindad Barro	0	6	-
Estación del año	0	1	-
Bajo Canalón	0	1	-
*Velocidad de extracción (t/m ² día)	1*10 ⁻³	1,9	0,34 ± 0,2
*Uniformidad	0%	100%	71 ± 29%
SECTOR RENO			
Variable	Valor Mínimo	Valor Máximo	Promedio
Razón de Extracción	0	5,26	0,45 ± 0,49
Altura in-situ (m)	180	740	281 ± 185
Altura de primario (m)	120	540	213 ± 82
Altura a topografía (m)	400	740	557 ± 77
Vecindad Barro	0	6	-
Estación del año	0	1	-
Bajo Canalón	0	1	-
*Velocidad de extracción (t/m ² día)	9*10 ⁻⁵	14,7	0,39 ± 0,4
*Uniformidad	0%	100%	68 ± 30%

La base de datos construida contiene registros de extracción, es decir, se cuenta con la información de extracción de cada punto de los sectores ES (B1), DR y NN a escala mensual. Por ejemplo, la Tabla 25 muestra un registro de extracción para el punto 2130F del sector del ES (B1) para el mes de Noviembre-2014 (estación del año igual a 0, corresponde al mes de noviembre, es decir, mes de primavera). Ese mes el porcentaje de extracción acumulado del punto, respecto de la columna in-situ de mineral fue de un 33% (variable que cambia en el tiempo y aumenta a medida que aumenta la extracción), la altura in-situ del punto es 149 m, la altura de primario 149 m y la altura a topografía 649 m (variables fijas y únicas para cada punto de extracción que no cambian en el tiempo), además para ese mes, el punto no fue declarado barro (columna "barro" igual a 0).

Tabla 25 Registro de extracción para el punto ES2130F del ES (B1).

PUNTO	FECHA	BARRO	ESTACION AÑO	A. TOPOGRAFIA (m)	A. PRIMARIO (m)	% EXTRACCIÓN	IN SITU (m)	Bajo Canalón
ES2130F	11-2014	0	0	649	149	0,33	149	1

En la Tabla 26 se presenta la cantidad de datos utilizados en la construcción de las bases de datos necesarias para obtener un modelo de regresión logística de cada sector en estudio, es importante distinguir los datos que son declarados como agua-barro. Por ejemplo el sector Esmeralda Bloque 1, presenta 29 puntos con ingreso de agua-barro (esto considera tanto barro con ingreso vertical y lateral), lo que es equivalente al 0.51% del total de datos con registro de extracción que se posee de este sector.

Tabla 26 Número de datos de cada base de datos para los distintos sectores en análisis.

Sector	Número de datos totales	Número de datos de declaraciones de barro
DR	18.262	157 (0,85%)
RENO	43.954	263 (0,59%)
ES (B1)	5.623	29 (0,51%)

4.3.1 Base de datos para regresión Logística

La intrusión de agua-barro en las columnas de extracción es considerada un evento raro, como se muestra en la Tabla 12, el ingreso de barro es inferior al 1% de los datos recolectados. Es por esto que al aplicar la regresión logística (mayor detalle sobre regresión logística en ANEXO B) a eventos raros es necesario que la base de datos se encuentre balanceada entre los eventos raros (puntos de extracción que presentan ingreso de agua-barro) y los casos no raros (puntos de extracción sin registro de ingreso de agua-barro). El balance de la base de datos consiste en que los registros de agua-barro, deben corresponder a un cuarto del total de la base de datos, en cambio, los eventos no raro o registros de no barro, deben corresponder a tres cuartas partes de la base de datos total (King & Zeng, 2001).

Se construye una base de datos para cada tipo de ingreso de agua-barro (ingreso con un mecanismo vertical y lateral) para los sectores ES (B1), DR y NN. Por lo tanto, se considera la totalidad de los registros de ingreso de agua-barro y se realiza una selección aleatoria de los registros de eventos no raros.

En la literatura se plantea como regla general, que los modelos multivariantes de regresión logística no deben tener más variables, que un décimo del número de datos con presencia de fenómenos (Hosmer & Lemeshow, 2013). Por lo que se utiliza esto como referencia sobre la cantidad de variables que aproximadamente puede contener el modelo de ingreso de agua-barro. En la Tabla 27 se presenta la cantidad de barros con mecanismo de ingreso vertical y lateral para los sectores ES (B1), DR y NN.

Al observar la cantidad de barrores verticales en el sector ES (B1) de 8 registros, se desprende que no es posible construir un modelo de regresión logística para este mecanismo según lo planteado por Hosmer & Lemeshow, (2013). Por lo que al construir un modelo solo con el sector Esmeralda B1, se obtendría un modelo de regresión logística poco robusto.

Existe la posibilidad de unir bases de datos de dos o más sectores. Se debe tener especial atención en que los sectores tengan similitudes en cuanto a las condiciones de borde, geometría y fuente de barro. Por ejemplo, se podrían juntar las bases de datos de dos sectores bajo canalón (condición de borde), con alturas in-situ dentro del mismo rango (condición de geometría) y ambos bajo sectores superiores antiguos cerrados por barro (misma fuente de barro). El sector DR comprende parte de su área total, bajo sector de canalón (60% del área de DR se encuentra bajo canalón) y ES (B1) se comprende en su totalidad bajo canalón. La altura de primario del sector DR posee un mínimo de 150 metros y un máximo de 750 con un promedio de 322 ± 225 , por otro lado, el sector ES (B1) posee una altura de primario promedio de 149 ± 0 .

Para este estudio se unieron las bases de datos de los sectores DR (157 eventos) y ES (B1) (29 eventos) debido a condiciones de borde similares y poseer altura de primario en el sector ES (B1) muy similar a las alturas mínimas comprendidas en el sector DR, de esta manera el modelo resultante será robusto desde el punto de vista estadístico. Por otro lado para el caso de NN se tiene una cantidad de barrores que permite construir por sí sólo un modelo robusto.

Tabla 27 Número de puntos de extracción entre verticales y laterales para los sectores ES (B1), DR y NN.

Sector	Número de datos de barro vertical	Número de datos de barro lateral
ES(B1)	8	21
DR	26	131
RENO	41	222

4.3.1.1 Base de datos para modelo de ingreso de barro vertical

Para la construcción de esta base de datos se consideran como evento raro el ingreso de agua-barro registrado bajo el mecanismo vertical. En la Ilustración 36 (b) se ejemplifica la construcción de la base de datos para un mecanismo de ingreso vertical de barro para los sectores ES (B1) y DR, estos sectores suman una cantidad de 34 puntos de extracción precursores en estado de agua. En la Ilustración 36 (a) se ejemplifica el sector NN que presenta una cantidad de 41 puntos con ingreso de agua-barro de forma vertical.

Como se mencionó en la sección “Base de datos para regresión Logística”, estos registros de agua-barro con ingreso vertical corresponde a la cuarta parte de la base de datos total y se debe completar con registros de no barro.

Para poder incluir en las bases de datos puntos de extracción sin ingreso de agua-barro se realizó un muestreo aleatorio estratificado uniforme, considerando la altura de columna in-situ como estrato a muestrear cada 25 metros en el caso de RENO y para el modelo DR-ES (B1) se estratifico respecto a la altura a topografía con estratos de 25 metros (en ANEXO C se explica el análisis estratificado).

Para completar la base de datos de los sectores ES (B1) y DR fue necesario agregar 102 registros de no barro, lo que representa tres cuartas partes del total de la base de datos. En el caso de la base de datos del sector NN fue necesario incorporar 123 registros de no barro, lo que constituye tres cuartas partes de la base de datos de este sector. Todo esto se ejemplifica en la Ilustración 36.

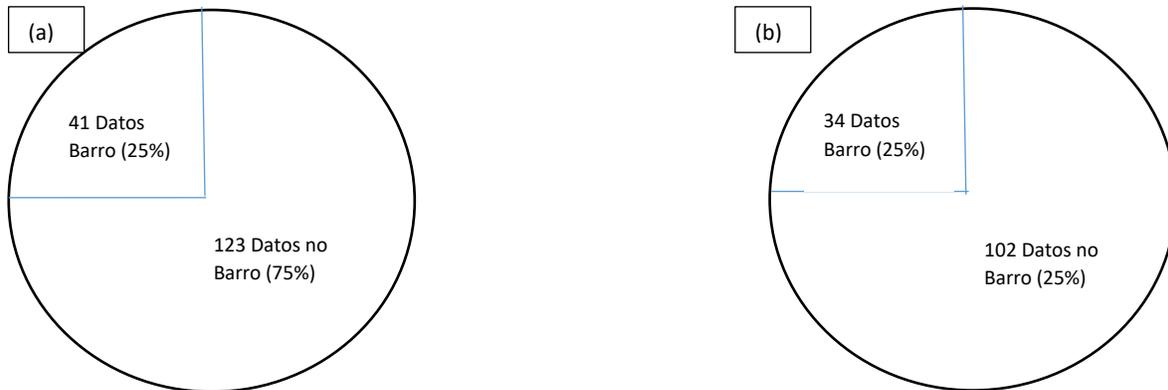


Ilustración 36 Porcentaje de registros de barro y no barro para la construcción de la base de dato de ingreso de barro vertical. (a) Sector RENO (b) Sector DR ES (B1)

4.3.1.2 Base de datos para modelo de ingreso de barro lateral

De la misma forma que se construyeron las bases de datos de ingreso de barro vertical, se elabora la base de datos de barro lateral. La construcción de la base de datos para el modelo de agua-barro lateral incorpora la totalidad de los registros de ingreso de agua-barro bajo este mecanismo como fenómenos de eventos raros, lo cual pondera una cuarta parte de la totalidad de información de la base de datos, tres cuartas partes la conforman puntos de extracción que no presentan registro de agua barro.

En la Ilustración 37 (a) se muestra la base de datos de sector RENO la cual presenta 222 puntos con ingreso de agua-barro de forma lateral y se completa con 696 registros de no barro. En la Ilustración 37 (b) se exhibe la base de datos de los sectores DR y ES (B1), que se conforma de 152 puntos declarados barro y 456 puntos donde no se registra ingreso de agua-barro.

La selección de los puntos que no presentan agua-barro en su columna de extracción, se realizó con un muestreo aleatorio estratificado uniforme, considerando la altura de columna in-situ como estrato a muestrear cada 25 metros en el caso de RENO y para el modelo DR-ES (B1) se estratifico respecto a la altura a topografía, con estratos de 25 metros. (En ANEXO C se explica el análisis estratificado).

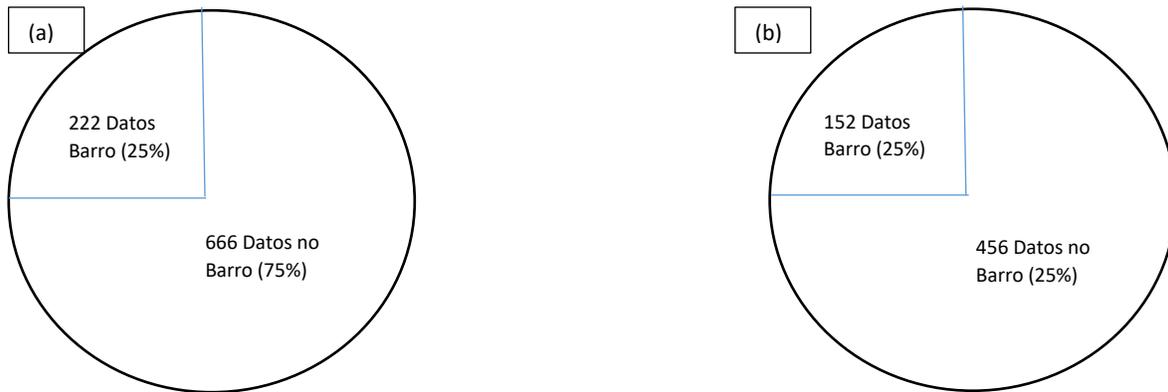


Ilustración 37 Porcentaje de registros de barro y no barro para la construcción de la base de dato de ingreso de barro lateral. (a) Sector RENO, (b) Sector ES DR (B1).

4.4 Modelo de regresión logística multivariable

En general, la regresión logística se basa en el cálculo de probabilidades, la cual se estima a partir de información estadística. Para el desarrollo de un modelo predictivo de ingreso de agua-barro se utiliza este método. Con la regresión logística se utiliza como variable dependiente y dicotómica la declaración de ingreso de agua-barro. Las ventajas de la regresión logística es que permite un análisis multivariable.

4.4.1 Modelo de ingreso vertical

Para comenzar la construcción del modelo de regresión logística de ingreso de agua-barro se realiza un análisis de colinealidad, donde se verifica que no exista, para no proporcionar información redundante en los modelos.

Los resultados de colinealidad se muestran en ANEXO D, donde se muestra que no existe colinealidad entre las variables estudiadas, por lo que se pueden implementar sin proporcionar información redundante.

Se realiza un análisis univariable (En ANEXO B se explica en detalle la regresión logística y pasos para determinar el modelo) de las bases de datos. En la Tabla 28 y Tabla 29 se presentan los resultados de este análisis para el sector ES (B1)-DR y NN respectivamente.

Tabla 28 Análisis univariable para modelo de ingreso vertical de barro - Sectores ES (B1) y DR.

Variable	Coficiente Beta	Significancia
Razón de Extracción	4,897	7×10^{-9}
Altura in-situ (m)	-0,011	1×10^{-6}
Altura de primario (m)	-0,026	3×10^{-6}
Altura a topografía (m)	-0,028	2×10^{-5}
Estación del año	-0,566	0,050
Bajo Canalón	3,730	1×10^{-6}

Tabla 29 Análisis univariable para modelo de ingreso vertical de barro – Sector RENO.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia
Razón de Extracción	3,04	8×10^{-10}
Altura in-situ (m)	-0,005	2×10^{-7}
Altura de primario (m)	-0,009	1×10^{-5}
Altura a topografía (m)	-0,01	5×10^{-5}
Estación del año	-0,19	0,58
Bajo Canalón	2,463	9×10^{-7}

Desde lo que se aprecia en la Tabla 28, se puede observar que todas las variables analizadas para el caso de los sectores ES (B1) y DR poseen significancia estadística (para un valor de significancia menor a 20%), es decir, se aceptan los coeficientes betas de todas las covariables son diferentes de cero en esta etapa. A partir de lo observado en el análisis univariable en la Tabla 28, se determina que todas las variables estudiadas pueden ser utilizadas para desarrollar un modelo multivariable de regresión logística.

En la Tabla 29 se presentan los resultados del análisis univariable de las variables consideradas para el sector NN, se puede observar que la variable “Estación de año” es la única que no posee significancia estadística (para un valor de significancia menor a 20%), es decir, que el ponderador de esta variable no se acepta, por lo que se debe evaluar el comportamiento de esta variable al ingresarla en un modelo multivariable.

Desde el análisis univariable, se desprende que todas las covariables pueden ser parte de los modelos multivariables, excepto la variable “Estación del año” que se debe evaluar su comportamiento.

La literatura menciona, como regla general, que los modelos multivariables no deben tener más de un décimo del número de eventos raros (Hosmer & Lemeshow, 2013). En la Tabla 18 se muestra el número de variables recomendado que podría tener el modelo de ingreso de barro vertical de cada sector.

Tabla 30 Número de variables permitidas para cada modelo vertical.

Sector	Número de eventos barro	Número máximo de variables recomendado para el modelo
ES(B1) y DR	34	$34/10 = 3,4$ (máximo 3 variables)
RENO	41	$40/10 = 4,1$ (máximo 4 variables)

En la Tabla 31 se muestran los modelos de barro vertical que se evalúan para el sector ES (B1) y DR. De lo observado en el análisis univariable podemos decir que es posible utilizar todas las variables, pero restringidas a una cantidad de variables. Es por esto que se evaluaron distintos modelos y en base a los resultados obtenidos se selecciona el que realiza un mejor ajuste.

Como la variable con que se estratifica la base de datos para el sector DR-ES (B1) es la “Altura a topografía”, se busca que esta no se encuentre en el modelo de regresión logística final, debido a que es una variable sesgada, de igual forma se muestra el efecto de la Altura a topografía. Un criterio de elección de modelo es el -2 Log likelihood que es un estadístico que indica la calidad de ajuste entre los datos observados y los estimados. Mientras menor es el valor estadístico, mejor es el ajuste

del modelo (Hosmer y Lemeshow, 2013), por lo que se busca el modelo con menor valor para este estadístico.

Tabla 31 Modelos de ingreso vertical - Sector ES (B1) y DR.

Modelo Multivariable 1			-2 Log likelihood
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	53.356
Razón de Extracción	3,565	2x10 ⁻⁴	
Bajo Canalón	1,088	0,314	
Altura primario (m)	-0,006	0,0.339	
contante	-2,449	-	
Modelo Multivariable 2			-2 Log likelihood
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	53.558
Estación del año	-0,679	0,375	
Razón de Extracción	3,542	2x10 ⁻⁴	
Altura primario (m)	-0,009	0,089	
constante	-0,685	-	
Modelo Multivariable 3			-2 Log likelihood
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	53.876
Razón de Extracción	4,993	2,2x10 ⁻⁷	
Estación del año	-1,075	0,2095	
Altura a topografía (m)	-0,032	0,006	
constante	15,741	-	
Modelo Multivariable 4			-2 Log likelihood
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	53.882
Razón de Extracción	4,175	2,2x10 ⁻⁵	
Bajo Canalón	1.578	0,09	
Altura topografía (m)	-0.028	0,3	
contante	12.434	-	
Modelo Multivariable 5			-2 Log likelihood
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	52.937
Razón de Extracción	3,518	2x10 ⁻⁴	
Bajo Canalón	0,917	0,426	
Altura primario (m)	-0.006	0,328	
Estación del año	-0.508	0.520	
contante	-2,032	-	

Se puede observar que para los modelos planteados, todos tienen al menos una variable que supera la significancia permitida, sin embargo, los modelos 1, 2, 3 y 4 entregan valores mayores para -2 Log likelihood. Estos modelos son descartados y se evalúa el Modelo 5 desde el punto de vista del efecto de co-linealidad.

Se debe determinar la variación de los ponderadores de las variables de un modelo con las variables pre-eliminadas y sin las variables. En este caso, la variable no eliminada es “Razón de Extracción”.

Estos resultados se muestran en Anexos E, por lo que el modelo final de ingreso de agua-barro para los sectores DR-ES (B1) es el modelo 5 de la Tabla 31

A continuación se presentan, los modelos multivariantes evaluados para ingreso de agua-barro bajo el mecanismo vertical para sector RENO.

Tabla 32 Modelos de ingreso vertical - Sector RENO.

Modelo Multivariable 1			-2 Log likelihood
Variable	Coeficiente Beta	Significancia	
Razón de Extracción	2,394	2x10 ⁻⁶	111.292
Altura primario (m)	-0,002	0,34	
Bajo Canalón	1,174	0,05	
constante	-2,339	-	
Modelo Multivariable 2			-2 Log likelihood
Variable	Coeficiente Beta	Significancia	
Razón de Extracción	2,532	2x10 ⁻⁷	112.207
Bajo Canalón	1,427	0,01	
constante	-2,938	-	
Modelo Multivariable 3			-2 Log likelihood
Variable	Coeficiente Beta	Significancia	
Razón de Extracción	2,749	1x10 ⁻⁵	112.109
Bajo Canalón	1,145	0,09	
Altura primario (m)	-0.001	0,05	
Estación del año	-0.899	0,15	
constante	-1,163	-	
Modelo Multivariable 4			-2 Log likelihood
Variable	Coeficiente Beta	Significancia	
Razón de Extracción	3,385	3x10 ⁻⁶	112.308
Bajo Canalón	1,294	0,05	
Altura in-situ (m)	-0.001	0,41	
Estación del año	-0.748	0,15	
constante	-2,178	-	

El modelo resultante para ingreso de agua-barro vertical en sector RENO es el modelo 3 de la Tabla 32. (En Anexos E se muestra que la incorporación de las variables genera una variación en los coeficientes beta menor a 20%). Se rechaza el modelo 1 ya que la variable “Altura primario” produce una variación en los coeficientes beta mayor a 20% en las otras variables que conforman el modelo (ver Anexos E).

Finalmente, los modelos de ingreso de barro vertical para cada sector son los que se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33 Modelos de ingreso de barro vertical para los sectores ES (B1), DR y NN.

Sector	Modelo	Variables
ES(B1) y DR	$p(x) = \frac{e^{-2,032+3,518*RE+0,917*C-0,006*Hp-0,508*E}}{1 + e^{-2,032+3,518*RE+0,917*C-0,006*Hp-0,508*E}}$	RE: razón de extracción C: bajo canalón Hp: altura primario (m) E: estación del año
RENO	$p(x) = \frac{e^{-1,163+2,749*RE+1,145*C-0,007*Hp-0,899*E}}{1 + e^{-1,163+2,749*RE+1,145*C-0,007*Hp-0,899*E}}$	RE: razón de extracción C: bajo canalón Hp: altura primario (m) E: estación del año

En ANEXO G se muestra la influencia de cada variable en los modelos presentados en la Tabla 33.

4.4.2 Modelo de ingreso lateral

Se realiza un análisis de colinealidad, donde se verifica que no exista, para no proporcionar información redundante en los modelos. Los resultados de colinealidad se muestran en ANEXO D, donde se muestra que no existe colinealidad entre las variables estudiadas, por lo que se pueden implementar sin proporcionar información redundante.

A continuación, se muestra el análisis univariable de las variables en estudio para la construcción de este modelo para los tres sectores que se analizan.

Tabla 34 Análisis univariable para modelo de ingreso lateral de barro - Sectores ES (B1) y DR.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia
Razón de Extracción	6,738	4×10^{-27}
Altura in-situ (m)	-0,021	0.028
Altura de primario (m)	-0,006	4×10^{-4}
Altura a topografía (m)	-0,037	1×10^{-24}
Estación del año	0,53	5×10^{-4}
Bajo Canalón	3,802	7×10^{-19}
Vecindad Barro	3,249	8×10^{-25}

Tabla 35 Análisis univariable para modelo de ingreso lateral de barro – Sector RENO.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia
Razón de Extracción	1,800	4×10^{-46}
Altura in-situ (m)	-0,007	7×10^{-37}
Altura de primario (m)	-0,017	7×10^{-29}
Altura a topografía (m)	-0,016	1×10^{-37}
Estación del año	0,21	0,16
Bajo Canalón	2,903	3×10^{-45}
Vecindad Barro	3,760	7×10^{-28}

En la Tabla 34 se presenta el resultado del análisis univariable para el caso de DR y ES (B1), ahí se muestra que todas las variables poseen significancia estadística (para un valor de significancia menor a 20%), es decir, se acepta que los coeficientes beta de todas las covariables, ya que son diferentes de cero en esta etapa. Lo mismo ocurre con el análisis univariable del sector NN, donde sus resultados se muestran en la Tabla 35.

De igual forma que en el caso de los modelos verticales, en este caso se tiene que los modelos multivariantes se recomienda tener como máximo un décimo del número de eventos raros (Hosmer & Lemeshow, 2013). En la Tabla 36 se muestra el número máximo de variables recomendadas que podría tener el modelo de ingreso de barro lateral de cada sector.

Tabla 36 Número de variables permitidas para cada modelo lateral.

Sector	Número de eventos barro	Número máximo de variables recomendado para el modelo
ES(B1) y DR	152	152/10 = 15,2 (máximo 15 variables)
RENO	222	222/10 = 22,2 (máximo 22 variables)

En la Tabla 37 se muestran 3 modelos multivariantes para el sector ES (B1) y DR. Como la variable con que se estratifica la base de datos para el sector DR-ES (B1) es la "Altura in-situ", se busca que esta no se encuentre en el modelo de regresión logística final, debido a que es una variable sesgada. De la misma forma que en el modelo de ingreso de agua-barro vertical, en este caso se busca que el -2 Log likelihood, se mínimo para obtener un mejor ajuste.

Tabla 37 Modelos de ingreso lateral - Sector ES (B1) y DR.

Modelo Multivariable 1			
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	-2 Log likelihood
Razón de Extracción	3,280	1x10 ⁻⁴	65.671
Vecindad Barro	2,167	5x10 ⁻¹¹	
Estación del año	-0,299	0,192	
Altura de primario (m)	-0,098	0,927	
Bajo Canalón	-5,234	1x10 ⁻⁴	
constante	-15,419	-	
Modelo Multivariable 2			
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	-2 Log likelihood
Razón de Extracción	3,129	6x10 ⁻⁵	66.919
Vecindad Barro	2,283	1x10 ⁻⁷	
Altura de primario (m)	-0,061	0,664	
constante	4,599	-	
Modelo Multivariable 3			
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	-2 Log likelihood
Razón de Extracción	3,135	6x10 ⁻⁵	66.289
Vecindad Barro	2,298	1x10 ⁻⁷	
Altura de primario (m)	-0,060	0,652	
Estación del año	-0,236	0,728	
constante	4,508	-	

Se acepta el modelo 3 con tolerancia para la variable “Altura de primario” y “Estación del año” (además estas variables no provocan una variación superior al 20% en los ponderadores de las otras variables cuando es incorporada al modelo como se aprecia en Anexos E). Por lo tanto, el modelo de ingreso lateral de barro para el sector ES (B1) y DR está definido por las variables “Razón de Extracción”, “Vecindad Barro”, “Altura de primario (m)” y “Estación del año”

En la Tabla 38 se muestran los principales modelos de regresión logística para ingreso de agua-barro con mecanismo lateral en el sector RENO. Al realizar el análisis de variabilidad, la variable “Altura de primario” y “Estación del año” en el modelo multivariable 1 no generan una variabilidad e los coeficientes beta de las otras variables superior al 20%, estos resultados se muestran en Anexos E. Por lo que se selecciona el modelo multivariable 1.

Tabla 38 Modelo de ingreso de barro lateral - Sector RENO.

Modelo Multivariable 1			
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	-2 Log likelihood
Razón de Extracción	2,978	1x10 ⁻¹⁵	198.611
Vecindad Barro	2,400	3x10 ⁻¹¹	
Altura primario(m)	-0,003	0,132	
Estación del año	-0,418	0,299	
constante	-3,679	-	
Modelo Multivariable 2			
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	-2 Log likelihood
Razón de Extracción	2,986	1x10 ⁻¹⁵	198.504
Vecindad Barro	2,359	6x10 ⁻¹⁰	
Estación del año	-0,422	0,297	
Altura de primario (m)	-0,003	0,196	
Bajo Canalón	0,176	0,74	
constante	-3,790	-	
Modelo Multivariable 3			
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	-2 Log likelihood
Razón de Extracción	2,982	9x10 ⁻¹⁶	199.706
Vecindad Barro	2,340	2x10 ⁻¹¹	
Altura de primario (m)	-0,003	0,121	
constante	-3,837	-	
Modelo Multivariable 4			
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	-2 Log likelihood
Razón de Extracción	3,451	8x10 ⁻¹⁴	200.343
Vecindad Barro	2,684	4x10 ⁻¹⁴	
Altura in-situ (m)	0,0009	0.420	
Estación del año	-0,448	0,264	
constante	-5,489	-	

Finalmente, los modelos de ingreso de barro lateral para cada sector son los que se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39: Modelos de ingreso de barro lateral para los sectores ES (B1), DR y NN.

Sector	Modelo	Variables
ES(B1) y DR	$p(x) = \frac{e^{4,599+3,12*RE-0,23*E+2,29*V_B-0,060*Hp}}{1 + e^{4,599+3,12*RE-0,23*E+2,29*V_B-0,060*Hp}}$	RE: razón de extracción E: estación del año VB: vecindad barro Hp: altura primario (m)
RENO	$p(x) = \frac{e^{-3,679+2,978*RE-0,418*E+2,400*V_B-0,003*Hp}}{1 + e^{-3,679+2,978*RE-0,418*E+2,400*V_B-0,003*Hp}}$	RE: razón de extracción E: estación del año VB: vecindad barro Hp: altura primario (m)

En ANEXO G se muestra la influencia de cada variable en los modelos presentados en la Tabla 33.

4.5 Calibración de modelos de regresión logística

En esta sección se realiza la calibración de los modelos de regresión logística para ingreso de agua-barro, esto consiste en determinar la probabilidad de corte a la cual se declaran como barro los puntos de extracción.

La calibración del modelo se realiza replicando la extracción histórica mensual y extendiendo la extracción de los puntos declarados como agua-barro o vecinos hasta diciembre del 2015. Esto se realiza para los sectores Reservas Norte, Diabolo regimiento y Esmeralda Bloque 1.

La calibración se realiza con la implementación de los modelos de ingreso de barro vertical y lateral de forma conjunta, es decir, si un punto de extracción no presenta vecinos con declaración de agua-barro se implementa el modelo de ingreso de agua barro vertical, en cambio, si posee al menos un punto de extracción vecino con agua-barro, se utiliza el modelo de ingreso de agua-barro lateral correspondiente.

$$p(x) = \begin{cases} P_V(x) = \frac{e^{-2,032+3,518*RE+0,917*C-0,006*Hp-0,508*E}}{1 + e^{-4,22+5,74*RE+0,88*C-0,0003*Hi}} & \text{si } VB = 0, \text{ para } PC_V \\ P_L(x) = \frac{e^{4,599+3,12*RE-0,23*E+2,29*V_B-0,060*Hp}}{1 + e^{-2,95+2,46*RE+0,65*E+1,53*V_B-0,007*Hi}} & \text{si } VB > 0, \text{ para } PC_L \end{cases}$$

Donde:

RE: razón de extracción

E: Estación del año

V_B: Vecindad Barro

Hp: altura primario [m]

C: Bajo Canalón

La calibración se realiza respecto a la probabilidad de corte (P_c) que mejor ajusta los datos a la realidad, maximizando la probabilidad de ocurrencia del ingreso. El principal objetivo de los modelos de regresión logística para el ingreso de agua-barro, es que prediga con el menor error posible el tonelaje promedio extraído por los puntos de extracción, previo al ingreso de barro.

Para esto se deben definir probabilidades de corte para cada modelo. Los resultados se muestran en la Tabla 40.

Tabla 40 Probabilidades de corte seleccionadas para cada sector.

Sector	Probabilidad de corte modelo ingreso de barro vertical (%) VB=0	Probabilidad de corte modelo ingreso de barro lateral (%) VB>0
ES (B1)	88%	97%
DR	97%	96%
RENO	97%	98%

En la Ilustración 38, Ilustración 39 e Ilustración 40 se muestran los resultados de los sectores ES (B1), DR y RENO, respectivamente. Se muestra una nube de dispersión, que en el eje X muestra el PEB según los datos mina, y en el eje Y, el PEB entregado por la simulación.

En la Tabla 41 se muestran las probabilidades de corte seleccionadas para cada modelo, con las cuales se obtiene la mejor estimación para la nube de dispersión. El análisis es realizado punto a punto.

Tabla 41 Error medio de calibración de datos

Modelo	Probabilidad de corte (Modelo Vertical-Modelo Lateral)	Error medio datos [%]
DR	97% - 96%	12,33
ES(B1)	88% - 97%	0,24
RENO	97% - 98%	13,81

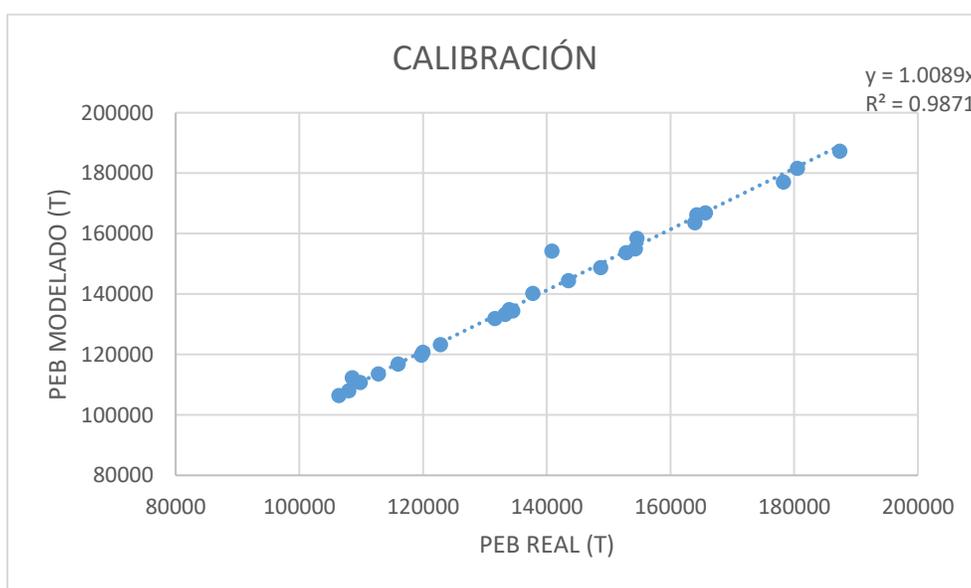


Ilustración 38 Nube de dispersión del PEB en toneladas – Sector ES (B1).

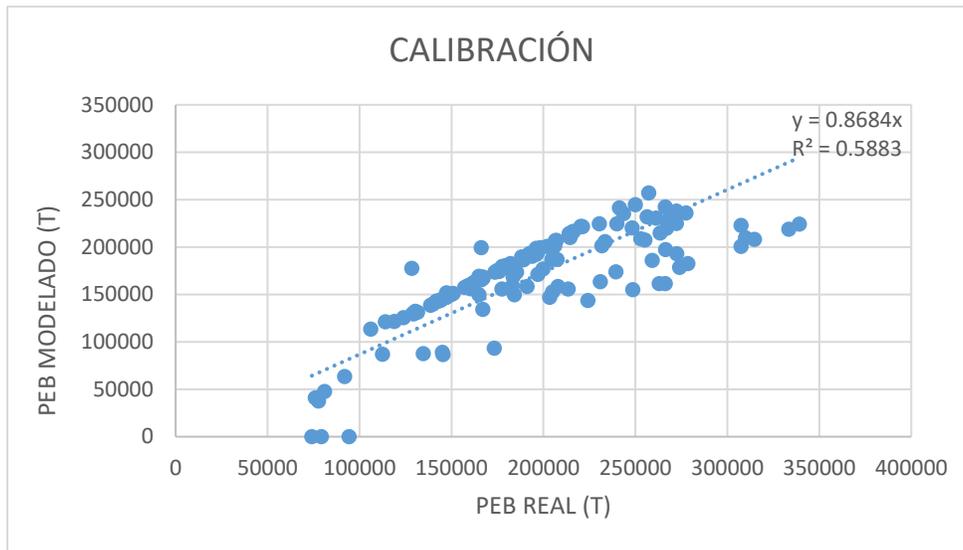


Ilustración 39 Nube de dispersión del PEB en toneladas – Sector DR

En este caso, para el sector DR se muestra el modelo de ingreso de agua- barro tiende a declarar los puntos en estado de agua-barro previo a lo sucedido en la realidad.

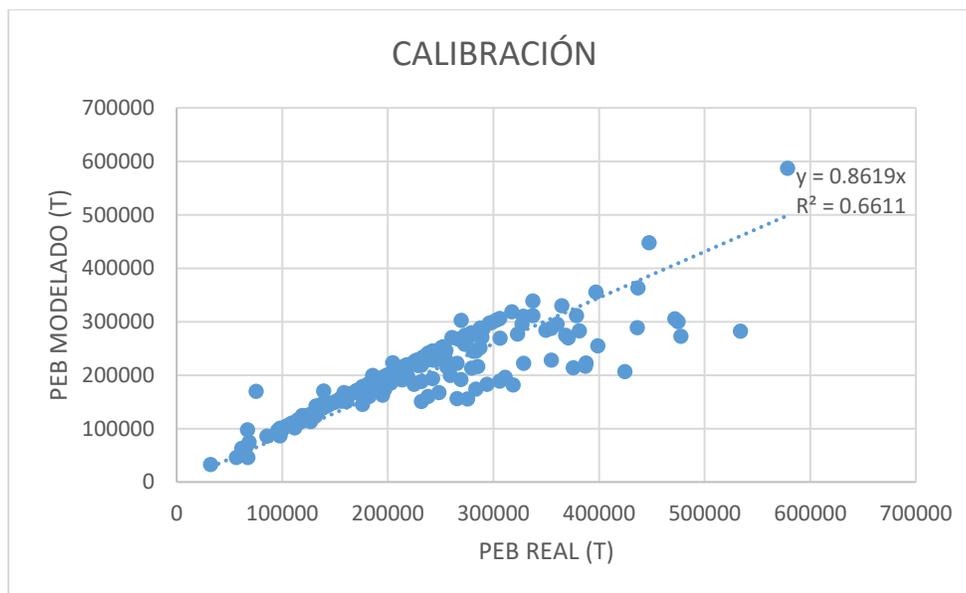


Ilustración 40 Nube de dispersión del PEB en toneladas – Sector RENO.

En este caso se muestra el modelo de ingreso de agua- barro tiende a declarar los puntos en estado de agua-barro previo a lo sucedido en la realidad.

Por lo apreciado en la Ilustración 38 se tiene que el modelo del sector ES (B1) logra predecir aproximadamente de forma correcta la declaración de agua-barro de estos sectores ya que el ajuste y dispersión de datos es bueno.

En la Tabla 42 se muestra el resultado del ajuste de regresión lineal sobre los puntos de los sectores analizados, es una relación entre los datos observados y datos modelados.

Tabla 42 Correlación directa entre PEB real y modelado Sectores ES (B1), DR y NN.

Sector	Correlación
ES (B1)	$PEB_{\text{MODELADO}} = 1,089 * PEB_{\text{OBSERVADO}}$
DR	$PEB_{\text{MODELADO}} = 0,868 * PEB_{\text{OBSERVADO}}$
RENO	$PEB_{\text{MODELADO}} = 0,8619 * PEB_{\text{OBSERVADO}}$

Para complementar la validación de los modelos en ANEXO F se muestra los resultados de la prueba de Hosmer-Lemeshow, que da como resultado que los modelos de regresión logística para ingreso de agua-barro se ajustan a la realidad, lo que valida los modelos construidos.

Para la selección del modelo de ingreso de agua-barro de cada uno de los sectores analizados, no solo se analiza la nube de dispersión entre PEB modelado y PEB real, sino que también se analiza la tabla de contingencia para cada modelo. Se busca que cada modelo de predicción de agua-barro posea una alta sensibilidad y especificidad. Estos resultados se muestran en Tabla 43, Tabla 44 y Tabla 45.

Tabla 43 Tabla de contingencia, con sensibilidad y especificidad de modelo de ingreso de agua-barro sector ES (B1)

Barros Verdaderos (un)	26/29
Barros Falsos (un)	34
No Barros Verdaderos (un)	133/167
No Barros Falsos (un)	3
Sensibilidad (%)	89,66
Especificidad (%)	79,64

El modelo de ingreso de agua-barro para el sector ES (B1), declara una cantidad de 34 barros falsos, estos tienen un porcentaje de extracción de columna in-situ de 153 ± 32 %. Al comparar estos puntos, con los barros verdaderos que son cerrados con 110 ± 25 %, se tiene que el modelo declara en estado agua-barro al extraer aproximadamente un 43% más que los barros verdaderos. Es decir, los 34 barros falsos poseen características para ser cerrados por ingreso de agua-barro.

Los puntos de extracción declarados como “No barros Falsos” en la Tabla 43, fueron declarados en estado agua-barro en la operación con un 64 ± 24 % de columna in-situ, lo que está por debajo del promedio de cierre en este sector.

Tabla 44 Tabla de contingencia, con sensibilidad y especificidad de modelo de ingreso de agua-barro sector DR

Barros Verdaderos (un)	140/157
Barros Falsos (un)	60
No Barros Verdaderos (un)	373/433
No Barros Falsos (un)	17
Sensibilidad (%)	89,17
Especificidad (%)	86,14

El modelo de ingreso de agua-barro para el sector DR, declara una cantidad de 60 barro falsos, estos tienen un porcentaje de extracción de columna in-situ de 122 ± 43 %. Al comparar estos puntos, con los barro verdaderos que son cerrados con 127 ± 46 . Por otro lado estos 60 puntos de extracción presentan una altura promedio de roca primaria, que es inferior a la altura promedio de roca primaria de declaración de agua-barro real, estos puntos poseen aproximadamente 27 metros menos. De los 60 puntos de extracción declarados de forma falsa, el 87% de los datos está bajo el canalón, por lo que poseen un mayor riesgo de ingreso de agua-barro.

Los puntos de extracción declarados como “No barro Falsos” en la Tabla 44, fueron declarados en estado agua-barro en la operación con un 59 ± 28 % de columna in-situ, lo que está por debajo del promedio de cierre en este sector.

Tabla 45 Tabla de contingencia, con sensibilidad y especificidad de modelo de ingreso de agua-barro sector NN

Barros Verdaderos (un)	217/263
Barros Falsos (un)	179
No Barros Verdaderos (un)	420/596
No Barros Falsos (un)	43
Sensibilidad (%)	83,43
Especificidad (%)	70,12

El modelo de ingreso de agua-barro para el sector NN, declara una cantidad de 179 barro falsos, estos tienen un porcentaje de extracción de columna in-situ de 117 ± 44 %. Al comparar estos puntos, con los barro verdaderos que son cerrados con 132 ± 53 . Los barro falsos tienen un tonelaje in-situ de 181.564 ± 88.743 , a diferencia de los barro verdaderos que poseen un tonelaje in-situ de 177.192 ± 88.675 y el modelo declara los puntos de ingreso agua-barro al extraer una PEB% menor que la realidad como se muestra en la Ilustración 40.

Los puntos de extracción declarados como “No barro Falsos” en la Tabla 44, fueron declarados en estado agua-barro en la operación con un 101 ± 30 % de columna in-situ, lo que está por debajo del promedio de cierre en este sector.

En las Ilustración 41, Ilustración 42 e Ilustración 43 se muestra la distribución del error como histograma de frecuencias relativas para los sectores ES (B1), DR y NN respectivamente. Se tiene que el promedio del error en el sectores ES (B1) es $0,107 \pm 2,2$ (kton), el caso de DR es de $19,9 \pm 36$ (kton), y RENO se tiene $22,6 \pm 47$ (kton). En todos los casos se aprecia que el error se encuentra en mayor frecuencia en torno a cero.

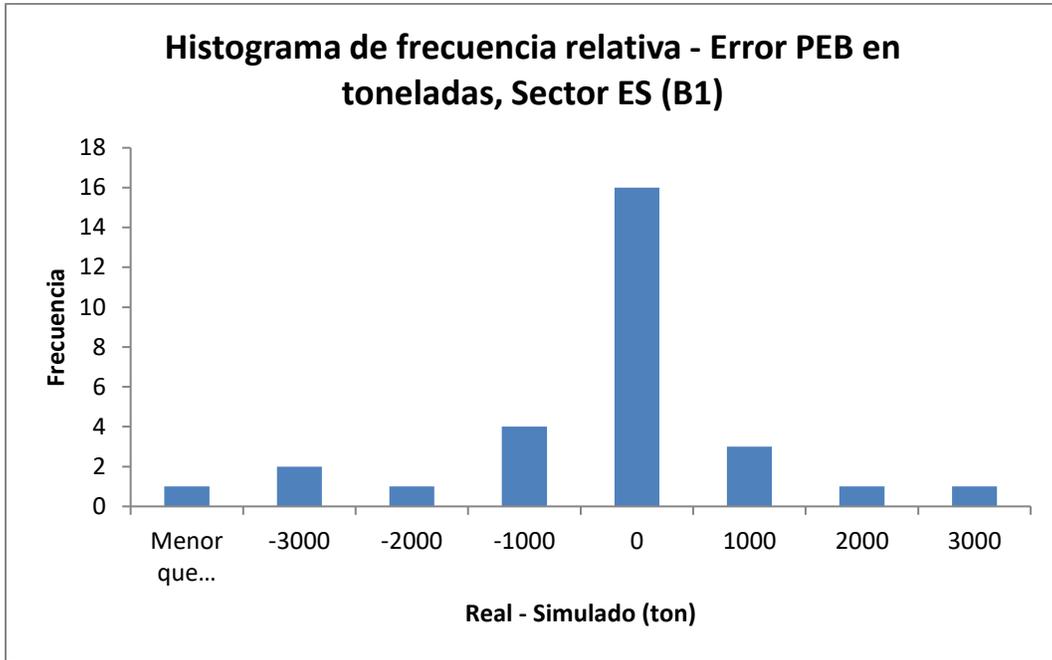


Ilustración 41 Análisis de error del tonelaje recuperado antes del ingreso de baro entre PEB observado y la estimación de los modelos (PEB modelado). Histograma de frecuencia relativa del error del PEB en tonelaje sector ES (B1)

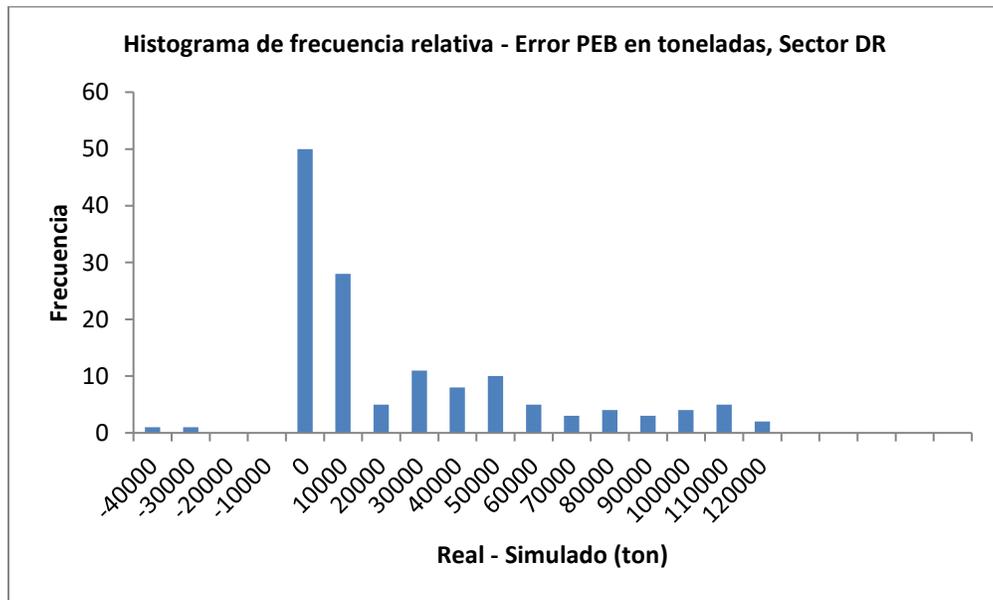


Ilustración 42 Análisis de error del tonelaje recuperado antes del ingreso de baro entre PEB observado y la estimación de los modelos (PEB modelado). Histograma de frecuencia relativa del error del PEB en tonelaje sector DR.

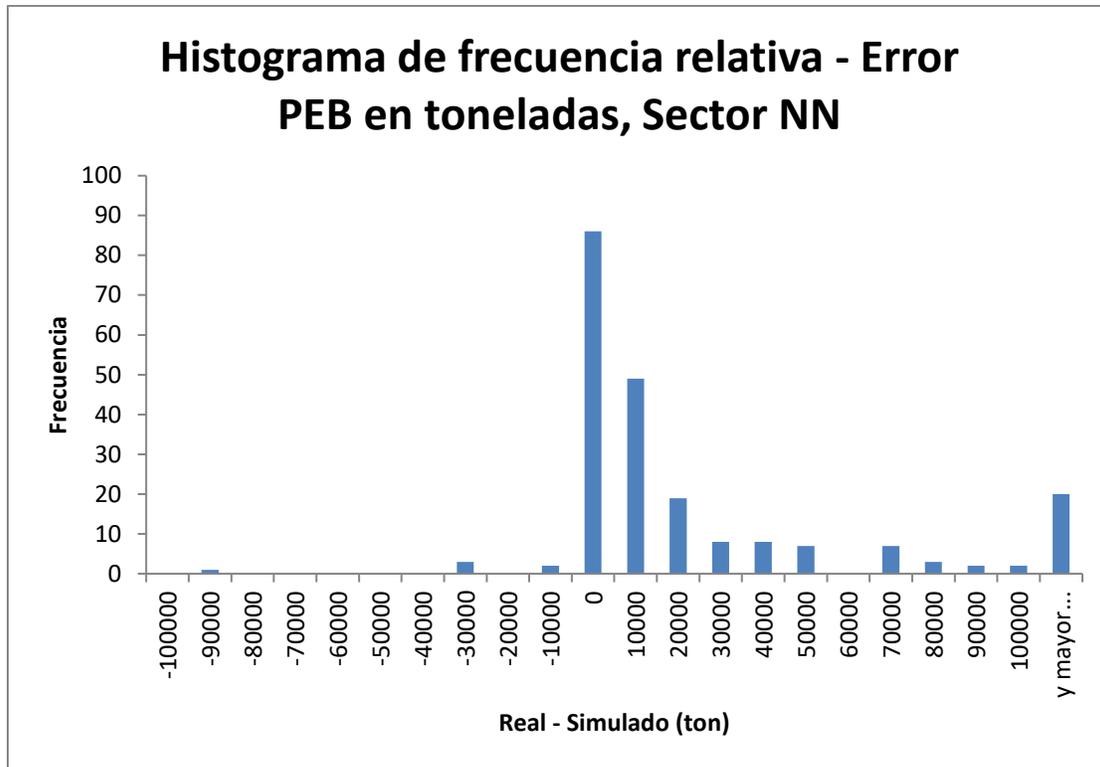


Ilustración 43 Análisis de error del tonelaje recuperado antes del ingreso de barro entre PEB observado y la estimación de los modelos (PEB modelado). Histograma de frecuencia relativa del error del PEB en tonelaje sector.

4.6 Análisis de incertidumbre

Como se muestra en la Tabla 42 la regresión posee un error medio el cual mide el sesgo, también se puede conocer la distribución que posee ese error, esto sirve para conocer la incerteza que se posee en el pronóstico y con ello la variabilidad de los parámetros.

En las siguientes ilustraciones se muestra el intervalo de confianza del ajuste lineal obtenido para el error considerando el límite superior e inferior. En el eje X se sitúan los valores de PEB real y en el eje y se muestra los valores simulados por los modelos de regresión logística para ingreso de agua-barro.

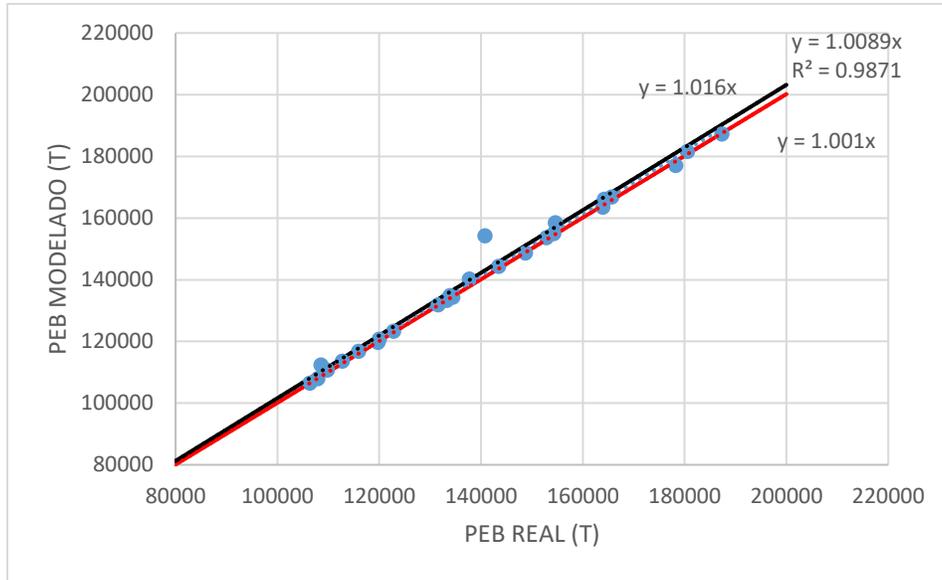


Ilustración 44 Intervalo con 95% de confianza del ajuste obtenido para sector ES (B1)

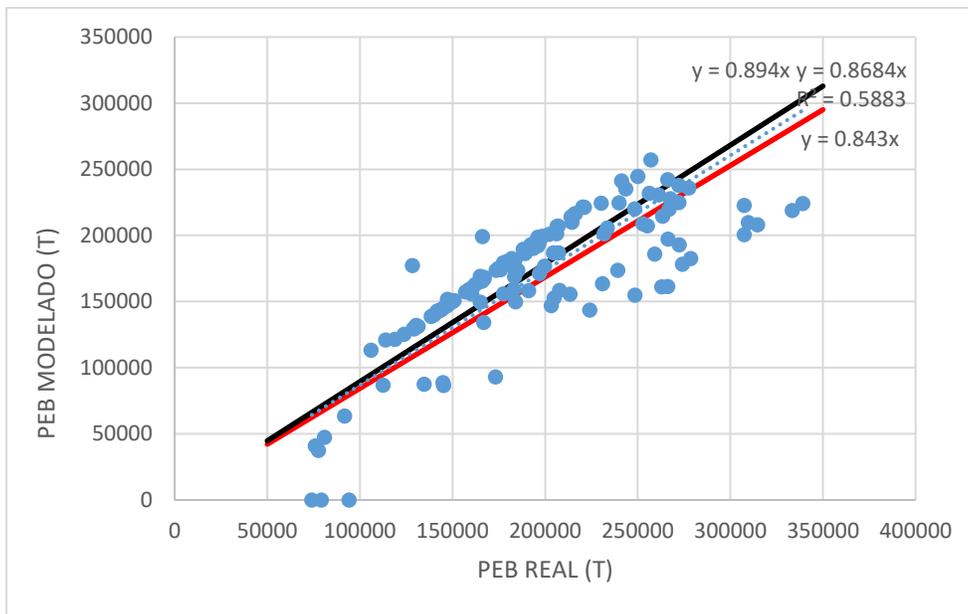


Ilustración 45 Intervalo con 95% de confianza del ajuste obtenido para sector DR

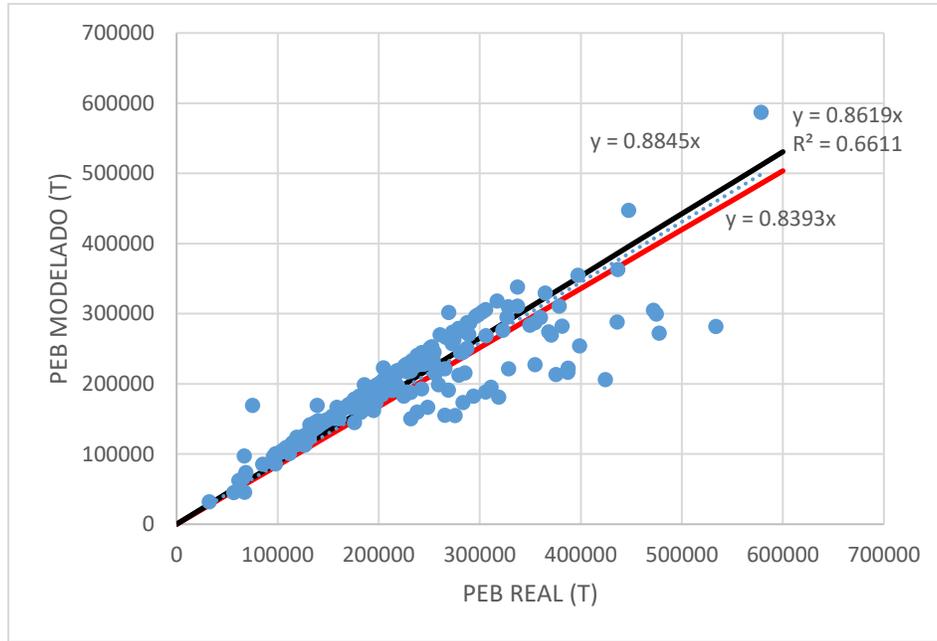


Ilustración 46 Intervalo con 95% de confianza del ajuste obtenido para sector RENO.

Tanto el límite superior como límite inferior mostrado en los gráficos anteriores representan un escenario de simulación, que son el caso optimista y caso pesimista de entrada de agua-barro-

El caso superior señala un ingreso de barro tardío respecto a los datos observados, en cambio en límite inferior representa el caso en que se simula un ingreso de agua-barro previo a lo señalado por los datos observados. En la Tabla 46 se presenta la variabilidad del error medio con un 95 % de confianza.

Tabla 46 Intervalo de confianza 95%, correspondiente al error medio

Modelo de ingreso de agua-barro	Límite inferior	Límite superior	Intervalo de confianza del error
ES (B1)	1,001	1,016	± 0,75 %
DR	0,843	0,894	± 2,55 %
RENO	0.8393	0,8845	± 2,26 %

Para los escenarios de simulación (optimista-pesimista) se puede relacionar con probabilidades de corte en los modelos de ingreso de agua-barro. Estos resultados se muestran en la Tabla 47

Tabla 47 Probabilidad de corte de modelos de ingreso de agua-barro que estima los límites del error medio

Modelo de ingreso de agua-barro	Límite del error medio	Valor del límite del error medio	Probabilidad de corte (Modelo vertical-Modelo Lateral)
ES (B1)	inferior	1,001	80% - 95%
	superior	1,016	89% - 97%
DR	inferior	0,843	97% - 94%
	superior	0,9009	98% - 98%
RENO	inferior	0.8393	97% - 97%
	superior	0,8845	97% - 99%

4.7 Puntos no barro

Los puntos no barro son llamados también barros falsos, se denomina así, a los puntos declarados en estado agua-barro por los modelos de regresión logística de ingresos de agua-barro según la probabilidad de corte adoptada. Para determinarlos, se evaluó el periodo de tiempo que se posee información utilizando los modelos de predicción y se compara los barros declarados por los modelos versus los barro en los datos reales. En la Tabla 48 se muestra la cantidad de puntos no barro que el modelo predice para cada sector dividido en la cantidad de puntos no barro reales, el tonelaje que el modelo predice que se extraerá de los puntos antes de ser declarados barro (PEB modelo), el tonelaje extraído a la fecha de Diciembre-2015 por los puntos (datos reales) y la diferencia, que se define como las reservas no recuperadas por el modelo.

Por ejemplo, para el sector ES (B1) el modelo estima que, de los 167 puntos no declarados barro, a 41 si le ingresaría barro, lo anterior significa que el modelo sobre-estima el ingreso de barro. Para este sector, se estimó, que en promedio el modelo no recupera reservas en torno a 45.402 ± 39.894 toneladas por cada punto de extracción, lo que representa un 24% menos de reservas recuperadas para los 41 puntos no barro que el modelo predice. Este error del PEB para los puntos no barro se debe, principalmente, a que el modelo de regresión logística no considera el esfuerzo realizado en la operación para evitar el ingreso de barro (control de tiraje y velocidad de extracción).

Tabla 48 Puntos no barro

Sector	Puntos No Barro	PEB modelo [ton]	Ton Extraído a Diciembre-2015 [ton]	Reservas no recuperadas por el modelo [ton]	Reservas no recuperadas promedio
ES(B1)	41/167	140.712 \pm 18.018	186.114 \pm 51.627	45.402 \pm 39.894	24%
DR	60/299	133.862 \pm 80.509	207.237 \pm 89.697	73.374 \pm 36.350	35%
RENO	112/597	220.655 \pm 77.201	269.862 \pm 110.493	49.206 \pm 55.416	18%

4.8 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó la metodología y construcción de base de datos necesarios para construir los modelos de ingreso de agua-barro y el proceso de desarrollo de estos modelos, como principales conclusiones se tiene:

La observación de ingreso de agua-barro en los sectores RENO, DR y ES (B1) muestran que este fenómeno posee dos mecanismo de ingreso, uno de forma vertical, para luego desplazarse de forma lateral, por esto se modela cada uno de estos.

Al realizar la construcción de modelos de regresión logística, se determinó que las variables que representan de mejor forma el ingreso de agua-barro vertical son: Razón de extracción de la columna in-situ, Canalón, Altura de roca primaria y la Estación del año.

Las variables que representan de mejor forma el ingreso de agua-barro lateral son: Razón de extracción de la columna in-situ, altura de roca primaria, vecinos barro y la Estación del año.

Los modelos construidos poseen un error medio inferior a 14% para todos los sectores. Se obtuvo la variabilidad del error de cada modelo, con un 95% confianza el modelo que posee mayor variabilidad del error es DR, el que posee un 2,55% respecto a tonelaje extraído. El caso de ES (B1) posee un 0,75% y en RENO 2,26%.

Los modelos construidos presentan una sensibilidad de: ES (B1) 89,66 %, DR de 89,17 % y en NN es de 83,43, los cuales son resultados buenos de predicción de puntos de agua-barro. Los modelos poseen una especificidad de: ES (B1) 79,64 %, DR de 86,14 % y en NN es de 70,12.

Los modelos de ingreso de agua-barro declaran barros falsos. Al tener un punto no barro, el modelo deja de recuperar reservas. Por cada barro falso, el modelo deja de recuperar en promedio un 24% de las reservas en el caso de ES (B1), para DR el 35% y en el caso de NN el 18%.

Capítulo 5

5 Reservas comprometidas por agua-barro en sectores RENO, DR y ES (B1)

5.1 Introducción

En el presente capítulo se calcula el tonelaje remanente comprometido por ingreso de agua-barro en los puntos de extracción. El tonelaje remanente, se estima descontando al tonelaje técnico económico extraíble (incluyendo criterio de agua-barro) el tonelaje extraído previo al ingreso de agua-barro a la columna de extracción. Para cuantificar el ingreso de agua-barro se utilizan los modelos multivariantes de ingreso de agua-barro.

5.2 Cálculo de mineral remanente por ingreso de agua-barro

En esta sección se calcula el mineral que se dejó de extraer por ingreso de agua-barro a la fecha 01-01-2016 utilizando registros de datos reales (base de datos reales) y el que se comprometerá (tonelaje no extraíble) en un futuro por ingreso de agua-barro en los puntos de extracción en los sectores ES (B1), DR y NN para el PND 2016. Para determinar el tonelaje remanente futuro, se utilizan los modelos de regresión logística para ingreso de agua-barro desarrollados en el capítulo anterior, con los cuales se determina el tonelaje extraído previo al posible ingreso de agua-barro.

Los tonelajes remanentes se calculan respecto de la altura extraíble que considera el criterio de agua-barro y se especifican para cada sector en la Tabla 49. Esta información fue entregada por personal de DET, señala que cada sector posee alturas extraíbles máximas para criterio de agua-barro dependiendo si se encuentra bajo zonas de alto riesgo de entrada de barro o riesgo medio. La zona de alto riesgo de barro es aquella que se encuentra bajo el canalón y la de riesgo medio es aquella que se encuentra fuera del canalón.

Tabla 49 Criterios Técnicos adoptados para la definición de altura máxima extraíble según DET, 2015.

Sector	Zona de Riesgo Alto Entrada de Barro	Zona de Riesgo Medio Entrada de Barro	Máxima extracción de quebrado (m)	Diferencia máxima Entre altura de puntos vecinos (m)
ES(B1)	Altura Máxima = 1,6 veces altura in-situ (240m)	Altura Máxima = 2,1 veces altura in-situ (315m)	100m	40m
DR	Altura Máxima = 1,3 veces altura in-situ (195m)	Altura Máxima = 1,5 veces altura in-situ (225m)	100m	40m
RENO	Altura Máxima = 1,4 veces altura in-situ (252m)	Altura Máxima = 1,6 veces altura in-situ (288m)	100m	40m

Para los sectores evaluados ES (B1), DR y RENO, se cuenta con información del plan de extracción según PND 2016. En la Tabla 50 se muestran las principales características de cada plan. El PND fue entregado por personal de DET e indica el tonelaje planificado mensual para cada punto de extracción.

Tabla 50 PND 2016 de cada sector evaluado.

Sector	Periodo de Extracción	Tonelaje Planificado (Mt)	Número de puntos con extracción
ES(B1)	Enero 2016 – Noviembre 2037	14,0	143
DR	Enero 2016 – Diciembre 2029	61,6	399
RENO	Enero 2016 – Mayo 2017	80,9	496

A continuación se muestran los resultados de evaluar los modelos de regresión logística con el PND 2016, como primera instancia se determina el porcentaje de recuperación que se puede obtener del PND, esto es la razón entre tonelaje extraído previo al ingreso de agua barro determinado por los modelos de ingreso de agua-barro determinado en la sección “Modelo de regresión logística multivariable” y el tonelaje planificado por DET para cada uno de los puntos de extracción en operación. En la Tabla 51 se presenta la recuperación obtenida del PND 2016 para DET, al implementar los modelos de ingreso de agua-barro.

Tabla 51 Recuperación de tonelaje planificado en sectores DET

Sector	Plan PND 2016	Tonelaje Planificado (Mt)	Rec. de Tonelaje Planificado (%)	Tonelaje Recuperado antes de la entrada de barro (Mt)
ES(B1)	Ene-2016 / Nov- 2037	14,0	77%	10,8
DR	Ene-2016 / Dic- 2029	61,6	90.4%	55,7
RENO	Ene-2016 / May- 2027	80,9	90.7%	73,4

La diferencia entre las recuperaciones obtenidas se debe básicamente a las condiciones de borde respecto de la entrada de barro para cada sector. La condición más desfavorable se tiene en ES(B1)

debido a que un 100% de su área se encuentra bajo canalón, y debido a que este significa un alto riesgo a ingreso de agua-barro y un 15% de sus puntos de extracción están en estado barro a la fecha del 01-01-2016. Mientras que la condición más favorable la tiene el sector DR, donde un 54% de su área se encuentra bajo canalón, un 27% de sus puntos de extracción se encuentran en estado barro y posee la mayor cantidad de sus puntos barro registrados en la zona de alto riesgo de ingreso de agua-barro, es decir, la probabilidad de que ingreso agua-barro es menor en la zona de DR o el área que queda sin barro es mayoritariamente fuera de la zona de alto riesgo de ingreso de agua-barro.

Como se vio en el capítulo anterior, los modelos de ingreso de agua-barro poseen una variabilidad del error, en base a lo cual se definieron los casos de simulación pesimista y optimista para cada uno de los sectores. Estos tonelajes indican el error que puede tomar en la recuperación los modelos de ingreso de agua-barro. Estos resultados se muestran en la Tabla 52.

Tabla 52 Recuperación de tonelaje planificado para caso de simulación optimista y pesimista

Sector	Caso de simulación	Plan PND 2016	Tonelaje Planificado (Mt)	Rec. De Tonelaje Planificado (%)	Tonelaje Recuperado antes de la entrada de barro (Mt)
ES(B1)	Pesimista	Ene-2016 / Nov-2037	14,0	55,2%	7,7
	Optimista			81%	11,2
DR	Pesimista	Ene-2016 / Dic-2029	61,6	85,4%	52,6
	Optimista			98%	60,3
RENO	Pesimista	Ene-2016 / May-2027	80,9	73,1%	59,1
	Optimista			99%	80

El modelo de ingreso de agua-barro construidos para ES (B1), es el más sensibles ya que presenta la mayor variabilidad de recuperación respecto a las condiciones normales del modelo.

En las Ilustración 47, Ilustración 48 e Ilustración 49 se muestra una vista en planta de los sectores ES (B1), DR y RENO respectivamente. En estas imágenes se muestra en negro los puntos de extracción cerrados por ingreso de agua-barro según base de datos entregada por DET a fecha de 01-01-2016, los puntos que aparecen en blanco representan aquellos puntos de extracción donde se podrá extraer el 100% del tonelaje económicamente extraíble. Mientras que los puntos que aparecen en color representan aquellos puntos donde los modelos determinan que no se podrá extraer el 100% del tonelaje económicamente extraíble.

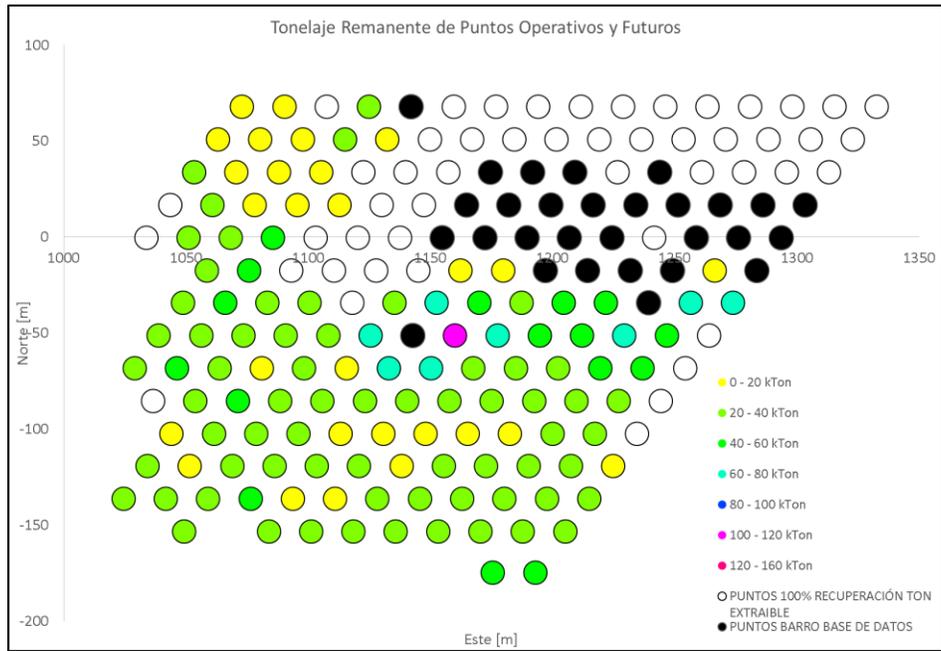


Ilustración 47 Vista en planta del sector ES (B1). En colores se muestra el tonelaje no extraíble de cada punto de extracción.

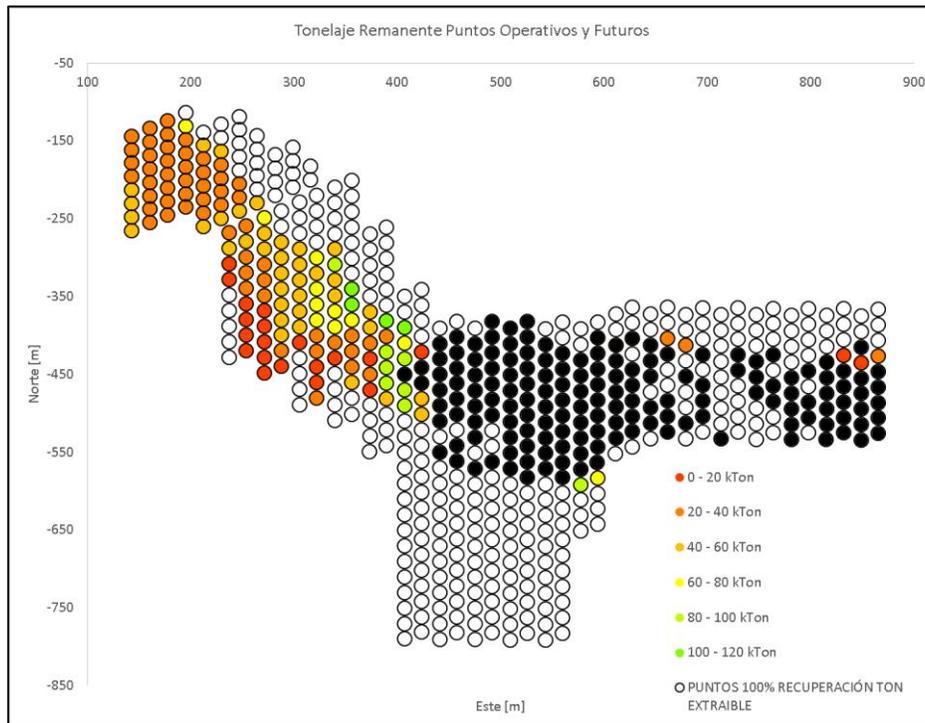


Ilustración 48 Vista en planta del sector DR. En colores se muestra el tonelaje remanente de cada punto de extracción.

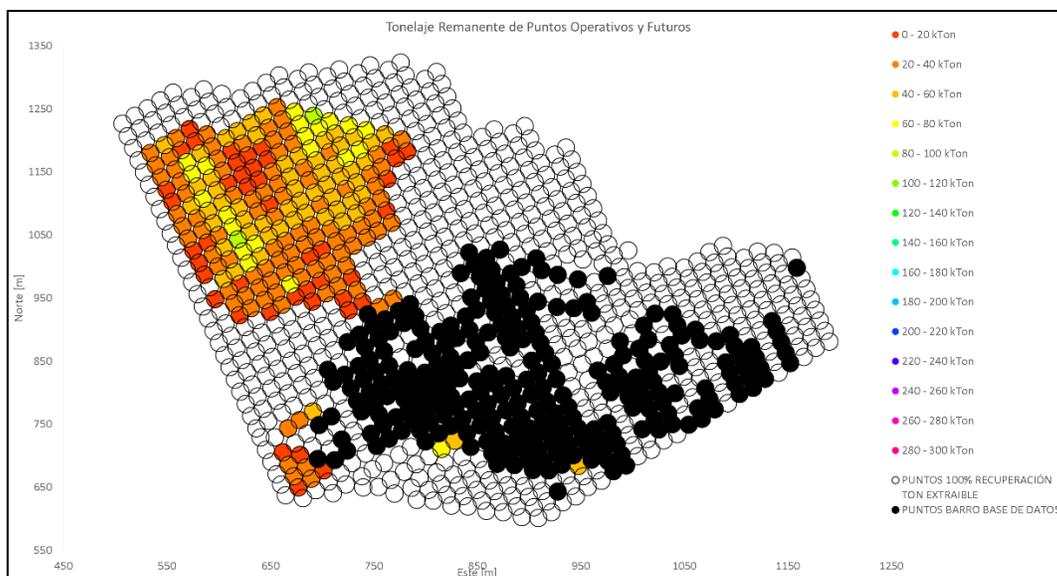


Ilustración 49 Vista en planta del sector RENO para su última declaración agua-barro. En colores se muestra el tonelaje remanente de cada punto de extracción.

En la Tabla 53 se muestra el tonelaje remanente de los puntos cerrado por barro según base de datos, que se obtiene de los puntos con registro de ingreso de agua-barro a la fecha de 01-01-2016, estimándolo al restar el tonelaje técnico económico extraíble con el tonelaje extraído de estos puntos de extracción previo a la declaración de agua-barro.

Por otro lado, el tonelaje remanente de puntos operativos y futuros a la fecha de 01-01-2016, se estima de la diferencia entre el tonelaje técnico económico extraíble de estos puntos y él tonelaje que se puede extraer previo al ingreso de agua-barro, el cual se determina con los modelos de regresión logística par a ingreso de agua-barro. El plan de extracción evaluado está basado en el PND 2016.

Tabla 53 Tonelaje remanente de puntos cerrados por barro para los sectores ES (B1), DR y RENO.

Sector	Tonelaje Remanente de Puntos Cerrados por Barro (según base de datos) (Mt)	Tonelaje Remanente de Puntos Operativos y Futuros (según modelo) (Mt)	Total (Mt)
ES (B1)	1,3	3,6	4,9
DR	5,4	6,3	11,7
RENO	8,4	7,8	16,2

5.3 Conclusiones del capítulo

Las conclusiones de este capítulo se mencionan a continuación:

La recuperación del PND 2016, al evaluar la extracción de este en los modelos de ingreso de agua-barro, entrega que para el sector ES (B1) se recupera un 77%, en DR 90,4%, en RENO 90,7.

Al estudiar los casos pesimista y optimistas de extracción definidos en función de la variabilidad del error medio se tienen los siguientes rangos de recuperación: En el caso de ES (B1) la recuperación varía entre 55,2%-81%, para DR el rango es de 85,4%-98%, para RENO es de 73,1%-99%.

Al estimar el remanente de los puntos cerrados por agua-barro según base de datos se tiene que el remanente es de: 1,3 MTON para ES (B1), 5,4 MTON para DR, en el caso de RENO 8,4 MTON.

El tonelaje remanente (respecto al tonelaje económicamente extraíble incluyendo criterio de agua-barro) de los puntos de extracción en estado operativo o futuro a fecha de 01-01-2016, al terminar el plan PND 2016 es de: 3,6 MTON para ES (B1), 6,3 MTON para DR, en el caso de RENO es 7,8 MTON.

Capítulo 6

6 Conclusiones y trabajo futuro

El análisis del ingreso de agua-barro en los sectores ES (B1), DR y NN indicó que se presentan dos mecanismos de ingreso de agua-barro en los tres sectores. El ingreso de agua-barro se inicia a través de los puntos de extracción con un ingreso de barro vertical (primeros puntos donde aparece agua-barro, también son llamados puntos precursores) para posteriormente expandirse de forma lateral a los puntos vecinos. Éste fenómeno es corroborado para sector de DR (Navia, 2014).

Al realizar la construcción de modelos de regresión logística, se determinó que las variables que representan de mejor forma el ingreso de agua-barro vertical son: Razón de extracción de la columna in-situ, Canalón, Altura de roca primaria y la Estación del año. Las variables que representan de mejor forma el ingreso de agua-barro lateral son: Razón de extracción de la columna in-situ, altura de roca primaria, vecinos barro y la Estación del año. De esto se puede concluir que el ingreso de agua-barro es un fenómeno multivariable.

La calibración de los modelos de ingreso de agua-barro fue realizada replicando la extracción histórica de cada uno de los sectores analizados. La estimación de ingreso de barro en registros de barro verdaderos es buena, se tiene una correlación directa entre valores reales y simulados, se obtiene un error medio inferior al 14%. Se obtuvo la variabilidad del error de cada modelo, con un 95% confianza el modelo que posee mayor variabilidad del error es DR, el que posee un 2,55% respecto a tonelaje extraído. El caso de ES (B1) posee un 0,75% y en RENO 2,26%.

Los modelos construidos presentan una sensibilidad de: ES (B1) 89,66 %, DR de 87,26 % y en NN es de 83,43, los cuales son resultados buenos de predicción de puntos de agua-barro. Los modelos construidos presentan una especificidad de: ES (B1) 79,64 %, DR de 86,14 % y en NN es de 70,12.

Los puntos no barro (o barros falsos) determinados por los modelos de ingreso de agua-barro, nos indican que estos modelos tienen a sobre-estimar el ingreso de agua-barro en los sectores ES (B1), DR y RENO. Por lo que los modelos de regresión logística de ingreso de agua-barro se comportan de forma conservadora, y la recuperación de reservas se subvalora al utilizar estos modelos.

La recuperación del PND 2016 al evaluar la extracción de este en los modelos de ingreso de agua-barro, entrega que para el sector ES (B1) se recupera un 77%, en DR 90,4% y en RENO 90,7. Al estimar el remanente de los puntos cerrado por agua-barro según base de datos se tiene que el remanente es de: 1,3 MTon para ES (B1), 5,4 MTon para DR, en el caso de RENO es 8,4 MTon. El tonelaje remanente de los puntos de extracción en estado operativo o futuro a fecha de 01-01-2016, al terminar el plan PND 2016 es de: 3,6 MTon para ES (B1), 6,3 MTon para DR, en el caso de RENO es 7,8 MTon. El sector más desfavorable es el sector ES (B1), debido a que se encuentra emplazado en su totalidad bajo el canalón.

6.1 Recomendaciones para trabajo futuro

Se recomienda realizar modelos de ingreso de agua barro de forma separada para los sectores ES (B1) y DR si se cuenta con datos necesarios para el desarrollo de estos modelos, con esto se puede tener un modelo para cada sector, que cubra la realidad de mejor forma y evitar posibles desviaciones en el modelo por utilizar otro sector similar.

Los modelos de regresión logística de ingreso de agua-barro desarrollados en este trabajo, son solo aplicables a los sectores correspondientes de cada uno, es por esto que se recomienda la construcción de modelos para sectores como Dacita o Recursos Norte.

Agregar variables importantes en el desarrollo de la explotación de las minas y en el tiempo en los modelos de ingreso de agua-barro, como velocidad de extracción y uniformidad del tiraje de extracción. Para esta implementación es necesario contar con la extracción diaria de los sectores.

Incorporar variables claves en el ingreso de agua-barro según lo que se plantea en la literatura, tales como, fragmentación, drenaje de flujos de agua o información hidrogeología. Es necesario tener una información completa que permita realizar un back análisis e incorporar en los modelos de regresión logística de ingreso de agua-barro.

La evaluación del PND 2016 en este trabajo se desarrolla sin considerar decisiones como limitar puntos de extracción (lo que implica disminuir la velocidad de extracción), por lo que se recomienda simular una extracción considerando las estrategias de DET respecto a la aparición de puntos barro.

Se recomienda la inclusión de modelos de ingreso de agua-barro en la evaluación de PND de forma tal de cuantificar el riesgo de ingreso de agua-barro.

Debido los tonelajes de mineral que se dejan de extraer por ingreso de agua-barro, se recomienda analizar la factibilidad de extraer este mineral.

Se recomienda realizar una optimización del PND 2016 con el objetivo de aumentar la recuperación del plan. Esto puede realizarse mediante la evaluación de otras estrategias de extracción con los modelos construidos.

7 Bibliografía

Becerra, C. 2011, Controlling drawpoints prone to pumping, El Teniente Mine. In 2nd International Seminar on Geology for the Mining Industry, Antofagasta. Gecamin.

Brown, E T, 2007. Block caving geomechanics, 2nd ed. Julius Kruttschnitt Minerals Research Centre, the University of Queensland: Brisbane.

Butcher R., Joughin W. and Stacey T. R., 2000. Methods of Combating Mudrushes in Diamond and Base Metal Mines. Safety in Mines Research Advisory Committee: Braamfontein, South Africa.

Butcher, R., T. Stacey, and W. Joughin. "Mud rushes and methods of combating them." *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2005.

Chitombo, G 2010, 'Cave mining – 16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining – state of the art'', in *Caving 2010: proceedings of The Second International Symposium on Block and Sublevel Caving*, ed. Y. Potvin, Australasian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, pp. 45-61.

Codelco 2016. Reporte final de producción – PND 201. Reporte Interno.

Garcés, Castro,R, Valencia,M and Armijo,F. "Evaluación del riesgo de entrada temprana de barro para uso en minería de hundimiento durante el largo plazo". *UMining*, 2016

Heslop, T 2000, 'Block caving – controllable risks and fatal flaws', in *MassMin 2000: proceedings of the Third International Conference & Exhibition on Mass Mining*, ed. G. Chitombo, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Brisbane, Australia, pp. 437-456.

Hosmer, D, Lemeshow, S, & Sturdivant, R 2013, *Applied logistic regression*, John Wiley & Sons.

Hubert G., Dirdjosuwondo S., Plaisance R., and Thomas L., 2000. Tele-operation at freeport to reduce wet muck hazards. *MassMin 2000*, Brisbane, 173- 179 p. Australian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne.

King, G., & Zeng, L. (2001). Logistic regression in rare events data. *Political analysis*, 9(2), 137-163.

Navia I., 2014. Análisis del ingreso de agua-barro al sector Diablos Regimiento, División El Teniente, 153 p. Memoria para optar al título de Ingeniero de Minas. Universidad de Chile.

Lara N., 2014 Análisis histórico de las variables operacionales asociadas al ingreso de agua/barro en el sector Reservas Norte, División El Teniente, Codelco 105 p. Memoria para optar al título de Ingeniero de Minas. Universidad de Chile.

Laubscher, Dennis. *A Practical Manual on Block Caving*. 2000.

Susaeta, A. "Índice de Uniformidad." 2014.

Susaeta, A. "Theory of gravity flow (Parts 1 and 2)." 4th International Conference and Exhibition on Mass Mining, 2004: 167-178.

Valencia, ME, Basaure, K, Castro, R, Vallejos, J 2014, 'Towards an understanding of mud rush behaviour in block-panel caving mines', in *Caving 2014: proceedings of The Third International*

Symposium on Block and Sublevel Caving, ed. R. Castro, University of Chile, Santiago, Chile, pp. 363-371.

ANEXO A

Prueba Student para sector ES (B1)

En la Tabla 54 se exponen los resultados de la prueba Student para las medias de altura a topografía de puntos barro y no barro en sector ES (B1). Como se puede percibir, el valor calculado del estadístico t es mayor que el valor crítico de Student con 37 grados de libertad en test unilateral, para un 95% de confianza. Por lo tanto, no hay suficiente información para aceptar la hipótesis nula, y se concluye desde un punto de vista estadístico, que la media de altura a topografía para puntos sin estado barro es mayor que la altura a topografía de los puntos que presentan estado barro.

$$\text{Hipótesis nula} \quad H_0: \mu_{No\ barro} = \mu_{Barro}$$

$$\text{Hipótesis alternativa} \quad H_1: \mu_{No\ barro} > \mu_{Barro}$$

Tabla 54 Prueba Student de medias para dos muestras suponiendo varianzas desiguales en análisis de altura a topografía en sector ES (B1).

	<i>No barro</i>	<i>Barro</i>
Media	649.71	646.24
Varianza	79.49	77.83
Observaciones	196	29
Diferencia hipotética de las medias	Las medias son iguales	
Grados de libertad	37	
Estadístico t	1.98	
P(T<=t) una cola	0.03	
Valor crítico de t (una cola)	1.69	
P(T<=t) dos colas	0.06	
Valor crítico de t (dos colas)	2.03	

Prueba Student para sector DR

En la Tabla 55 se exponen los resultados de la prueba Student para las medias de altura de roca primaria de puntos barro y no barro en sector DR. Como se puede percibir, el valor calculado del estadístico t es mayor que el valor crítico de Student con 583 grados de libertad en test unilateral, para un 95% de confianza. Por lo tanto, no hay suficiente información para aceptar la hipótesis nula, y se concluye desde un punto de vista estadístico, que la media de altura de roca primaria para puntos sin estado barro es mayor que la altura de roca primaria de los puntos que presentan estado barro.

$$\text{Hipótesis nula} \quad H_0: \mu_{No\ barro} = \mu_{Barro}$$

$$\text{Hipótesis alternativa} \quad H_1: \mu_{No\ barro} > \mu_{Barro}$$

Tabla 55 Prueba Student de medias para dos muestras suponiendo varianzas desiguales en análisis de altura de roca primaria en sector DR.

	<i>No barro</i>	<i>Barro</i>
Media	297.76	164.65
Varianza	21576.68	3458.37
Observaciones	433	157
Diferencia hipotética de las medias	Las medias son iguales	
Grados de libertad	583	
Estadístico t	15.70	
P(T<=t) una cola	0.00	
Valor crítico de t (una cola)	1.65	
P(T<=t) dos colas	0.00	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96	

En la Tabla 56 se exponen los resultados de la prueba Student para las medias de altura de roca in-situ de puntos barro y no barro en sector DR. Como se puede percibir, el valor calculado del estadístico t es mayor que el valor crítico de Student con 560 grados de libertad en test unilateral, para un 95% de confianza. Por lo tanto, no hay suficiente información para aceptar la hipótesis nula, y se concluye desde un punto de vista estadístico, que la media de altura de roca in-situ para puntos sin estado barro es mayor que la altura de roca in-situ de los puntos que presentan estado barro.

Hipótesis nula $H_0: \mu_{No\ barro} = \mu_{Barro}$

Hipótesis alternativa $H_1: \mu_{No\ barro} > \mu_{Barro}$

Tabla 56 Prueba Student de medias para dos muestras suponiendo varianzas desiguales en análisis de altura de roca in-situ en sector DR.

	<i>No barro</i>	<i>Barro</i>
Media	398.68	177.64
Varianza	54450.35	11315.56
Observaciones	433	157
Diferencia hipotética de las medias	Las medias son iguales	
Grados de libertad	560	
Estadístico t	15.72	
P(T<=t) una cola	0.00	
Valor crítico de t (una cola)	1.65	
P(T<=t) dos colas	0.00	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96	

En la Tabla 57 se exponen los resultados de la prueba Student para las medias de altura a topografía de puntos barro y no barro en sector DR. Como se puede percibir, el valor calculado del estadístico t es mayor que el valor crítico de Student con 588 grados de libertad en test unilateral, para un 95% de confianza. Por lo tanto, no hay suficiente información para aceptar la hipótesis nula, y se concluye desde un punto de vista estadístico, que la media de altura a topografía para puntos sin estado barro es mayor que la altura a topografía de los puntos que presentan estado barro.

Hipótesis nula $H_0: \mu_{No\ barro} = \mu_{Barro}$

Hipótesis alternativa $H_1: \mu_{No\ barro} > \mu_{Barro}$

Tabla 57 Prueba Student de medias para dos muestras suponiendo varianzas desiguales en análisis de altura a topografía en sector DR.

	<i>No Barro</i>	<i>Barro</i>
Media	571.89	544.65
Varianza	3964.00	499.40
Observaciones	433	157
Diferencia hipotética de las medias	Las medias son iguales	
Grados de libertad	588	
Estadístico t	7.76	
P(T<=t) una cola	0.00	
Valor crítico de t (una cola)	1.65	
P(T<=t) dos colas	0.00	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96	

Prueba Student para sector NN

En la Tabla 58 se exponen los resultados de la prueba Student para las medias de altura de roca primaria de puntos barro y no barro en sector NN. Como se puede percibir, el valor calculado del estadístico t es mayor que el valor crítico de Student con 865 grados de libertad en test unilateral, para un 95% de confianza. Por lo tanto, no hay suficiente información para aceptar la hipótesis nula, y se concluye desde un punto de vista estadístico, que la media de altura de roca primaria para puntos sin estado barro es mayor que la altura de roca primaria de los puntos que presentan estado barro.

Hipótesis nula $H_0: \mu_{No\ barro} = \mu_{Barro}$

Hipótesis alternativa $H_1: \mu_{No\ barro} > \mu_{Barro}$

Tabla 58 Prueba Student de medias para dos muestras suponiendo varianzas desiguales en análisis de altura de roca primaria en sector NN.

	<i>No barro</i>	<i>Barro</i>
Media	211.70	189.38
Varianza	7055.55	1851.36
Observaciones	812	260
Diferencia hipotética de las medias	Las medias son iguales	
Grados de libertad	865	
Estadístico t	5.61	
P(T<=t) una cola	0.00	
Valor crítico de t (una cola)	1.65	
P(T<=t) dos colas	0.00	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96	

En la Tabla 59 se exponen los resultados de la prueba Student para las medias de altura de roca in-situ de puntos barro y no barro en sector NN. Como se puede percibir, el valor calculado del estadístico t es mayor que el valor crítico de Student con 625 grados de libertad en test unilateral, para un 95% de confianza. Por lo tanto, no hay suficiente información para aceptar la hipótesis nula, y se concluye desde un punto de vista estadístico, que la media de altura de roca in-situ para puntos sin estado barro es mayor que la altura de roca in-situ de los puntos que presentan estado barro.

Hipótesis nula $H_0: \mu_{No\ barro} = \mu_{Barro}$

Hipótesis alternativa $H_1: \mu_{No\ barro} > \mu_{Barro}$

Tabla 59 Prueba Student de medias para dos muestras suponiendo varianzas desiguales en análisis de altura de roca in-situ en sector NN.

	<i>No barro</i>	<i>Barro</i>
Media	303.74	233.85
Varianza	35587.45	17367.39
Observaciones	812	260
Diferencia hipotética de las medias	Las medias son iguales	
Grados de libertad	625	
Estadístico t	6.65	
P(T<=t) una cola	0.00	
Valor crítico de t (una cola)	1.65	
P(T<=t) dos colas	0.00	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96	

En la Tabla 60 se exponen los resultados de la prueba Student para las medias de altura a topografía de puntos barro y no barro en sector NN. Como se puede percibir, el valor calculado del estadístico t es mayor que el valor crítico de Student con 583 grados de libertad en test unilateral, para un 95% de confianza. Por lo tanto, no hay suficiente información para aceptar la hipótesis nula, y se concluye desde un punto de vista estadístico, que la media de altura a topografía para puntos con estado barro es mayor que la altura a topografía de los puntos que presentan estado no barro.

Hipótesis nula $H_0: \mu_{Barro} = \mu_{No\ barro}$

Hipótesis alternativa $H_1: \mu_{Barro} > \mu_{no\ barro}$

Tabla 60 Prueba Student de medias para dos muestras suponiendo varianzas desiguales en análisis de altura a topografía en sector NN.

	<i>No Barro</i>	<i>Barro</i>
Media	555.38	529.16
Varianza	4367.80	7889.31
Observaciones	260	812
Diferencia hipotética de las medias	Las medias son iguales	
Grados de libertad	583	
Estadístico t	5.09	
P(T<=t) una cola	0.0	
Valor crítico de t (una cola)	1.65	
P(T<=t) dos colas	0.0	
Valor crítico de t (dos colas)	1.96	

ANEXO B

A continuación en esta sección se describe la metodología de construcción de los modelos de ingreso vertical y lateral de barro para los sectores en estudio

Metodología de construcción de un modelo de regresión logística

Generalmente, cuando se quiere dejar una variable en función de otra, se utiliza una regresión lineal (simple o múltiple). Esta función estima los coeficientes normalmente con el método de mínimos cuadrados y funciona correctamente desde el punto de vista aritmético. Lo que distingue a un modelo de regresión logística del modelo de regresión lineal es que la variable de resultado en la regresión logística binaria o es dicotómica

Hay dos razones principales para la elección de la distribución logística. En primer lugar, desde un punto de vista matemático, es una función extremadamente flexible y utilizada fácilmente. En segundo lugar, los parámetros del modelo son la base para las estimaciones de efecto clínicamente significativas

Cuando la variable dependiente es dicotómica, es decir, tiene un valor de ocurrencia o de un cierto fenómeno, al evaluar la función para valores específicos de las variables independientes se obtendrá un número que será diferente de 1 y de 0 (los valores posibles de la variable dependiente), lo que carece de sentido. En este caso, la regresión lineal debe ser descartada por la regresión logística multivariable (Katz, 2011). La regresión logística multivariable tiene tres objetivos, que son:

- Obtener una estimación no sesgada o ajustada de la relación entre la variable dependiente (o resultado) y una variable independiente.
- Evaluar varios factores simultáneamente que estén, presumiblemente, relacionados de alguna manera (o no) con la variable dependiente, y conocer su efecto de forma ajustada.
- Construir un modelo y obtener una ecuación con fines de predicción o cálculo del riesgo, de manera que éste pueda estimarse para una nueva situación, con una cierta validez y precisión.

Los modelos de regresión son herramientas estadísticas utilizadas para describir la relación entre un variable objetivo y un conjunto de variables. La regresión logística se utiliza cuando la variable que se desea modelar es dicotómica, es decir, del tipo Sí/No, Bueno/Malo, Presente/Ausente, etc. y busca modelar la influencia de la aparición de las variables explicativas en la ocurrencia del fenómeno dicotómico (Hosmer & Lemeshow, 2013), en este caso la variable dicotómica es si hay barro o no. En la práctica, para aplicar este modelo se crea una variable binaria ficticia cuya estructura es:

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{Cuando el fenómeno ocurre} \\ 0 & \text{Cuando el fenómeno no ocurre} \end{cases}$$

Donde i representa cada observación que se posee.

Para construir un modelo mediante regresión logística se debe seguir una secuencia de pasos establecida, los que tienen como objetivo determinar el mejor ajuste de variables independientes o covariables que estimen la variable dependiente, en este caso la entrada de barro o fenómeno de estudio (Hosmer & Lemeshow, 2013).

El modelo de regresión logística tiene la forma,

$$p(x) = \frac{e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n}}{1 + e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n}} \quad \left\{ \begin{array}{l} b_1, b_2, \dots, b_n = \text{ponderadores} \\ x_1, x_2, \dots, x_n = \text{variables} \end{array} \right.$$

Donde b_1, b_2, \dots, b_n son ponderadores de las variables independientes x_1, x_2, \dots, x_n y cuantifican el efecto de éstas variables sobre la variable dependiente. La determinación de los parámetros b_i se debe maximizar la probabilidad de ocurrencia del fenómeno en estudio, en este caso del ingreso de agua-barro. Cabe destacar que para la creación de los modelos de regresión logística se emplea el software SPSS 23 (Gualtieri y Curran, 2015), que permite estimar los ponderados del modelo maximizando la probabilidad de representar el fenómeno (maximiza la verosimilitud). A continuación, se describen los pasos para la construcción de los modelos multivariados de regresión logística.

Por lo tanto, la regresión logística es un modelo estadístico de clasificación binaria que entrega la probabilidad de pertenencia a uno de los grupos previamente definidos en la construcción.

Paso 1: Análisis univariable

En este paso se realiza un análisis de regresión logística univariable entre cada variable independiente y la variable dependiente. Este análisis permite determinar y cuantificar si es que existe un efecto de la variable independiente sobre la variable dependiente. En este paso se determina la significancia¹ de cada variable independiente. Si la significancia es menor a un 20%, existe correlación y el ponderador de la variable independiente es distinto de 0, es decir, se acepta con un 80% de confiabilidad que los ponderadores son distintos de 0 y que la variable independiente afecta en el fenómeno. Las variables que presentan una significancia superior al 20% deben ser analizadas en el modelo multivariable con mayor cuidado. El análisis univariable tiene la forma,

$$(Y = 1|x) = p(x) = \frac{e^{(\beta_0 + \beta x)}}{(1 + e^{(\beta_0 + \beta x)})}$$

Donde, $(Y = 1|x)$ corresponde a la aparición de barro sujeta a la variable x , $p(x)$ representa la probabilidad de que ocurra el fenómeno (agua-barro en un punto de extracción), β_0 es la constante del modelo, β es el ponderador de la variable x . Cabe destacar que el análisis de regresión logística univariable es matemáticamente equivalente a la prueba de independencia entre variables mediante el test Chi-Cuadrado. En este test, las hipótesis estudiadas corresponden a las siguientes:

$$\begin{array}{l} H_0: \text{Las variables } X \text{ e } Y \text{ son independientes} \\ H_1: \text{Las variables } X \text{ e } Y \text{ son dependientes} \end{array}$$

N¹ La significancia estadística en la regresión logística permite evaluar hasta qué punto la variabilidad de la muestra en estudio es responsable de los resultados obtenidos. El valor de la significancia incorpora el riesgo de rechazar la hipótesis nula (independencia entre las variables), generalmente considerando un error de 5%, es decir, se acepta con un 95% de seguridad la hipótesis alternativa (las variables no son independientes).

En este test se busca rechazar H_0 con un 95% de confianza (significancia de 5%), lo que es equivalente a concluir que las variables X e Y son dependientes.

Paso 2: Análisis multivariable

El segundo paso en la construcción de modelos de regresión logística consiste en realizar un análisis multivariable, donde se determina y cuantifica el efecto en conjunto de todas las variables independientes sobre la variable dependiente. En este caso el modelo multivariable tiene la forma

$$p(x) = \frac{e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n}}{1 + e^{b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n}}$$

En este paso se determina la significancia de cada variable dentro del modelo multivariable. Si la significancia es menor o igual a 5%, la variable tiene efecto en la entrada de agua-barro. Si supera el 5%, esta variable es eliminada preliminarmente. A continuación, se realizan dos tipos de modelos multivariables: un modelo con todas las variables significantes (Ilustración 50 (a)), y otros modelos agregando de forma unitaria las variables eliminadas preliminarmente Ilustración 50(b)).

Luego, se comparan los ponderadores del modelo sin las variables eliminadas con los ponderadores del modelo con las variables eliminadas (Ilustración 50 (c)). Si alguno de los ponderadores de las variables significantes no sufre un cambio superior al 20%, la variable eliminada debe ser reincorporada en el modelo. Si supera el 20%, entonces existe un efecto de colinealidad entre variables y estas variables deben ser eliminadas definitivamente (Ilustración 50 (d)). Finalmente, el modelo considera las variables que no fueron eliminadas.

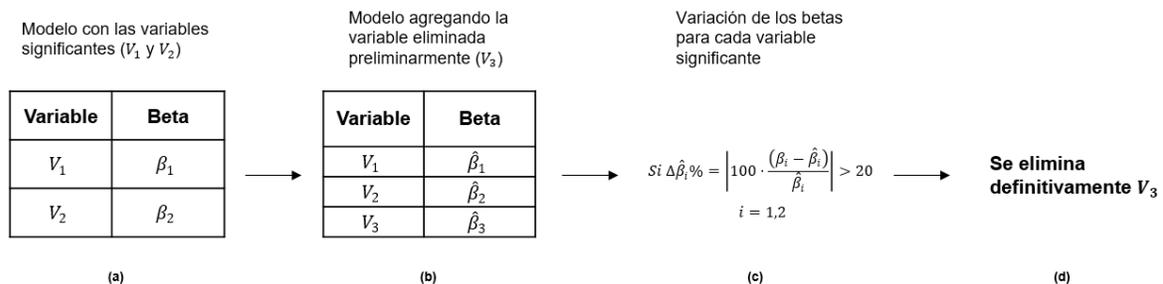


Ilustración 50 Ejemplo de la metodología para la construcción de modelos de regresión logística multivariable. (a) Modelo con variables significantes. (b) Modelo con variables significantes más una variable eliminada preliminarmente. (c) Evaluación de los betas de la variables significantes en ambos modelos. (d) Eliminación definitiva de la variable si no cumple el criterio de variación de betas.

Para la estimación de los parámetros, es decir, la calibración del modelo se utiliza el método de máxima verosimilitud, en el cual se busca maximizar la probabilidad estimada de obtener los resultados categorizados según Hosmer & Lemoshow (2013) La función de verosimilitud es la siguiente:

$$l(\beta) = \prod_i f(x_i, \beta)$$

Donde $f(x_i, \beta)$ corresponde en este caso al modelo de regresión logística. La función de verosimilitud puede ser expresada como:

$$l(\beta) = \prod_i p(x_i)^{y_i} [1 - p(x_i)]^{1-y_i}$$

Esta función de verosimilitud se emplea utilizando logaritmos:

$$L(\beta) = \ln l(\beta) = \sum_i (y_i \ln[p(x_i)] + (1 - y_i) \ln[1 - p(x_i)])$$

Para calcular los estimadores de máxima verosimilitud se calculan al aplicar condiciones de primer orden a la función de verosimilitud. En este caso se obtienen las siguientes ecuaciones de verosimilitud:

$$\sum [y_i - p(x_i)] = 0$$

$$\sum x_i [y_i - p(x_i)] = 0$$

Al resolver este problema de optimización se obtiene como resultados un conjunto de estimadores asintóticamente eficientes, insesgados y distribuidos normalmente. β_0 corresponde al punto de corte en el eje de las ordenadas y los demás estimadores β corresponden a los coeficientes asociados a las variables explicativas. (Hosmer & Lemeshow, 2013).

En base al modelo de regresión logística se obtienen probabilidades de ocurrencia del fenómeno analizado, es por esto que es necesario determinar un valor de corte para esta probabilidad de forma tal, de que para valores a este valor sea de uno (o barro en el caso de este estudio) y en caso contrario se asigna el valor de 0 (no barro).

ANEXO C

El Muestreo aleatorio estratificado es aquel en el que se divide la población en grupos en función de un carácter determinado y después se muestrea cada grupo aleatoriamente, para obtener la parte proporcional de la muestra.

Algunas de las razones por la que se estratifica una muestra es:

- Para lograr homogeneidad en los estratos y con ello disminuir la dispersión general de la variable en estudio.
- Para lograr mayor precisión en los estimadores.
- Para disminuir el tamaño de la muestra.
- Para brindar estimaciones en las sub poblaciones o estratos más importantes.
- Cuando se requiere incrementar la eficiencia de la muestra por unidad de costo operativo.

En el caso de este estudio se busca tener homogeneidad en los estratos.

ANEXO D

El problema de colinealidad se aprecia cuando existe relación lineal entre las variables independientes de un modelo múltiple. Al construir un modelo multivariable se necesita tener variables que no presenten colinealidad entre ellas ya que estas variables no están aportando información y producirán altas varianzas e intervalos de confianza para el modelo de predicción.

En esta sección se muestra la presencia de colinealidad entre las siguientes variables:

- Altura de primario
- Altura in-situ
- Altura a topografía
- Estación del año del año
- Porcentaje de extracción de columna in-situ
- Canalón
- Vecinos Barro

Tabla 61 Matriz de correlación de base de datos para DR-ES y barro de ingreso lateral

	Altura de primario	Altura in-situ	Altura a topografía	Estación del año	P. de extracción	Canalón	Vecinos Barro
Altura de primario	1	0,80	0,29	-0,01	-0,66	-0,69	-0,52
Altura in-situ	0,80	1	0,45	-0,057	-0,79	-0,71	-0,61
Altura a topografía	0,29	0,45	1	-0,08	-0,46	-0,42	-0,32
Estación del año	-0,01	-0,05	-0,06	1	0,06	-0,01	0,17
P. de extracción	-0,66	-0,79	-0,01	0,06	1	0,67	0,69
Canalón	-0,69	-0,71	-0,42	-0,01	0,67	1	0,55
Vecinos Barro	-0,52	-0,61	-0,32	0,17	0,69	0,55	1

Tabla 62 Matriz de correlación de base de datos para sector RENO y barro de ingreso lateral

	Altura de primario	Altura in-situ	Altura a topografía	Estación del año	P. de extracción	Canalón	Vecinos Barro
Altura de primario	1	0,89	0,85	0,009	-0,49	-0,49	-0,43
Altura in-situ	0,89	1	0,85	0,005	-0,58	-0,57	-0,51
Altura a topografía	0,85	0,85	1	-0,03	-0,42	-0,67	-0,52
Estación del año	0,009	-0,005	-0,03	1	0,007	0,49	-0,03
P. de extracción	-0,49	-0,58	-0,42	0,007	1	0,43	0,56
Canalón	-0,49	-0,57	-0,67	0,04	0,43	1	0,59
Vecinos Barro	-0,43	-0,51	-0,52	-0,03	-0,56	0,59	1

Tabla 63 Matriz de correlación de base de datos para DR-ES y barro de ingreso vertical

	Altura de primario	Altura in-situ	Altura a topografía	Estación del año	P. de extracción	Canalón	Vecinos Barro
Altura de primario	1	0,81	0,09	0,04	-0,60	-0,58	-0,13
Altura in-situ	0,81	1	0,19	0,13	-0,72	0,61	-0,14
Altura a topografía	0,09	0,19	1	-0,03	-0,22	-0,28	-0,11
Estación del año	0,04	0,13	-0,03	1	-0,20	-0,13	-0,08
P. de extracción	-0,60	-0,72	-0,22	-0,20	1	0,62	0,34
Canalón	-0,58	-0,61	-0,28	-0,13	0,61	1	0,29

Tabla 64 Matriz de correlación de base de datos para sector RENO y barro de ingreso vertical

	Altura de primario	Altura in-situ	Altura a topografía	Estación del año	P. de extracción	Canalón	Vecinos Barro
Altura de primario	1	0,88	0,85	-0,002	-0,41	-0,42	-0,24
Altura in-situ	0,88	1	0,82	-0,013	-0,50	-0,49	-0,27
Altura a topografía	0,85	0,82	1	-0,06	-0,30	-0,63	-0,23
Estación del año	-0,002	-0,01	-0,06	1	0,081	0,11	0,03
P. de extracción	-0,41	-0,50	-0,30	0,08	1	0,33	0,38
Canalón	-0,42	-0,49	-0,63	0,11	0,33	1	0,16

En ninguno de los casos mostrados en las tablas anteriores se observa una correlación entre variables superior a 0,9, en base a esto, se puede decir que las variables estudiadas no presenta colinealidad.

Anexos E

En esta sección se muestra la variación de coeficientes beta al incorporar una variable que en el modelo posee significancia mayor a lo permitido según lo mostrado en Ilustración 50. En primera instancia en la Tabla 65 se muestran los modelos analizados para los sectores ES (B1) y DR.

Tabla 65 Modelos de ingreso vertical - Sector ES(B1) y DR.

Modelo vertical ES (B1)-DR			52.937
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	
Razón de Extracción	3,518	2x10 ⁻⁴	
Bajo Canalón	0,917	0,426	
Altura primario (m)	-0.006	0,328	
Estación del año	-0.508	0.520	
constante	-2,032	-	

A continuación se presenta el modelo del sector ES (B1)-DR sin las variables pre-eliminadas.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia
Razón de Extracción	4,897	7x10 ⁻⁹
constante	-3,69	-

Modelo añadiendo variable “Estación del año”.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	4,022	2x10 ⁻⁵	1%
Estación del año	1,646	0,43	
constante	-4,321	-	

Modelo añadiendo variable “Altura primario (m)”.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	4,181	2x10 ⁻⁴	17%
Altura primario (m)	-0,01	0,09	
constante	-0,953	-	

Modelo añadiendo variable “Bajo canalón”.

Variable	Coficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	4,09	9x10 ⁻⁵	19%
Bajo canalón	1,646	0,07	
constante	-4,321	-	

El análisis indica que la variación de los coeficientes del modelo sin las variables pre-eliminadas no presenta cambios mayores al 20%, en las variables cuando se incorpora al modelo “Estación del año”, “Altura de primario” Y “Bajo canalón”. Por lo tanto, el modelo de ingreso de barro vertical para los sectores ES (B1) y DR está definido por las variables “Razón de Extracción”, “Altura de primario (m)”, “Estación del año” y “Bajo canalón”.

Tabla 66 Modelos de ingreso lateral - Sector ES (B1) y DR.

Modelo lateral ES (B1)-DR			
Variable	Coficiente Beta	Significancia	-2 Log likelihood
Razón de Extracción	3,135	6x10 ⁻⁵	65.589
Vecindad Barro	2,298	1x10 ⁻⁷	
Altura de primario (m)	-0,060	0.652	
Estación del año	-0,236	0,728	
constante	4,508	-	

Se debe determinar la variación de los ponderadores de las variables de un modelo con las variables pre-eliminadas y sin las variables. En este caso, la variable no eliminada es “Razón de Extracción”.

Modelo solo con variable “Razón de Extracción” y “Vecindad Barro”.

Variable	Coficiente Beta	Significancia
Razón de Extracción	4,932	2x10 ⁻⁹
Vecindad Barro	2,061	1x10 ⁻¹⁰
constante	-6,436	-

Modelo añadiendo variable “Altura primario (m)”.

Variable	Coficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	4,292	1x10 ⁻⁷	9%
Vecindad barro	2.283	6x10 ⁻⁵	15%
Altura primario (m)	-0,061	0,66	-
constante	-3,778	-	-

Modelo añadiendo variable “Estación del año”.

Variable	Coficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	4,904	3x10 ⁻⁹	0,5%
Vecindad barro	2.093	1x10 ⁻¹⁰	1%
Estación del año	-0,329	0,61	-
constante	-6,311	-	-

La variación del ponderador de la variable “Razón de Extracción” y “Vecindad barro” no presentan cambios mayores a 15%, por lo tanto, las dos variables deben ser integradas en el modelo. Por lo cual, el modelo de ingreso de barro lateral para los sectores ES (B1) y DR está definido por las variables “Razón de Extracción”, “Vecindad Barro”, “Altura primario (m)” y “Estación del año”.

Tabla 67 Modelos de ingreso vertical - Sector NN

Modelo vertical NN			-2 Log likelihood
Variable	Coefficiente Beta	Significancia	
Razón de Extracción	2,749	1x10 ⁻⁵	112.109
Bajo Canalón	1,145	0,09	
Altura primario (m)	-0.001	0,05	
Estación del año	-0.899	0,15	
constante	-1,163	-	

Modelo con variables “Razón de Extracción” y “Altura primario (m)”.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia
Razón de Extracción	2,851	5x10 ⁻⁶
Altura primario (m)	-0,008	0,01
constante	-0,986	-

Modelo añadiendo variable “Bajo Canalón”.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	2,600	2x10 ⁻⁵	9%
Altura primario (m)	-0,007	0,05	19%
Bajo Canalón	0,956	0,15	
constante	-1,433	-	

Modelo añadiendo variable “Estación del año”.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	2,996	2x10 ⁻⁵	4%
Altura primario (m)	-0,009	0,05	5%
Estación del año	-0,699	0,15	
constante	-0,709	-	

Se puede apreciar que las variables “Bajo Canalón” y “Estación del año” producen una variación del beta menor a 20%, por lo que estas dos variables pueden ser agregadas al modelo final de RENO. Por lo tanto el modelo de ingreso de agua-barro vertical para el sector RENO queda conformado por las variables “Razón de extracción”, “Altura primario”, “Bajo Canalón” y “Estación del año”.

Tabla 68 Modelos de ingreso vertical - Sector NN

Modelo vertical NN			-2 Log likelihood
Variable	Coficiente Beta	Significancia	
Razón de Extracción	2,394	2x10 ⁻⁶	111.292
Altura primario (m)	-0,002	0,34	
Bajo Canalón	1,174	0,05	
constante	-2,339	-	

A continuación se presenta el modelo sin las variables pre-eliminadas.

Modelo vertical NN			-2 Log likelihood
Variable	Coficiente Beta	Significancia	
Razón de Extracción	2,974	8x10 ⁻⁷	111.407
Canalón	1.467	0,023	
constante	-3,491	-	

Modelo añadiendo variable "Altura primario (m)".

Variable	Coficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	2,600	2x10 ⁻⁵	14%
Canalón	0,956	0,154	53%
Altura primario (m)	-0,007	0,05	
constante	-0,986	-	

Se puede apreciar que la variable "Altura primario" produce una variación del beta mayor a 20%, por lo que esta variable no puede ser agregada al modelo final de RENO.

Tabla 69 Modelos de ingreso lateral - Sector NN.

Modelo lateral NN			-2 Log likelihood
Variable	Coficiente Beta	Significancia	
Razón de Extracción	2,978	1x10 ⁻¹⁵	198.611
Vecindad Barro	2,400	3x10 ⁻¹¹	
Altura primario(m)	-0,003	0,132	
Estación del año	-0,418	0,299	
constante	-3,679	-	

A continuación se presenta el modelo sin las variables pre-eliminadas.

Variable	Coficiente Beta	Significancia
Razón de Extracción	3,241	6x10 ⁻²⁰
Vecindad Barro	2,515	2x10 ⁻¹³
constante	-5,083	-

Modelo añadiendo variable “Altura primario (m)”.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	2,982	9×10^{-16}	8%
Vecindad Barro	2,341	2×10^{-11}	7%
Altura primario	-0,004	0,12	-
constante	-3,837	-	-

Modelo añadiendo variable “Estación del año”.

Variable	Coefficiente Beta	Significancia	Variación ponderador
Razón de Extracción	2,184	9×10^{-20}	0,3%
Vecindad Barro	1,282	5×10^{-13}	2%
Estación del año	-0,001	0,26	-
constante	0,574	-	-

Se puede apreciar que las variables “Altura primario (m)” y “Estación del año” producen una variación del beta menor a 20%, por lo que estas dos variables pueden ser agregadas al modelo final de RENO. Por lo tanto el modelo de ingreso de agua-barro lateral para el sector RENO queda conformado por las variables “Razón de extracción”, “Altura primario”, “Vecindad Barro” y “Estación del año”

ANEXO F

La prueba de Hosmer-Lemeshow se utiliza para determinar la bondad de ajuste del modelo de regresión logística. Esencialmente es una prueba de bondad de ajuste de chi-cuadrado para datos agrupados. Es un Test de bondad de ajuste, en general, lo que hace es comprobar si el modelo propuesto puede explicar lo que se observa. Es un Test donde se evalúa la distancia entre lo observado en los datos que tenemos de la realidad y lo esperado bajo el modelo.

La Hipótesis nula es que el modelo se ajusta a la realidad. Por lo tanto, un p-valor superior a 0,05 implica que lo que observamos se ajusta suficientemente a lo que esperado bajo el modelo. En la Tabla 70 se presenta los resultados del test de Hosmer-Lemeshow obtenidos para los modelos de regresión logística para ingreso de agua-barro en los sectores ES (B1), DR y RENO.

Tabla 70 Resultados de test de Hosmer-Lemeshow de los modelos construidos de regresión logística para ingreso de agua-barro.

Modelo	Chi-cuadrado	Significancia
Ingreso agua barro vertical DR-ES(B1)	13,259	0,103
Ingreso agua barro lateral DR-ES(B1)	2,748	0,949
Ingreso agua barro vertical RENO	7,240	0,511
Ingreso agua barro lateral RENO	8.195	0,415

De los resultados obtenidos en la Tabla 70 se valida los modelos de regresión logística para ingreso de agua barro para los sectores ES (B1), DR y RENO.

ANEXO G

En modelos de regresión logística para ingreso de agua-barro, se tiene la utilización de diferentes variables, cada uno de estas posee una ponderación diferente en los modelos y por lo tanto su influencia en el fenómeno de ingreso de agua-barro es distinta.

Se define odds ratio, como la oportunidad de que ocurra un evento dado en aumento en una unidad, de una condición de riesgo: Odds ratio de calcula como se muestra a continuación (Hosmer, Lemeshow, & Studivant, 2013).

$$OR = e^{\beta_i}$$

Si β_i es mayor que 0, significa que un aumento de la variable predictora implica un alza en la probabilidad de ocurrencia del evento, lo contrario sucede si se tiene que β_i es menor que 0.

Una variación en la variable predictora tiene un cambio de odds ratio como se muestra a continuación (Hosmer, Lemeshow, & Studivant, 2013).

$$\Delta OR(x_1, x_2) = e^{\beta_i(x_2 - x_1)}$$

Tabla 71 Análisis de influencia de variables que componen los modelos de ingreso de agua-barro vertical

VARIABLES modelo vertical sector DR-ES (B1)	Beta	Comentario (Odds ratio)
Razón de extracción	3,518	Un aumento de 10% en razón de extracción, implica que hay 1,42 veces más probabilidad de ingreso de agua-barro.
Bajo Canalón	0,917	Al encontrarse bajo el canalón la probabilidad de ingreso de agua barro aumenta en 2,5 veces.
Altura primario [m]	-0,006	Un aumento del 10 [m] en la altura de primario, implica que hay 0.94 veces menos de probabilidad de ingreso de agua-barro.
Estación del año	-0,508	El encontrarse en época de lluvia implica que hay 0,6 veces menos de probabilidad de ingreso de agua-barro.

VARIABLES MODELO VERTICAL SECTOR RENO	BETA	COMENTARIO (ODDS RATIO)
Razón de extracción	2,749	Un aumento de 10% en razón de extracción, implica que hay 1,32 veces más probabilidad de ingreso de agua-barro.
Bajo Canalón	1,145	Al encontrarse bajo el canalón la probabilidad de ingreso de agua barro aumenta en 3,14 veces.
Altura primario [m]	-0,007	Un aumento del 10 [m] en la altura de primario, implica que hay 0.93 veces menos de probabilidad de ingreso de agua-barro.
Estación del año	-0,899	El encontrarse en época de lluvia implica que hay 0,4 veces menos de probabilidad de ingreso de agua-barro.

Tabla 72 Análisis de influencia de variables que componen los modelos de ingreso de agua-barro lateral

VARIABLES MODELO LATERAL SECTOR DR-ES(B1)	BETA	COMENTARIO (ODDS RATIO)
Razón de extracción	3,12	Un aumento de 10% en razón de extracción, implica que hay 1,37 veces más probabilidad de ingreso de agua-barro.
Estación del año	-0,23	El encontrarse en época de lluvia implica que hay 0,79 veces menos de probabilidad de ingreso de agua-barro.
Vecindad Barro	2,29	Un aumento de 1 vecino, implica que hay 9,87 veces más probabilidad de ingreso de agua-barro.
Altura primario [m]	-0,060	Un aumento del 10 [m] en la altura de primario, implica que hay 0.54 veces menos de probabilidad de ingreso de agua-barro.

VARIABLES MODELO LATERAL SECTOR RENO	BETA	COMENTARIO (ODDS RATIO)
Razón de extracción	2,976	Un aumento de 10% en razón de extracción, implica que hay 1,35 veces más probabilidad de ingreso de agua-barro.
Estación del año	-0,418	El encontrarse en época de lluvia implica que hay 0,65 veces menos de probabilidad de ingreso de agua-barro.
Vecindad Barro	2,400	Un aumento de 1 vecino, implica que hay 11,02 veces más probabilidad de ingreso de agua-barro.
Altura primario [m]	-0,003	Un aumento del 10 [m] en la altura de primario, implica que hay 0.97 veces menos de probabilidad de ingreso de agua-barro.