



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

**ANÁLISIS DEL INGRESO DE AGUA-BARRO AL SECTOR
DIABLO REGIMIENTO, DIVISIÓN EL TENIENTE, CODELCO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

ISAAC MOISÉS NAVIA MORENO

**PROFESOR GUÍA:
RAÚL CASTRO RUIZ**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RICARDO VARGAS VERGARA
RODRIGO BARRERA PÁEZ**

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

ANÁLISIS DEL INGRESO DE AGUA-BARRO AL SECTOR DIABLO REGIMIENTO, DIVISIÓN EL TENIENTE, CODELCO

Uno de los problemas que afecta a algunos yacimientos explotados por Block/Panel Caving, es la generación de bombeos o escurrimiento de mineral saturado. Estos se definen como una entrada repentina y violenta de una mezcla de agua y material fino hacia labores mineras subterráneas.

Una de las formas de prevenir la generación de bombeos, es cerrar los puntos que presenten contenidos críticos de humedad y granulometría, quedando así un remanente no extraído. Por lo tanto, uno de los objetivos de esta memoria fue cuantificar dicho remanente, tanto el actual como aquel que quedará a futuro, para el sector Diablo Regimiento de la Mina El Teniente, Codelco.

Respecto a la aparición de agua-barro en el sector, surgen diversas dudas respecto a cómo ocurrió; principalmente concernientes a conocer la influencia de distintas prácticas operacionales. Por lo tanto, otro objetivo fue realizar un análisis de la aparición de agua-barro en el sector, principalmente en términos de secuencia y altura de aparición de agua-barro, evolución temporal de perfiles de alturas extraídas, tasas de extracción aplicadas y evolución de la uniformidad de la extracción mediante uso de índices de uniformidad.

Un bombeo o escurrimiento puede desencadenarse una vez ocurrida la aparición de agua-barro en un punto. Por lo tanto, el tercer objetivo fue realizar un análisis de 3 escurrimientos ocurridos en el sector, considerando los mismos aspectos que el análisis de la aparición de agua-barro.

Respecto la cuantificación del mineral saturado remanente, el resultado más conservador obtenido fue de 2.4 Mt de mineral con ley media de 0.68% CuT, que corresponde a aquel remanente actual. El mejor caso, considerando remanentes actuales a futuro, fue de 20.5 Mt con ley media de 0.55% CuT. Ambos casos representan 0.3 y 2.3 años de producción, respectivamente, a un ritmo de 25 ktpd.

Respecto a la aparición de agua-barro, se determinó que su ingreso inicial al nivel de producción ocurrió a alturas extraídas similares a la altura in situ de los puntos, por lo que se concluyó la importancia de los niveles antiguos superiores como acumuladores de agua-barro. Además, se determinó que estos puntos fueron precursores de ingresos de agua-barro hacia puntos vecinos, estableciéndose así la idea de migración lateral del agua-barro como principal mecanismo posterior a los ingresos iniciales. Al respecto, se determinó que la extracción tele comandada redujo la tasa de afectación de puntos con agua-barro mientras se aplicó. También se validó el uso de los estados Limitado y Barrera, como importante medida para mitigar el problema.

Respecto al análisis de los escurrimientos, los 3 estuvieron asociados a vecindades con al menos 1 punto con presencia de agua-barro, y a extracciones preferenciales en cierta dirección en términos de alturas extraídas y de evolución de perfiles de alturas extraídas. Por otro lado, se determinó que el Índice de Uniformidad Vectorizado no necesariamente es capaz de anticipar un escurrimiento, pero sí la aparición de agua-barro en puntos de extracción.

*Al Todopoderoso,
por haberme dado los mejores padres del mundo.*

*A mi madre, mujer valiente
que supo luchar hasta el último respiro
para estar con los suyos. Es mi mejor ejemplo de valentía.*

*A mi padre, hombre sabio y esforzado
que me ha sabido enseñar como ninguno.
Es mi mejor ejemplo de amor, perseverancia y entrega.*

Sin el Señor y sin ustedes, jamás lo hubiera logrado.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios, por haberme dado una familia maravillosa: mi padre, mi madre, mi hermana y mis sobrinos. Durante el transcurso de esta carrera me han sabido soportar y apoyar, y sin ellos nada hubiese sido igual.

Tanto mi padre como mi madre son responsables de mis triunfos. A ellos les debo lo que he logrado y lo que lograré. A mi mamita: gracias por luchar por tu vida, y gracias por permitirme cumplir mi promesa de no dejarte hasta el final. A mi papá: gracias por criarme, enseñarme, corregirme, y hacerme el hombre que soy.

Muchas gracias Salomé por ser como eres; por aguantarme siempre, por apoyarme incondicionalmente, y por estar junto a mí y junto a mi madre en el hospital. Sin duda eres de los más lindos regalos que Dios me ha dado. Contigo todo ha sido mucho más llevadero. Contigo seré mucho más feliz.

El inicio de mi formación fue en el Colegio Lucila Godoy, una pequeña escuela. En ese lugar tuve el apoyo de mis profesoras que supieron educarme. Muy agradecido estoy de mi primera profesora, Sra. Carmen Peralta. También de mi profesora, Sra. Ximena Rojas. Nunca olvido que ella fue fundamental en mi ingreso al Liceo Lastarria.

Un sincero agradecimiento a los que fueron mis profesores en el Liceo Lastarria, en especial a la Sra. Cecilia Arancibia y al Sr. Israel Ávalos. Puedo decir que recibí una educación pública de calidad y me siento honrado de poder haber estudiado allí. Estoy muy agradecido por haberme dado las herramientas para estudiar en la mejor universidad del país: la Universidad de Chile.

También mis más sinceros agradecimientos a todos mis amigos y amigas, que en los momentos más difíciles que he pasado en el transcurso de la realización de esta Memoria, me han sabido apoyar. Luchar por la vida de mi madre fue muy difícil. Perderla aún más. Pero sin duda un abrazo, un “cómo estás”, una sonrisa amable, me han ayudado a soportar todo de buena forma. Cuando más los necesité, supieron estar ahí; eso jamás se olvida.

Mención especial para mis amigos desde el inicio de la especialidad de Minas: Alexis, José, Fabián, Yazna y Kathy; y también para mis amigos que conocí desde Plan Común: Emiliano, Alonso y Aldo. Sé que nuestra amistad perdurará mucho más allá que la Universidad.

También quisiera agradecer a mi Profesor Guía, Sr. Raúl Castro. Sus consejos, apoyo, ayuda y comprensión han sido fundamentales para mí, y para lograr este trabajo.

Y muchas gracias a todos mis amigos y amigas de BCLab. Sin duda estarán por siempre en mi mente. Gracias por apoyarme y darme ánimo siempre.

Un afectuoso agradecimiento a los profesionales de División El Teniente que me ayudaron a realizar este trabajo, aportando con datos, consejos y asesoría: don Max Barahona; a los miembros de mi comisión, don Ricardo Vargas y don Rodrigo Barrera; así también a don Christian Caviedes y a don Antonio Pinochet.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Motivación del trabajo.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.2.1.	Objetivo General.....	2
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	2
1.3.	Alcances.....	2
1.4.	Metodología.....	3
1.5.	Potencial económico del mineral saturado remanente.....	3
1.6.	Análisis general de aparición de agua-barro, y análisis de escurrimientos.....	4
1.7.	Contenidos por capítulo.....	5
1.7.1.	Capítulo “2. ANTECEDENTES TEÓRICOS”.....	5
1.7.2.	Capítulo “3. CUANTIFICACIÓN DEL MINERAL SATURADO REMANENTE”.....	5
1.7.3.	Capítulo “4. ANÁLISIS DEL INGRESO DE AGUA-BARRO”.....	5
1.7.4.	Capítulo “5. ANÁLISIS DE ESCURRIMIENTOS”.....	5
2.	ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	6
2.1.	Introducción.....	6
2.2.	Fundamentos de bombeos y escurrimientos en minería de hundimiento.....	6
2.2.1.	Definición del problema.....	6
2.2.2.	Lugares de ocurrencia.....	7
2.2.3.	Consecuencias.....	7
2.2.4.	Causas y factores asociados.....	9
2.2.5.	Material formador de barro.....	10
2.2.6.	Agua.....	10
2.2.7.	Perturbación.....	11
2.2.8.	Puntos de descarga.....	11
2.2.9.	Mecanismos.....	11
2.2.10.	Flujos de barro externos.....	12
2.2.11.	Flujos de barro internos.....	13
2.2.12.	Aspectos operacionales y de planificación minera.....	14
2.3.	Extracción de mineral saturado en minería de hundimiento.....	15
2.3.1.	IOZ y DOZ, Grasberg, PT Freeport Indonesia.....	15
2.3.2.	División El Teniente, Codelco, Chile.....	20

2.4.	Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI).....	25
2.5.	Conclusiones del capítulo “ANTECEDENTES TEÓRICOS”	27
3.	CUANTIFICACIÓN DEL MINERAL SATURADO REMANENTE.....	29
3.1.	Introducción	29
3.2.	Reservas extraíbles en sector Diablo Regimiento.....	29
3.3.	Leyes del barro.....	31
3.4.	Mineral saturado remanente en puntos afectados por agua-barro	32
3.5.	Mineral saturado potencialmente extraíble en puntos no afectados por agua-barro.....	33
3.6.	Resumen: mineral saturado remanente, y mineral saturado potencialmente extraíble...	35
3.7.	Conclusiones del capítulo “CUANTIFICACIÓN DEL MINERAL SATURADO REMANENTE”	35
4.	ANÁLISIS DEL INGRESO DE AGUA-BARRO.....	37
4.1.	Introducción	37
4.2.	Antecedentes generales sobre Diablo Regimiento.....	38
4.2.1.	Sectores superiores suprayacentes.....	38
4.2.2.	Alturas in situ	39
4.2.3.	Topografía	40
4.3.	Situación actual de Diablo Regimiento	40
4.4.	Evolución de cantidad de puntos de extracción en estados Barro/Agua, Limitado, Extracción Tele Comandada y Barrera.....	43
4.4.1.	Extracción con equipos tele comandados	43
4.5.	Secuencia de aparición de agua-barro.....	44
4.6.	Estrategia de caving	46
4.7.	Altura extraída a la que apareció agua-barro	49
4.8.	Perfiles de alturas extraídas	53
4.8.1.	Evolución temporal de perfiles de alturas extraídas	54
4.8.2.	Calle 23: aparición inicial de agua-barro.....	54
4.8.3.	Calle 25: mayor cantidad de puntos cerrados por agua-barro	56
4.8.4.	Calle 27: movimiento de agua-barro hacia el sur	58
4.8.5.	Calle 29: aparición discontinua de agua-barro a lo largo de la calle.....	59
4.8.6.	Polígono 2: aparición de agua-barro discontinua	60
4.8.7.	Resumen de lo observado	63
4.9.	Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI).....	63
4.9.1.	Hipótesis de trabajo al calcular el Índice de Uniformidad Vectorizado.....	64
4.9.2.	Índice de Uniformidad Vectorizado; caso con vecindad real.....	64

4.9.3.	Análisis desde el inicio de extracción, hasta aparición de agua-barro	65
4.9.4.	Estudio de puntos de extracción precursores de ingreso de agua-barro	67
4.10.	Tasas de extracción	71
4.11.	Conclusiones sobre el capítulo “ANÁLISIS DEL INGRESO DE AGUA-BARRO”	73
5.	ANÁLISIS DE ESCURRIMIENTOS	76
5.1.	Introducción	76
5.2.	Escurrecimiento en calle 25, zanja 26 oeste	76
5.2.1.	Antecedentes del incidente	76
5.2.2.	Estados de puntos de extracción	77
5.2.3.	Alturas extraídas	78
5.2.4.	Velocidades de extracción	81
5.2.5.	Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI)	83
5.3.	Escurrecimiento en calle 23, zanja 26 este	84
5.3.1.	Antecedentes del incidente	84
5.3.2.	Estados de puntos de extracción	85
5.3.3.	Alturas extraídas	86
5.3.4.	Velocidades de extracción	90
5.3.5.	Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI)	91
5.4.	Escurrecimiento en calle 39, zanja 37 este	92
5.4.1.	Antecedentes del incidente	92
5.4.2.	Estados de puntos de extracción	92
5.4.3.	Alturas extraídas	93
5.4.4.	Velocidades de extracción	96
5.4.5.	Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI)	97
5.5.	Resumen sobre lo observado en el análisis de escurrimientos	99
5.6.	Conclusiones sobre el capítulo “ANÁLISIS DE ESCURRIMIENTOS”	100
6.	CONCLUSIONES Y ENFOQUE FUTURO	102
6.1.	Conclusiones del trabajo de Memoria de Título	102
6.2.	Recomendaciones y enfoque futuro	105
	BIBLIOGRAFÍA	108
	ANEXO A	111
	Metodología detallada usada para cálculo del potencial económico del mineral saturado remanente.....	111
	Reservas remanentes no extraídas por estar afectadas por agua-barro.....	112

Reservas potencialmente extraíbles en zonas de riesgo de ingreso de agua-barro.....	114
ANEXO B	115
Consideraciones para el cálculo del Índice de Uniformidad Vectorizado.....	115
Escala temporal.....	115
Vecindad de puntos de extracción	116
ANEXO C	119
Desglose de reservas extraíbles por cada estado posible de puntos de extracción.....	119
ANEXO D	120
Índice de Uniformidad Vectorizado para periodos de 5 y 7 turnos, para todos los puntos con aparición de agua-barro	120
ANEXO E.....	121
Punto de extracción 19-26-F	121
Punto de extracción 23-27-H.....	122
Punto de extracción 27-30-H.....	124
Punto de extracción 29-31-H.....	125
Punto de extracción 31-33-H.....	126
ANEXO F.....	128
Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI); caso con vecindad real	128
ANEXO G	129
Histogramas de puntos de extracción elegidos para análisis de tasas de extracción, en análisis de aparición de agua-barro	129
ANEXO H	132
Evolución del VUI para vecindad del punto de extracción 25-26-H	132
Evolución del VUI para vecindad del punto de extracción 23-26-F	134
Evolución del VUI para vecindad del punto de extracción 39-37-F	136
Histogramas de las velocidades de extracción aplicadas a vecinos del punto 25-26-H.....	138
ANEXO I.....	140
Matrices de categorización del Índice de Uniformidad Vectorizado (Castillo 2009).	140
ANEXO J.....	141
Estados posibles de puntos de extracción:.....	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Información sobre bombeos en Mina Río Blanco, División Andina, Codelco (Tapia y Martínez, 2011).	9
Tabla 2: Mecanismos propuestos para flujos de barro externos (Butcher et al., 2000).....	12
Tabla 3: Mecanismos propuestos para flujos de barro internos (Butcher et al., 2000).	13
Tabla 4: Tabla de clasificación de puntos de extracción para operación mediante LHD manual y tele comandado; PT Freeport Indonesia (Widijanto et al., 2011).....	19
Tabla 5: Resumen de las características de bombeos ocurridos entre 1989 y 2010 en El Teniente (Codelco, División El Teniente, 2010).....	21
Tabla 6: Valores considerados para la limitación de altura extraíble por efecto de agua-barro (Codelco, División El Teniente, 2013).....	22
Tabla 7: Estados de puntos de extracción asociados al agua-barro. Las definiciones son aquellas usadas por Control Producción Mina (CPM).	24
Tabla 8: Matriz de criticidad usada en El Teniente para control de agua barro (Becerra, 2011)..	24
Tabla 9: Categorías de humedad medidas en terreno mediante inspecciones a los puntos de extracción (Codelco, División El Teniente, 2010).	25
Tabla 10: Rangos de tamaños medidos en los puntos de extracción mediante inspección visual (Codelco, División El Teniente, 2010).....	25
Tabla 11: Valores extremos que puede tomar el IEU.....	26
Tabla 12: Matriz categórica del VUI (U: uniforme; SU: semiuniforme; DU: desuniforme).	27
Tabla 13: Reservas extraíbles en sector DR, previas al inicio de su explotación.....	29
Tabla 14: Reservas extraíbles por fase en sector DR, previo al inicio de su explotación.	30
Tabla 15: Reservas no extraídas en puntos afectados por ingreso de agua-barro en sector Diablo Regimiento.	32
Tabla 16: Quebrado saturado no extraído en puntos afectados por ingreso de agua-barro, en base a alturas marginales para ley de corte 0.4% CuT.	33
Tabla 17: Quebrado saturado no extraído en puntos afectados por ingreso de agua-barro en base a alturas marginales para ley de corte 0.5% CuT.	33
Tabla 18: Mineral saturado potencialmente extraíble en puntos en zona de riesgo de ingreso de agua-barro.	34
Tabla 19: Cotas base de Diablo Regimiento y sectores antiguos suprayacentes.....	39

Tabla 20: Desglose de número de puntos de extracción (# PE) y áreas, para cada estado posible de puntos.....	42
Tabla 21: Áreas en estados Limitado, Barrera y Barro/Agua.....	42
Tabla 22: Secuencia y rangos de altura extraída a la que apareció agua-barro en el sector.....	49
Tabla 23: Resumen de lo observado mediante evolución de perfiles de alturas extraídas.....	63
Tabla 24: Promedios anuales de “porcentaje de uniformidad” y “altura de aparición de agua-barro”.....	67
Tabla 25: Puntos de extracción elegidos para análisis de tasas de extracción aplicadas.....	72
Tabla 26: Evolución de estados de la vecindad de puntos de extracción del 25-26-H.....	78
Tabla 27: Pendiente de rectas de regresión de alturas extraídas para vecindad de punto 25-26-H.....	79
Tabla 28: Evolución de estados de la vecindad de puntos de extracción del 23-26-F.....	85
Tabla 29: Pendiente de rectas de regresión de alturas extraídas para vecindad de punto 23-26-F.....	88
Tabla 30: Resumen sobre lo observado en el análisis de escurrimientos.....	99
Tabla 31: Enoestado de base de datos “Mina Reserva Banco”.....	111
Tabla 32: Enoestado de base de datos “Mina Reserva Columna”.....	111
Tabla 33: Enoestado de base de datos “Mina Carta Cumplimiento”.....	111
Tabla 34: Matriz de estados de puntos de extracción en el tiempo.....	112
Tabla 35: Ejemplo de espacios temporales considerados para el cálculo del índice de uniformidad, para el día 2, turno C.....	115
Tabla 36: Ejemplo de matriz de tonelajes extraídos por turno.....	115
Tabla 37: Ejemplo de matriz de tonelajes extraídos considerando espacio temporal de 3 turnos.....	115
Tabla 38: Puntos de extracción, fecha de apertura y fecha de cierre para ejemplo genérico de vecindades geométrica y real.....	117
Tabla 39: Reservas extraíbles por estados posibles de puntos de extracción.....	119
Tabla 40: Puntos de extracción elegidos para análisis de tasas de extracción aplicadas.....	131
Tabla 41: Matriz de categorización del VUI para 7 vecinos.....	140
Tabla 42: Matriz de categorización del VUI para 6 vecinos.....	140
Tabla 43: Matriz de categorización del VUI para 5 vecinos.....	140

Tabla 44: Matriz de categorización del VUI para 4 vecinos.	140
Tabla 45: Matriz de categorización del VUI para 3 vecinos.	140
Tabla 46: Matriz de categorización del VUI para 2 vecinos.	140
Tabla 47: Estados posibles de puntos de extracción, usados en División El Teniente, Codelco.	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Bases de datos utilizadas en la realización de la Memoria de Título.....	3
Figura 2: Esguerrimiento de barro húmedo en DOZ, PT Freeport, Indonesia; Septiembre de 2005 (Syaifullah et al., 2006).	7
Figura 3: LHD sepultado debido a un esguerrimiento en panel 02 de DOZ; PT Freeport Indonesia; Abril de 2011 (Widijanto et al., 2011).	8
Figura 4: Elementos requeridos para la ocurrencia de un bombeo o esguerrimiento (Butcher et al., 2000).	9
Figura 5: Minas explotadas en el complejo subterráneo de PT Freeport Indonesia (Syaifullah et al., 2006).	15
Figura 6: Distribución del material y su contenido de humedad en eventos de flujos de barro en la mina DOZ, PT Freeport, Indonesia (Samosir et al., 2008).	17
Figura 7: Galerías de drenaje (A, B, C, D y E) en la vecindad de DOZ (Samosir et al., 2008).	18
Figura 8: Esquemas conceptuales de drenaje y monitoreo de puntos de extracción en IOZ. (a) Puntos existentes; (b) puntos a futuro.	19
Figura 9: Sectores identificados con potencial de ingreso de agua-barro en El Teniente (Codelco, División El Teniente, 2013).	22
Figura 10: Estrategia de extracción usada en RENO, El Teniente, de acuerdo a la presencia de barro (Ferrada, 2011).	23
Figura 11: Alturas extraíbles en sector DR.	30
Figura 12: Histograma de alturas extraíbles en sector DR previas al inicio de su explotación.	31
Figura 13: Leyes (%CuT) a las cuales un punto es declarado en estado agua-barro.	31
Figura 14: Resumen de la cuantificación del mineral saturado remanente y del potencialmente extraíble.	35
Figura 15: Mapa conceptual sobre problemática de bombeos y detección de aparición de agua-barro.	37
Figura 16: Fases del sector Diablo Regimiento.	38
Figura 17: Sectores antiguos suprayacentes a Diablo Regimiento. Vista en planta.	39
Figura 18: Alturas in situ en sector Diablo Regimiento, previo al inicio de explotación. Vista en perspectiva.	40
Figura 19: Avance del barro en Diablo Regimiento, y proyección del canalón (Codelco, División El Teniente, 2014).	41
Figura 20: Estados de puntos de extracción para el sector Diablo Regimiento, al día 22 de noviembre de 2013.	41
Figura 21: Evolución temporal de cantidad de puntos en estados asociados a agua-barro.	43
Figura 22: Comparación entre número de puntos en estado Barro/Agua, durante y después de realizar extracción Tele Comandada.	44
Figura 23: Secuencia anual de aparición de agua-barro en DR.	45

Figura 24: Secuencia (orden) de aparición de agua-barro en DR.....	46
Figura 25: Conexión del sector Diablo Regimiento (Codelco, División El Teniente, 2009).....	46
Figura 26: Secuencia de conexión (extracción de 1/3 de columna in situ). En negro se demarcan las zonas con actual presencia de agua-barro.	47
Figura 27: Evolución del área conectada durante el 2006, para 2 casos: 1/3 y 1/5 de columna in situ extraída.	48
Figura 28: Resultado de información integrada (Junio 2006) obtenido por Superintendencia de Geomecánica, respecto a conexión de Diablo Regimiento con Teniente 4 (Codelco, División El Teniente, 2006).....	48
Figura 29: Altura extraída a la que apareció agua-barro en DR.....	50
Figura 30: Secuencia y altura extraída a la que apareció agua-barro en DR.....	51
Figura 31: Altura extraída a la que aparece agua-barro en DR, versus tiempo.....	51
Figura 32: Histograma de alturas extraídas a la que aparece agua-barro en DR.....	52
Figura 33: Relación entre altura extraída y altura in situ a la cual ocurrió aparición de agua-barro.	52
Figura 34: Ejemplo de perfil de alturas extraídas.....	53
Figura 35: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraídas, para calle 23-H.	55
Figura 36: Evolución 2005-2013 de perfiles este-oeste de alturas extraídas; punto de extracción 23-27-H.....	56
Figura 37: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraídas, para calle 25-H.	57
Figura 38: Evolución 2005-2013 de perfiles este-oeste de alturas extraídas; punto de extracción 25-29-H.....	57
Figura 39: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraída, para calle 27-F.	58
Figura 40: Evolución 2005-2013 de perfiles este-oeste de alturas extraídas; punto de extracción 27-29-F.	59
Figura 41: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraída, para calle 29-H.....	60
Figura 42: Secuencia de aparición de agua-barro en polígono 2 (lado este) en DR.....	61
Figura 43: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraídas, para calle 45-H.	61
Figura 44: Evolución 2005-2013 de perfiles este-oeste de alturas extraídas, para puntos 39-38-F y 41-39-F.	62
Figura 45: VUI considerando periodo desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro. 65	
Figura 46: Porcentaje de uniformidad con que fueron extraídos los puntos con aparición de agua-barro. Periodo considerado: desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro. Vecindad real.....	66
Figura 47: Porcentaje de uniformidad con que fueron extraídos los puntos con aparición de agua-barro.....	66
Figura 48: Porcentaje de uniformidad versus altura extraída a la que apareció agua-barro.....	67
Figura 49: Ejemplo de precursores y receptores.	68
Figura 50: VUI considerando periodo desde 1 mes previo a aparición de agua-barro.	69

Figura 51: Algunos puntos precursores y sus vecinos receptores, marcados con flechas grises. .	69
Figura 52: Evolución del VUI para punto 41-38-H, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.....	70
Figura 53: Evolución del VUI para punto 41-39-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.....	70
Figura 54: Evolución del VUI para punto 41-39-H, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.....	71
Figura 55: Evolución del VUI para punto 39-38-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.....	71
Figura 56: Evolución del VUI para punto 39-37-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.....	71
Figura 57: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 23-27-H.....	73
Figura 58: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 39-37-F.	73
Figura 59: Vecindad del punto de extracción 25-26-H.	77
Figura 60: Estados de puntos de extracción en DR previo al incidente. 8 de abril de 2011.	77
Figura 61: Alturas extraídas en la vecindad del punto 25-26-H. Izquierda: 1 año antes del evento; centro: 6 meses antes del evento; derecha: durante el evento.	78
Figura 62: Evolución de alturas extraídas para punto de extracción 25-26-H y su vecindad	79
Figura 63: Situación de alturas extraídas al 09 de abril de 2011.....	80
Figura 64: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección norte-sur, calle 25-H; abril-2009 a abril-2011.....	81
Figura 65: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección este-oeste; abril-2009 a abril-2011.	82
Figura 66: Velocidades efectivas en vecindad del punto 25-26-H, desde 1 año antes del evento.	82
Figura 67: Izquierda: histograma de velocidades de extracción del punto 23-26-F. Derecha: histograma de velocidades de extracción del punto 25-26-H.....	83
Figura 68: VUI para punto de extracción 25-26-H, durante 1 mes antes del evento.	83
Figura 69: Evolución del VUI para punto 25-25-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	84
Figura 70: Vecindad del punto de extracción 23-26-F.....	84
Figura 71: Estados de puntos de extracción en DR previo al incidente. 17 de octubre de 2011... ..	85
Figura 72: Alturas extraídas en la vecindad del punto 23-26-F. Izquierda: 1 año antes del evento; centro: 6 meses antes del evento; derecha: durante el evento.	86
Figura 73: Evolución de alturas extraídas para punto de extracción 23-26-F y su vecindad, desde 1 año antes del evento.....	87
Figura 74: Evolución de alturas extraídas para punto de extracción 23-26-F y su vecindad, desde 2 meses antes del evento.....	87
Figura 75: Situación de alturas extraídas al 18 de octubre de 2011.	88

Figura 76: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección norte-sur, calle 23-F; oct.-2009 a oct.-2011	89
Figura 77: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección este-oeste; oct.-2009 a oct.-2011	89
Figura 78: Velocidades efectivas en vecindad del punto 23-26-F, desde 1 año antes del evento. 90	
Figura 79: Velocidades efectivas en vecindad del punto 23-26-F, desde 1 mes antes del evento. 90	
Figura 80: VUI para punto de extracción 23-26-F, durante 1 mes antes del evento.	91
Figura 81: Evolución del VUI para punto 23-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.	92
Figura 82: Vecindad del punto de extracción 39-37-F.	92
Figura 83: Estados de puntos de extracción en DR previo al incidente. 17 de agosto de 2013. ...	93
Figura 84: Evolución de estados de la vecindad de puntos de extracción del 39-37-F.	93
Figura 85: Alturas extraídas en la vecindad del punto 39-37-F. Izquierda: 1 año antes del evento; centro: 6 meses antes del evento; derecha: durante el evento.	94
Figura 86: Evolución de alturas extraídas para punto de extracción 39-37-F y su vecindad, desde 6 meses antes del evento.	94
Figura 87: Situación de alturas extraídas al 21 de agosto de 2013.	95
Figura 88: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección norte-sur, calle 39-F; sept.-2011 a sept.-2013.	95
Figura 89: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección este-oeste; sept.-2011 a sept.-2013.	96
Figura 90: Velocidades efectivas en vecindad del punto 25-26-H, desde 1 año antes del evento. 97	
Figura 91: Velocidades efectivas en vecindad del punto 39-37-F, desde 5 meses antes del evento.	97
Figura 92: VUI para punto de extracción 39-37-F, durante 1 mes antes del evento.	98
Figura 93: VUI para punto de extracción 39-37-F, durante 1 mes antes del evento.	98
Figura 94: Esquema ilustrativo para estimación de reservas remanentes.	113
Figura 95: Esquema ilustrativo para estimación de reservas potencialmente extraíbles en zona con riesgo de ingreso de agua-barro.	114
Figura 96: Vecindad del punto de extracción #3 para ejemplo genérico de vecindades geométrica y real.	116
Figura 97: Casos posibles al calcular VUI, considerando vecindad real.	117
Figura 98: Casos posibles al calcular VUI, considerando vecindad geométrica.	118
Figura 99: VUI para espacio temporal de 5 turnos; vecindad geométrica.	120
Figura 100: VUI para espacio temporal de 7 turnos; vecindad geométrica.	120
Figura 101: Evolución del VUI para punto 19-26-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.	121
Figura 102: Evolución del VUI para punto 19-25-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.	121

Figura 103: Evolución del VUI para punto 21-26-H, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.....	122
Figura 104: Evolución del VUI para punto 23-27-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	122
Figura 105: Evolución del VUI para punto 23-26-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	122
Figura 106: Evolución del VUI para punto 23-27-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	123
Figura 107: Evolución del VUI para punto 21-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	123
Figura 108: Evolución del VUI para punto 21-27-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	123
Figura 109: Evolución del VUI para punto 23-28-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	123
Figura 110: Evolución del VUI para punto 23-28-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	124
Figura 111: Evolución del VUI para punto 27-30-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	124
Figura 112: Evolución del VUI para punto 25-30-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	124
Figura 113: Evolución del VUI para punto 27-31-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	125
Figura 114: Evolución del VUI para punto 29-31-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	125
Figura 115: Evolución del VUI para punto 29-30-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	125
Figura 116: Evolución del VUI para punto 29-31-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	126
Figura 117: Evolución del VUI para punto 31-33-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	126
Figura 118: Evolución del VUI para punto 31-34-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	126
Figura 119: Evolución del VUI para punto 31-34-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	127
Figura 120: VUI para caso con vecindad geométrica, desde conexión con RD hasta aparición de agua-barro.....	128
Figura 121: VUI para caso con vecindad real, desde 1 mes previo a aparición de agua-barro...	128
Figura 122: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 19-25-F.	129
Figura 123: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 25-33-H.....	129

Figura 124: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 29-34-F.	130
Figura 125: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 45-42-H.....	130
Figura 126: Evolución del VUI para punto 23-25-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	132
Figura 127: Evolución del VUI para punto 23-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	132
Figura 128: Evolución del VUI para punto 25-25-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	132
Figura 129: Evolución del VUI para punto 25-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	133
Figura 130: Evolución del VUI para punto 25-26-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	133
Figura 131: Evolución del VUI para punto 25-27-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	133
Figura 132: Evolución del VUI para punto 25-27-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	133
Figura 133: Evolución del VUI para punto 23-25-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	134
Figura 134: Evolución del VUI para punto 23-25-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	134
Figura 135: Evolución del VUI para punto 23-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	134
Figura 136: Evolución del VUI para punto 23-26-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	135
Figura 137: Evolución del VUI para punto 23-27-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	135
Figura 138: Evolución del VUI para punto 25-26-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	135
Figura 139: Evolución del VUI para punto 25-27-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	135
Figura 140: Evolución del VUI para punto 39-36-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	136
Figura 141: Evolución del VUI para punto 39-36-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	136
Figura 142: Evolución del VUI para punto 39-37-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	136
Figura 143: Evolución del VUI para punto 39-37-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	137

Figura 144: Evolución del VUI para punto 39-38-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	137
Figura 145: Evolución del VUI para punto 41-37-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	137
Figura 146: Evolución del VUI para punto 41-38-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.....	137
Figura 147: Histogramas de velocidades de extracción de los puntos 23-25-F y 25-26-H.....	138
Figura 148: Histogramas de velocidades de extracción de los puntos 25-26-H y 25-27-F.....	138
Figura 149: Histogramas de velocidades de extracción del punto 25-27-H.....	139

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del trabajo

Uno de los desafíos de la minería del futuro es la explotación de yacimientos cada vez más profundos (Flores, 2014). Bajo los escenarios de costos actuales y la tendencia a explotar yacimientos cada vez de menor ley, la tendencia actual es el uso de un método de explotación masivo y a bajo costo.

El Block/Panel Caving es un método de explotación subterráneo que cumple tales características. Su fundamento es la realización de un corte basal mediante perforación y tronadura en la base del cuerpo mineralizado, con un radio hidráulico suficiente para permitir que éste se hunda gradualmente como consecuencia de la redistribución de esfuerzos alrededor del corte inicial. Con la extracción progresiva de mineral quebrado posterior a la iniciación del hundimiento, éste se propaga verticalmente a lo alto del cuerpo mineralizado hasta que alcanza a la roca suprayacente, produciéndose finalmente su hundimiento, ocurriendo así la subsidencia (Brown, 2007).

Una característica inherente del método es la generación de material fino en la columna de quebrado debido a conminución secundaria. Junto a lo anterior, el potencial ingreso de material suprayacente al yacimiento hace que la existencia de fino en el quebrado sea una condición natural del método. Por otro lado, en faenas ubicadas en lugares con niveles de precipitaciones importantes, la generación de un cráter de subsidencia en superficie crea condiciones suficientes para la acumulación de agua con su consecuente ingreso hacia las labores productivas como efecto de la extracción y del movimiento del quebrado. Otro punto a destacar es que la interfase entre la roca in situ y el quebrado genera un gradiente de presión que hace que cuerpos de agua subterráneos fluyan hacia el quebrado. Además, a mayores alturas de columna de quebrado, existe una mayor capacidad de almacenamiento de agua-barro.

Los bombeos o estallidos de agua-barro, definidos como ingresos violentos de una mezcla de material fino y agua hacia labores productivas, son un problema inherente a un yacimiento que es explotado por el método Block/Panel Caving y que cuente con ingreso de agua hacia el material quebrado. Por lo tanto, uno de los problemas del uso del método en presencia de humedad, es la exposición del personal, equipos e infraestructura, a riesgo de bombeo. Con el fin de hacer frente al problema, se han tomado diversas medidas: programas de drenaje, estrategias de planificación y de operación conservadoras, y re-definición de reservas que no consideren la extracción de columnas de mineral saturado. Principalmente esta última medida implica dejar cantidades importantes de mineral sin extraer. Por lo tanto, se hace necesario que el problema sea estudiado en mayor detalle; el fin perseguido es obtener una mejor comprensión sobre cómo ocurre el ingreso de agua-barro a sectores en explotación, y qué medidas son efectivas en términos de retrasar o mitigar su ingreso.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general de este estudio es analizar la aparición de agua-barro en el sector Diablo Regimiento de División El Teniente de Codelco, con el fin de comprender la importancia de las estrategias de planificación y de operación, y de determinar si existe o no relación de distintas variables operacionales con el problema.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar el potencial económico del mineral saturado remanente, cuantificando aquel que actualmente ya está afectado por agua-barro, así como aquel que quedará remanente una vez que ocurra el ingreso de agua-barro a puntos actualmente secos.
- Analizar la aparición de agua-barro en el sector considerando evolución de estados de los puntos a través del tiempo, secuencia de aparición de agua-barro en el sector, altura extraída a la que aparece agua-barro, evolución temporal de perfiles de alturas extraídas y evolución de la uniformidad de la extracción mediante uso de índices de uniformidad.
- Realizar un análisis de eventos de escurrimientos ocurridos en el sector que permitan proponer las variables operacionales que gatillaron estos eventos.

1.3. Alcances

La realización del presente trabajo se centró en el análisis de datos mina; en particular, de bases de datos de extracción históricas e historial de estados de los puntos de extracción. Además, se debió contar con el modelo de columnas del sector (Mina Reserva columna), así como el modelo por bancos (Mina Reserva Banco).

El análisis de estrategias de extracción aplicadas en el sector en estudio, se centra en aspectos operacionales. Por lo tanto, las conclusiones a obtener no se centran en cuál es el mecanismo que desencadena la aparición de agua-barro o un escurrimiento, pues para tal efecto se debería realizar un estudio detallado sobre el comportamiento del mineral saturado a distintas condiciones.

El cálculo del Índice de Uniformidad Vectorizado se realiza en base a consideraciones obtenidas en otros estudios exhaustivos sobre el indicador. Por lo tanto, no se pretende estudiar su sensibilidad a distintos parámetros de cálculo, sino que se calcula con parámetros ya asumidos.

El cálculo de reservas se realizó utilizando el modelo por bancos del sector, cruzando la base de datos anterior con la de extracción histórica. Al respecto, no se pretende validar el modelo de dilución con que se determinó el modelo de bancos por el sector, por lo cual éste se asume como válido.

1.4. Metodología

Para la realización de este estudio, se contó con un conjunto de bases de datos del sector Diablo Regimiento, aportados por la Superintendencia de Planificación Minerometalúrgica de División El Teniente. Estas bases de datos fueron las que se muestran en la Figura 1.

Mina reserva banco	•Contiene datos geo-minero-metalúrgicos de cada banco de todos los puntos del sector.
Mina reserva columna	•Contiene tonelaje, ley y altura extraíbles de todos los puntos de extracción.
Mina extracción turno	•Contiene el registro histórico de tonelajes y leyes extraídos por punto de extracción.
Mina estado punto extracción	•Contiene el registro histórico de estados de todos los punto de extracción.
Granulometría	•Contiene registro histórico de granulometría observada por punto de extracción.
Humedad	•Contiene registro histórico de humedad categórica observada por punto de extracción.

Figura 1: Bases de datos utilizadas en la realización de la Memoria de Título.

Las últimas 4 contienen registros a través del tiempo, mientras que las primeras 2 son fijas.

1.5. Potencial económico del mineral saturado remanente

Para determinar el potencial económico del mineral saturado remanente¹, se creó un programa computacional que cumplió el siguiente algoritmo:

- Para cada punto de extracción, determinar hasta qué banco ha sido extraído el punto.
- Para cada punto de extracción, se cuenta con la altura extraíble, la cual corresponde a cierto banco de cada columna.

¹ Para mayor detalle, revisar capítulo ANEXO A.

- Al usar la base de datos de estados de puntos, se pueden filtrar aquellos afectados por agua-barro.
- Por lo tanto, considerando los puntos anteriores, se obtiene el remanente, en términos de tonelaje y de finos, considerando los bancos que están sobre lo extraído y bajo lo extraíble.

Para los casos en que se consideran alturas marginales, el algoritmo es análogo.

1.6. Análisis general de aparición de agua-barro, y análisis de escurrimientos

Para pasar desde tonelajes extraídos a alturas extraídas, se creó un programa computacional que cumplió el siguiente algoritmo:

- De la base de datos Mina Reserva Banco, se tiene tonelaje, ley y densidad diluidos de cada banco, para cada punto de extracción.
- Se creó una relación entre el tonelaje diluido de cada banco y altura extraída, mediante la siguiente expresión:

$$Altura\ extraída = \frac{Tonelaje\ diluido}{Área\ de\ influencia \cdot densidad\ diluida}$$

- Por lo tanto, dado que se tiene qué bancos fueron extraídos a lo alto de cada columna de todos los puntos durante un periodo de tiempo, entonces se tienen las alturas extraídas en cada punto durante el mismo periodo.

Con las bases de datos de extracción turno, estados de puntos y alturas extraídas, se crearon matrices con tantas filas como puntos de extracción tiene el sector, y de tantas columnas como fechas de registro de datos existieron. Esto se hizo para facilitar el análisis mediante programación computacional.

Los índices de uniformidad se calcularon en base a los datos disponibles, generándose de igual forma matrices con la misma estructura antes mencionada.

Con todos los datos disponibles, los posteriores análisis consistieron en cruzar información entre distintas bases de datos, y desplegar gráficamente resultados a medida que se realizó el estudio.

1.7. Contenidos por capítulo

1.7.1. Capítulo “2. ANTECEDENTES TEÓRICOS”

Se expone en detalle cuál es el problema, dónde ocurre, sus consecuencias, causas y factores asociados, mecanismos propuestos y además algunos aspectos operacionales y de planificación minera usados hoy en día para afrontarlo. Además se presenta cómo se aborda el problema en IOZ y DOZ, Grasberg, PT Freeport Indonesia, y en División El Teniente de Codelco. Por último se establece en qué consiste el Índice de Uniformidad Vectorizado y cómo se calcula.

1.7.2. Capítulo “3. CUANTIFICACIÓN DEL MINERAL SATURADO REMANENTE”

Se presentan los resultados del cálculo del mineral saturado remanente en el sector en estudio, así como las leyes de cierre de puntos por agua-barro.

1.7.3. Capítulo “4. ANÁLISIS DEL INGRESO DE AGUA-BARRO”

Se presentan algunas características del sector en estudio que permiten comprender mejor la problemática. Posteriormente se realiza el análisis de la aparición de agua-barro en términos de evolución de estados de puntos, secuencia de aparición de agua-barro, altura extraída a la aparición, y evolución de perfiles de alturas extraídas. Finalmente se calcula el Índice de Uniformidad Vectorizado para los puntos afectados, y se mencionan aspectos sobre tasa de extracción aplicada.

1.7.4. Capítulo “5. ANÁLISIS DE ESCURRIMIENTOS”

Se realiza un análisis en detalle de 3 escurrimientos ocurridos en el sector, en términos de estados de puntos de extracción, alturas extraídas, velocidades de extracción e Índice de Uniformidad Vectorizado.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1. Introducción

Los bombeos o estallidos de agua-barro son un fenómeno que cada vez toma más importancia en la minería subterránea masiva, pues entre los diversos efectos que puede causar, está la muerte de personal de operación, llevando en algunos casos al consecuente cierre temporal de faenas, impactando negativamente el negocio minero. El hecho de que la seguridad sea un valor fundamental para una minería sustentable, ha llevado a que se tomen medidas para hacer frente al problema: programas de drenaje, estrategias de planificación y de operación, y re-definición de reservas que no consideren la extracción de columnas de mineral saturado.

En el presente capítulo se presentan algunos aspectos teóricos sobre la ocurrencia de bombeos y escurrimientos en minería de hundimiento. En primer lugar se abordan sus fundamentos: cuál es el problema, en qué consiste, dónde ocurre, cuáles son sus consecuencias, qué lo causa y qué factores lleva asociados; también se abordan los mecanismos teóricos que se cree pueden desencadenar un bombeo o escurrimiento de agua-barro. Además de lo anterior, se mencionan en esta primera parte algunos aspectos operacionales y de planificación minera que algunos autores han publicado respecto a cómo evitar o mitigar el problema. Posteriormente se menciona cómo es abordado el problema en 2 faenas actualmente en explotación: IOZ y DOZ, minas subterráneas de Grasberg, PT Freeport Indonesia, y El Teniente de Codelco. Finalmente se muestra un índice de uniformidad para control de tiraje: cómo se define, qué consideraciones lleva consigo, y cómo se usa.

2.2. Fundamentos de bombeos y escurrimientos en minería de hundimiento

2.2.1. Definición del problema

Se define como flujo de barro, avalancha de barro, o bombeo, a una entrada repentina y violenta de una mezcla compuesta de agua y material fino, hacia labores mineras subterráneas (Butcher et al., 2000). Dicho evento puede afectar al personal presente en el lugar, además de causar importantes daños a equipos e infraestructura.

Cuando el flujo de agua-barro ocurre de forma menos descontrolada y en menor cantidad, se habla de derrame o escurrimiento. Es decir, existen eventos caracterizados por un barro fluido, y otros por un barro viscoso. El primero se caracteriza por un contenido de agua sobre un 50%, fluye a distancias horizontales de hasta 500 m y se asemeja más a una descarga de agua que a un flujo de barro. El segundo tiene un contenido de humedad entre un 17 y un 23%; no fluiría libremente bajo la acción de la gravedad, pero cuando es sometido a esfuerzos y bajo ciertas

condiciones, puede ser movilizado y expulsado fuera del punto de extracción (Jakubec et al., 2013).



Figura 2: Esguerrimiento de barro húmedo en DOZ, PT Freeport, Indonesia; Septiembre de 2005 (Syarifullah et al., 2006).

2.2.2. Lugares de ocurrencia

Las bombeos y esguerrimientos se asocian principalmente a la aplicación de los métodos Sublevel Caving y Block/Panel Caving, pues -las operaciones bajo este tipo de minería tienen el potencial de acumular agua superficial o subterránea, generar finos por procesos de conminución, y a través de las actividades productivas propiamente mineras, proveer las perturbaciones necesarias así como también los puntos de descarga. Además, una característica de las operaciones de Block Caving es que la columna quebrada conecta la superficie topográfica con las excavaciones subterráneas proveyendo así, puntos de entrada y de descarga para el agua- (Jakubec et al., 2013).

Si bien los bombeos son mucho más frecuentes en minería de hundimiento, éstos pueden ocurrir en cualquier actividad minera en que haya acumulación de material fino y de agua, susceptibles de mezclarse y formar un flujo de barro (Jakubec et al., 2013). Básicamente lo que se requiere es que exista una apertura por la cual fluya el material, ya sean diseñadas o no para tal fin. Ejemplos de labores mineras en donde pueden ocurrir bombeos son: puntos de extracción en nivel de producción, chutes y buzones en nivel de transporte y/o acarreo.

2.2.3. Consecuencias

La principal consecuencia de la ocurrencia de bombeos, es aquella relacionada con la seguridad del personal de operación. Otras consecuencias se asocian directamente al negocio minero.

- Seguridad:
 - Lesiones y pérdida de vidas: se deben a que el evento ocurre de forma rápida, violenta e inesperada.

- Negocio minero:
 - Exceso de dilución: puede ocurrir cuando el agua ingresa mediante el cráter de subsidencia. Al existir material estéril sobre el yacimiento, el agua actúa como agente movilizador de estéril hacia el mineral quebrado.
 - Pérdida de reservas: al existir puntos de extracción con alto potencial de bombeo, en ocasiones estos son cerrados², produciéndose así una pérdida del valor comprometido al momento de la aprobación de la inversión.
 - Pérdida o retrasos de producción: ocurrido un bombeo, se debe detener la extracción en la zona y posteriormente destinar recursos a limpiar el lugar.
 - Daño a la infraestructura minera
 - Puntos y galerías con presencia de barro son más susceptibles a colapsar que aquellos que se encuentran secos, debido a que el mineral saturado ejerce presiones más altas en los pilares que aquel mineral seco (Hubert et al., 2000).
 - Al ocurrir un bombeo, diversos equipos e instalaciones no diseñados para sus efectos simplemente quedan averiados.
 - Cierre de minas: ocurre asociado a accidentes fatales producto de un bombeo.

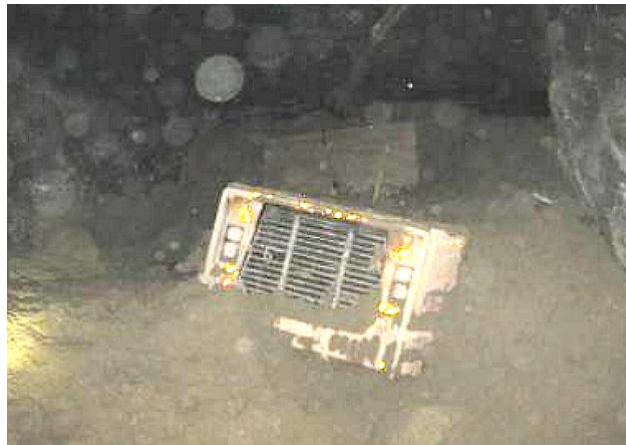


Figura 3: LHD sepultado debido a un escurrimiento en panel 02 de DOZ; PT Freeport Indonesia; Abril de 2011 (Widijanto et al., 2011).

² La motivación de esta estrategia es proteger la vida del personal de operación.

Como ejemplo del impacto de bombeos y escurrimientos en infraestructura y disponibilidad de área para producción, se muestran algunos casos ocurridos en la Mina Río Blanco de División Andina de Codelco (Tabla 1); 7 eventos ocurrieron entre los años 2005 y 2010. La mayoría de los puntos luego de la extracción, se mantienen inactivos y con acceso restringido (Tapia y Martínez, 2011).

Sector	Fecha	Característica (a fecha 2011) o impacto del evento
LHD, área B	2005	Punto bloqueado con pared de concreto dentro de un corredor abierto para el tránsito de personal y equipamiento.
LHD, área B	15-ago-07	Punto localizado en corredor no productivo abierto para tránsito de personal y equipamiento.
LHD, área 8	05-dic-07	Punto localizado en un área cerrada e inaccesible.
Parrillas, área F	08-jun-09	Bombeo alcanzó un largo de 20 m y una altura de 1.8 m, causando gran daño material. Punto localizado dentro de una galería no productiva inaccesible.
Parrillas, área H	22-sep-09	Punto localizado dentro de galería no productiva inaccesible.
LHD, área H	04-ago-10	Bombeo alcanzó un largo de 13 m y una altura de 1 m. Punto no productivo con acceso restringido.
LHD, área H	23-oct-10	Bombeo alcanzó un largo de 10 m, bloqueando la sección completa del corredor. Punto no productivo con acceso restringido.

Tabla 1: Información sobre bombeos en Mina Río Blanco, División Andina, Codelco (Tapia y Martínez, 2011).

2.2.4. Causas y factores asociados

Para la ocurrencia de un flujo repentino de barro, se requiere la conjugación de 4 elementos (Butcher et al., 2000), los cuales se muestran en la Figura 4.

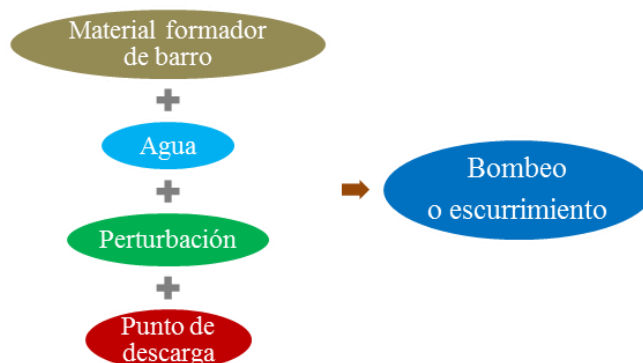


Figura 4: Elementos requeridos para la ocurrencia de un bombeo o escurrimiento (Butcher et al., 2000).

2.2.5. *Material formador de barro*

De acuerdo a revisiones de informes y reportes de accidentes, Butcher lista algunos materiales que han sido fuente de barro (Butcher et al., 2000):

- i. Materiales que se desgastan con facilidad (ejemplos: esquistos y kimberlita).
- ii. Tranques de relaves ubicados sobre labores mineras, o bien en zonas adyacentes.
- iii. Relleno en caserones ya sea con fines de soporte o de deposición.
- iv. En el caso de chimeneas y piques de traspaso, cualquier material formador de finos arcillosos.

En la minería de hundimiento en general, la formación de finos es un proceso inevitable. Debido a la continua fricción entre fragmentos, ocurre conminución secundaria con la consiguiente generación de material fino (Brown, 2007). Por otro lado, producto de la extracción de un sector, al existir material fino sobre el quebrado, éste migrará verticalmente a través de la columna, aportando a la formación de agua-barro. Tal caso ocurre cuando existe material fino sobre la topografía, o cuando se explota un sector de mineral primario que está bajo otro sector antiguo de secundario.

2.2.6. *Agua*

El agua que contribuye a la generación de bombeos y escurrimientos puede provenir de fuentes internas o externas:

- Internas: cuerpos de aguas subterráneas, filtraciones a través de discontinuidades, aguas almacenadas en labores antiguas, aguas propias usadas en la actividad minera (hidrofracturamiento por ejemplo), etc.
- Externas: lluvia, deshielo de nieve y/o granizos, ríos, lagos, lagunas, tranques de relave, etc.

El agua genera impactos negativos en todo el ciclo de generación de un estallido de barro: acelera el desgaste de la roca³, y de esta forma apura la generación de barro. Es más: en algunas instancias han habido casos de flujos directos de agua-barro totalmente atribuibles a lluvias intensas previas al evento. Sin embargo, a medida que la mina “madura”, se reduce la correlación entre precipitaciones y la generación de flujos de barro, pues van aumentando los tiempos de retención y la capacidad de almacenamiento de agua por parte del quebrado sobre los niveles productivos (Jakubec et al., 2013). De este modo, la generación de un bombeo o un escurrimiento

³ Desgaste químico: algunos minerales de las rocas son susceptibles a disolverse en agua. Desgaste físico: aquel mediante el cual las rocas se parten mecánicamente en otras más pequeñas.

no siempre estará relacionada a la existencia u observación de agua o agua-barro en el cráter de subsidencia.

2.2.7. Perturbación

Se refiere a la acción que desencadena el evento, la cual en la mayoría de los casos es la misma extracción del mineral. También podrían incluirse sismos, tronaduras, estabilización de arcos inestables (colgaduras), etc.

2.2.8. Puntos de descarga

En este factor se incluyen todas aquellas aperturas mineras subterráneas por las cuales pueda “escapar” el agua-barro. Principalmente son puntos de extracción en nivel de producción (y sus calles y galerías de zanja asociadas) y galerías del nivel de acarreo y de transporte.

2.2.9. Mecanismos

Butcher clasifica los flujos de barro en externos e internos (Butcher et al., 2000).

- Externos: aquellos en que el barro es producido en un ambiente externo al ambiente minero subterráneo.
- Internos: aquellos en que el fino que compone el barro se produce por conminución de material arcilloso dentro de la columna de quebrado. También se incluyen las mezclas de fino externo con interno, producto de migración desde el exterior hacia la columna.

2.2.10. Flujos de barro externos

Clasificación	Fuente del barro	Descripción	Esquema
	Relaves o deslames	La deposición de material fino sobre el cráter de subsidencia, junto a una posterior deposición de agua sobre el fino, genera una mezcla que puede descender a través de la columna de quebrado. El barro y el quebrado pueden generar arcos inestables que pueden ser liberados violentamente, ya sea debido a la alta carga de columna sobre ellos, o debido a la extracción de tapones que actúan como contención del barro.	
Externos	Relleno de caserones	Si falla una compuerta de contención de relleno, y además éste es de mala calidad, entonces puede ocurrir una descarga violenta. La falla de la compuerta podría deberse a un mal diseño, mala construcción, relleno inicial con altura de carga demasiado grande para el diseño de la compuerta, y un pobre drenaje de agua.	<p>SEQUENCE OF EVENTS:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Slope fill with different strength layers 2) Lower weaker layer fails due to reduced friction resistance causing slough 3) Strong layer fails, upper fill column moves down and forces out lower fill column 4) Bulkhead fails, airblast and mudrush occur.
	Talud de una mina a cielo abierto	Si falla el talud de una mina a cielo abierto que precedió a una subterránea, entonces puede existir ingreso de barro hacia las labores subterráneas. Si las paredes del rajo están formadas por material arcilloso blando o arcilla esquistosa meteorizada, entonces un incremento en el nivel freático podría causar la falla del talud.	

Tabla 2: Mecanismos propuestos para flujos de barro externos (Butcher et al., 2000).

2.2.11. Flujos de barro internos

En este tipo de flujos el barro se forma internamente durante el flujo de material que está sobre el cuerpo mineral. En este grupo también se incluye a aquellos de origen mixto interno-externo.

Clasificación	Fuente del barro	Descripción	Esquema
	Columna de mineral quebrado y sobre carga de estéril	El material formador de finos puede ingresar lateralmente hacia el cráter de subsidencia. Producto de la extracción, el diluyente ingresa a la columna, generándose así conminución secundaria. El material fino diluyente va rellorando los intersticios entre el quebrado, generando "bolsones de barro". Debido a la extracción, éstos bajan y se observa dilución en los puntos de extracción. Si continúa la extracción, estos bolsones alcanzarán un punto y generarán un flujo de barro.	
Internos	Fino acumulado en el quebrado	Al generarse un gran arco en la columna de extracción, se produciría un vacío en la zona inferior. El arco impediría el flujo normal de mineral. Posterior a esto, ocurriría un colapso del arco, produciendo una rápida compactación en el material inferior al arco. Esta compactación acumularía energía que prontamente haría que el bolsón de barro presente fuera liberado violentamente hacia el punto de extracción.	
	Fino acumulado en el quebrado	Un reducido drenaje del quebrado y del estéril sobre el quebrado, generarían acumulación de agua: se produciría una carga de agua que tendría el potencial de liberarse en forma de bolsones de barro hacia las labores	

Tabla 3: Mecanismos propuestos para flujos de barro internos (Butcher et al., 2000).

2.2.12. Aspectos operacionales y de planificación minera

Debido a razones económicas, casi siempre se prefiere realizar la extracción en zonas en donde existen mayores leyes, lo cual hace que sean sometidas a menores esfuerzos durante la extracción. Las columnas de mineral asociadas presentan entonces una densidad aparente menor, por lo que se produce un flujo preferencial de finos hacia esos sectores. Sin embargo, cuando en esas zonas la extracción es detenida, el estado de esfuerzos cambia. El fino es sometido ahora a esfuerzos de confinamiento, los cuales al ser aplicados a mineral saturado, resultarán en un incremento en la presión de poros del mineral, aumentando el peligro de que el material experimente licuefacción. Algunos estudios indican que cuando el quebrado está en un estado dinámico y el mineral es constantemente extraído, el riesgo de que se genere un estallido de barro es bajo. Lo anterior se debe a que un movimiento continuo del mineral facilita el drenaje y previene que el mineral fino se asiente y cause acumulación de agua (Jakubec et al., 2013).

Otro aspecto importante es la condición de tiraje aislado, la cual puede producirse debido a un mal diseño del espaciamiento de los puntos, o bien a estrategias de control de extracción que no sean lo suficientemente rigurosas en términos de prevenir esta condición (Butcher et al., 2000). El tiraje no-interactivo ocurre generalmente cuando existe pérdida de puntos de extracción; esto puede ocurrir por diversas razones, una de las cuales es el cierre de puntos con alto potencial de generación de bombeos o escurrimientos.

Bajo una condición de tiraje aislado, el principal peligro es la aplicación de altas tasas de extracción a los puntos, pues al ser sobre extraídos pueden actuar como caminos para que bolsones de barro bajen hacia los niveles de producción (Butcher et al., 2000). Estos bolsones pueden formarse a partir del fino que existe sobre el cráter generándose así entrada de dilución, o bien a partir del fino o agua-barro que ya existe en columnas remanentes de niveles antiguos superiores. El cierre de puntos de extracción implica menor área disponible; debido a que deben cumplirse metas productivas, se produce sobre extracción de algunos puntos que están disponibles para compensar aquel tonelaje no extraído de los puntos no disponibles.

Debido a condiciones inherentes a la explotación mediante Block/Panel Caving mecanizado con LHD, se tiene que la mejor aproximación a un flujo gravitacional efectivo para este método es un comportamiento de tiraje aislado-interactivo (Susaeta, 2004), por lo que se debe tener especial cuidado de mantener un flujo lo más similar posible a un flujo interactivo, más que a flujo aislado, en virtud de evitar un ingreso prematuro de agua y finos hacia niveles productivos.

Para lograr un tiraje interactivo, es fundamental realizar un tiraje simultáneo de los puntos, pues es la única forma de extraer el material para minimizar la dilución (Susaeta, 2004). Para medir esta simultaneidad es que algunos autores han definido Índices de Uniformidad, a modo de medir la calidad del tiraje mediante tonelajes o alturas extraídas en cada punto considerando además sus

vecindades. Lo anterior será abordado en mayor detalle en el capítulo “4.9 Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI)”.

Las estrategias de extracción de mineral saturado propuestas en la literatura apuntan a realizar un tiraje continuo y regular en los puntos con peligro de generación de bombeo o escurrimiento de agua-barro (Ross y Van, 2012). Un tiraje continuo del mineral saturado permite el drenaje del mineral cada vez que es extraído, ayudando así a evitar la formación de bolsones de barro en la columna de extracción (Ferrada, 2011). Por otro lado, un tiraje regular asegura que la columna de mineral se mantenga en movimiento y no se consolide (Butcher et al., 2000).

Junto a las estrategias de extracción que se pueden aplicar para mitigar el problema, evitar o reducir el agua que ingresa a las columnas de mineral quebrado implica reducir la generación de barro. Por lo tanto, es de suma importancia contar con buenas estrategias que permitan evitar el ingreso de agua hacia los niveles productivos, o bien drenar la pila de mineral quebrado cuando el agua ya ha ingresado a ésta. Para evitar o reducir el ingreso de agua a través del cráter de subsidencia, una opción es el uso de trincheras de drenaje, como en el caso de la mina Dutoitspan (Holder et al., 2013) o en DOZ de PT Freeport Indonesia (Syaifullah et al., 2006), o bien el uso de galerías de drenaje, especialmente construidas para despresurizar los cuerpos de agua subterráneos y bajar el nivel freático en la zona en que está ubicada la mina.

2.3. Extracción de mineral saturado en minería de hundimiento

2.3.1. IOZ y DOZ, Grasberg, PT Freeport Indonesia

PT Freeport Indonesia opera un complejo minero de cobre y oro ubicado en la Isla de Nueva Guinea, Indonesia. En la actualidad DOZ (Deep Ore Zone) es la tercera⁴ mina explotada por Panel Caving en el complejo. Su ritmo de producción es de 80 ktpd.

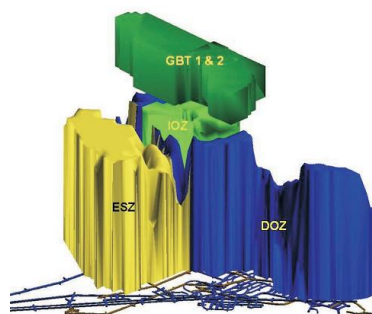


Figura 5: Minas explotadas en el complejo subterráneo de PT Freeport Indonesia (Syaifullah et al., 2006).

⁴ Anteriormente las minas en explotación fueron GBT (Gunung Bijih Timur) e IOZ (Intermediate Ore Zone).

El nivel de producción de DOZ se encuentra 1,200 m bajo una topografía montañosa empinada, y posee alturas de columna de hasta 500 m. Además los niveles productivos están conectados con los niveles antiguos (GBT e IOZ), por lo que el agua que ingresa desde el cráter de subsidencia llega directamente a DOZ. El riesgo de flujos de agua-barro es latente; de hecho, “el incremento de material fino como resultado de aumento en la altura de columna, la existencia de materiales específicos (como Brecha-Mármol), el incremento de agua, y las altas tasas de producción, han significado un aumento del riesgo de escurrimientos de barro húmedo, especialmente en el nivel de producción” (Samosir et al., 2008).

Según estudios realizados en IOZ, la ocurrencia de flujos de barro puede suceder cuando existe más de un 20% de material de tamaño arena (< 2 mm) con un contenido de agua superior a un 8.5 % o más de un 80 % de saturación (Call & Nicholas et al., 1998).

Las principales fuentes de agua con el potencial de fluir hacia DOZ son acuíferos o cuerpos de aguas, aguas superficiales y aguas atrapadas en labores antiguas, como GBT e IOZ (Syaifullah et al., 2006). Éstas actúan como sumideros o trampas de agua, antes de generar la infiltración en DOZ. Además, estructuras geológicas presentes actúan como conductores de agua (zonas de falla, por ejemplo).

La cantidad promedio anual de agua caída es de 5,500 mm, y el área de captación en la superficie topográfica es de alrededor de 3 km². La tasa de percolación de agua a través del quebrado es altísima, llegando incluso a valores de entre 14 días en el año 2,000, a 24 h en el 2,011 (para un recorrido de 1,200 m).

De acuerdo a los 4 factores necesarios para que se desencadene un flujo de barro según Butcher (capítulo 2.2.4), en DOZ se han identificado los siguientes:

- i. Materiales con potencial de formar barro
 - a. Material fino desde su origen (grano fino o material arcilloso)
 - b. Material fino debido a procesos de conminución secundaria
 - c. Material grueso

En la Figura 6 se evidencia el hecho de que los flujos de barro están estrictamente relacionados, casi en la totalidad de los casos, a una gran proporción de material fino, ya sea fino de origen o fino por conminución secundaria. De los 22 escurrimientos, el contenido mínimo de material fino es de un 25%, y el de humedad es un 8%.

- ii. Agua

Para el caso de DOZ, la mínima humedad registrada en eventos de flujo de barro fue un 8%, aun cuando no existiera evidencia de agua ni humedad dentro de la batea asociada al punto en el cual hubo flujo de barro.

Existen 2 aspectos que se mencionan como causantes de que el agua llegue a los puntos:

- Existen fuentes de agua natural, internas y externas.
- Una extracción irregular en los puntos de extracción genera porosidad diferencial de modo que el agua puede aumentar en la columna sobre un punto o sobre una batea.

La extracción irregular puede deberse a condiciones de terreno (colgaduras y consolidación del mineral principalmente debido a materiales arcillosos), restricciones operacionales (reparación de puntos o detenciones en la operación debido a huelgas) o malas prácticas operacionales (poco control de la extracción y objetivos de producción no-realistas).

iii. Perturbación del barro

Para desencadenar un flujo o estallido de barro, se mencionan algunas perturbaciones posibles:

- Vibraciones, tales como tronadura, movimiento de equipos y terremotos.
- Cambios en las condiciones de esfuerzos, como consolidación dentro de una batea, incremento en la presión de poros debido a un aumento de agua en la misma, y la extracción en el punto.

Según la evidencia a través de data histórica en el complejo minero, casi todos los escurrimientos han sido gatillados por perturbaciones del tipo operacional.

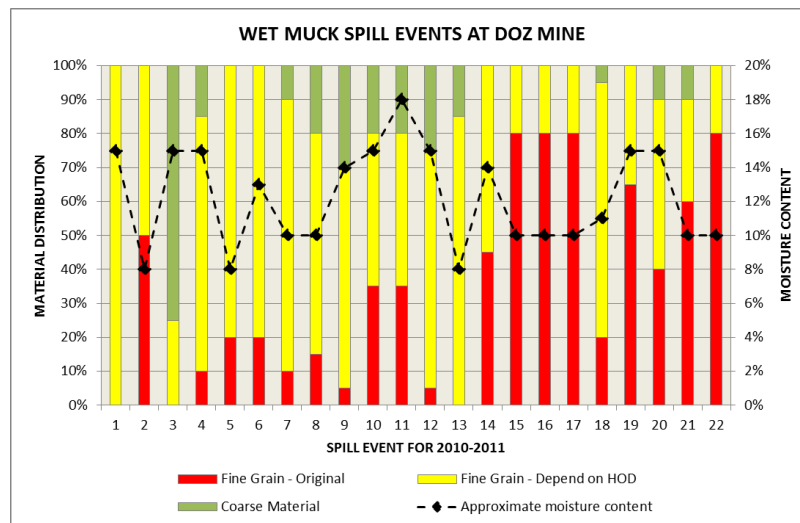


Figura 6: Distribución del material y su contenido de humedad en eventos de flujos de barro en la mina DOZ, PT Freeport, Indonesia (Samosir et al., 2008).

iv. Punto de descarga

Los puntos por los cuales puede haber un flujo de barro son puntos de extracción y chutes. Con el fin de evitar esto en puntos de extracción abandonados, simplemente se procede al cierre parcial o total mediante una pared de concreto, evitando así la perturbación por extracción. Una característica de esta pared es que cuenta con orificios para que el agua pueda drenar.

Con el fin de reducir el riesgo de generación de bombeos y escurrimientos, en PT Freeport se han realizado acciones correctivas y de mitigación basadas en los siguientes ejes:

- Programa de drenaje subterráneo, consistente en galerías de drenaje (Figura 7), cuya función es drenar formaciones saturadas y cuerpos de agua subterráneos, proveer una zona despresurizada en el área que abarca DOZ y reducir el nivel freático en el área mina.

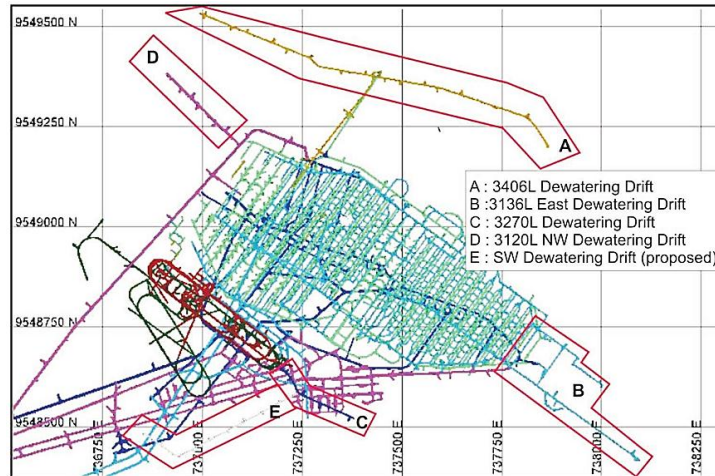


Figura 7: Galerías de drenaje (A, B, C, D y E) en la vecindad de DOZ (Samisir et al., 2008).

- Monitoreo de puntos de extracción mediante inspecciones que miden granulometría y humedad en los puntos. Las mediciones anteriores se ingresan a una matriz de criticidad (ver Tabla 4) que permite determinar qué equipo LHD (manual o tele comandado) puede realizar la extracción en los puntos.

También se han establecido medidas de drenaje y monitoreo de puntos de extracción, tanto para puntos ya en operación como para puntos que se abrirán a futuro. El drenaje se logra evacuando el agua mediante perforaciones hacia algún nivel inferior al nivel de producción. El monitoreo se logra midiendo la presión de agua en las perforaciones de drenaje.

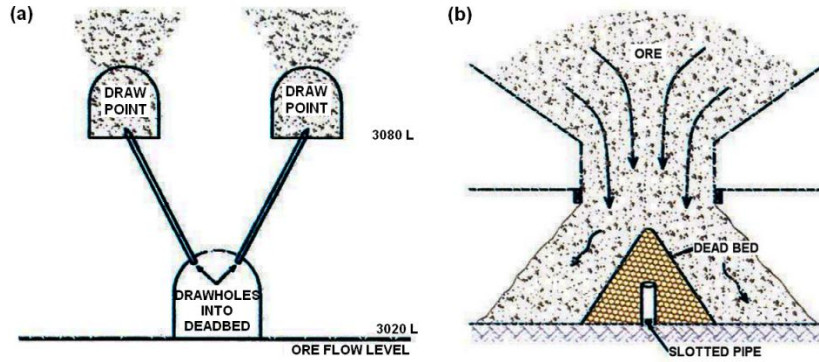


Figura 8: Esquemas conceptuales de drenaje y monitoreo de puntos de extracción en IOZ. (a) Puntos existentes; (b) puntos a futuro.

- Drenaje en el cráter de subsidencia, que se basan en intentar captar la mayor cantidad de agua de precipitaciones para evitar que se infiltren en el quebrado y lleguen a los niveles productivos. Para lo anterior se disponen zanjas de drenaje en el cráter de subsidencia.

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

Tabla 4: Tabla de clasificación de puntos de extracción para operación mediante LHD manual y tele comandado; PT Freeport Indonesia (Widijanto et al., 2011).

- Estrategia de extracción de mineral saturado, que consiste en realizar una extracción regular y continua del mineral con el fin de lograr una redistribución del agua-barro en los puntos para así reducir el agua a lo alto de las columnas de los puntos. Para un polígono con agua-barro, éste es dividido en sectores a los cuales se aplica extracción secuencial: sólo se extrae un sector por turno mientras que los otros son temporalmente cerrados hasta el siguiente turno. La medida ha permitido mejorar el cumplimiento de los planes de extracción para estos puntos, sin experimentar un considerable aumento de puntos con agua-barro.

A continuación se mencionan algunas lecciones aprendidas sobre el comportamiento de barro por parte del personal de PT Freeport Indonesia (Widijanto et al., 2011):

- Se comprobó la hipótesis de Butcher sobre los 4 factores necesarios para un flujo de barro.
- Las áreas críticas en donde se desencadena un evento son nivel de producción y nivel de transporte.
- El volumen de material derramado es inferior al de una batea; esto se corroboró tanto en las bateas de IOZ (3,650 m³) como en las de DOZ (6,500 m³).
- Para DOZ, la distancia máxima de escurrimiento del barro es de 4 puntos de extracción en ambas direcciones. El escurrimiento es función de las características y composición del material, su volumen, volumen de la batea, porcentaje de agua y distribución, y energía potencial o carga dentro de la columna de extracción.
- El contenido de agua a mantener en las bateas debe ser inferior a un 8.5%, lo cual se puede lograr extrayendo entre 0.35 a 0.60 m de columna por día, o equivalentemente, aplicando una velocidad efectiva⁵ de entre 0.91 y 1.56 tpd/m².
- Los problemas de ingreso de agua-barro en IOZ comenzaron una vez ocurrida la conexión del quebrado de ese sector con las labores de GBT (sector antiguo ya explotado). La misma situación ocurrió con DOZ.
- El uso de equipos tele comandados en DOZ permite extraer mineral saturado aumentando así la recuperación de reservas, pero con la desventaja de que se logran menores productividades que una extracción mediante palas operadas manualmente.

2.3.2. División El Teniente, Codelco, Chile

La Mina El Teniente es el yacimiento de cobre subterráneo más grande del planeta, y está ubicado en la cordillera de la VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile. De los 14 sectores en operación al año 2,011, 5 de ellos presentaban problemas de agua-barro: Pipa Norte, Reservas Norte, Esmeralda, 4 Sur y Diablo Regimiento (Becerra, 2011).

Al estar localizada en la Cordillera de los Andes, la principal contribución de agua a la mina es por aporte del deshielo de nieves invernales en la época de primavera (Ferrada, 2011). A esto se suman contribuciones de otras fuentes, como lluvia, cuerpos de agua subterráneos y aguas usadas para fracturamiento hidráulico.

Existen diversas opiniones sobre si el agua-barro proviene desde el exterior o se forma internamente en las columnas de quebrado. La evidencia muestra que los bombeos no necesariamente están asociados a la existencia de agua-barro en el cráter de subsidencia

⁵ Para el cálculo de velocidad efectiva se consideraron: densidad diluida de 2.6 t/m³; área de influencia de 260 m².

(ver Tabla 5). De lo anterior se cree que no es un único mecanismo el que causa un bombeo; el agua-barro puede formarse internamente en la columna de quebrado, o bien externamente; en tercera instancia podría ser una combinación de ambos.

Sector	Fecha	Diferencia de cotas entre superficie y nivel de producción (m)	Extensión de la zona con daños (m)	Observación en superficie	Tipo de barro
Ten 4 Norte Norte	sep-1989	79	200	Laguna de agua y barro	Acuoso
Ten Sub 4 Dacitas	dic-1995	79	210	Laguna de agua y barro	Acuoso
Ten 6 Q. Teniente	oct-1999	98	100	Laguna de agua y barro	Acuoso
Ten 4 Regimiento	oct-2007	439	41	Seco	Pastoso
Ten 6 Q. Andes	may-2008	110	140	Laguna de agua	Acuoso
Ten 6 P. Enlace	may-2009	201	12	Seco	Acuoso
Ten Sub 6 R. Norte	mar-2010	570	90	Seco	Acuoso

Tabla 5: Resumen de las características de bombeos ocurridos entre 1989 y 2010 en El Teniente (Codelco, División El Teniente, 2010).

La forma de abordar el problema del agua-barro en El Teniente toma en consideración aspectos relacionados a la planificación minera, operación y drenaje. Debido al alcance de esta memoria, sólo se detallarán los 2 primeros aspectos de entre los mencionados previamente.

- Selección de reservas (limitación de alturas extraíbles): en el pasado, al detectarse la aparición de agua-barro en algunos sectores, una no despreciable cantidad de puntos fueron cerrados a una altura extraída menor que la altura extraíble inicial. Esto produjo una merma en la recuperación de reservas extraíbles. Actualmente estos puntos con barro no son incluidos en los planes de mediano-largo plazo (Codelco, División El Teniente, 2013). Además, se consideran alturas extraíbles no más allá de cierto “techo extraíble”, definido para cada sector de El Teniente que presente potencial de ingreso de agua-barro (Tabla 6). Por ejemplo, para el caso de Diablo Regimiento, se considera como máximo 250 m de altura extraíble, aun cuando muchos puntos de este sector tienen un potencial económico mayor.

Para definir estas alturas extraíbles, se han determinado las zonas de los sectores de El Teniente que tienen un potencial de ingreso de agua-barro (Figura 9). Dicho análisis ha tomado en cuenta principalmente la evolución de la morfología de la cavidad del cráter, además de un análisis histórico de aparición de agua-barro en sectores antiguos superiores ya explotados (Codelco, División El Teniente, 2013).

Agrupación	Sector	Límite Altura Máxima Puntos Futuros
Rajo	Rajo Sur	
Subterránea Sobre Tte 8	TTE 4 Sur	404
	Pipa Norte	306
	Pipa Norte Hw	233
	Esmeralda Central Fw	270
	Esmeralda Panel1	589
	Esmeralda Sur	250
	Reservas Norte (Panel)	400
	Reservas Norte (Inv+And)	300
	Reservas Norte (Corbata)	400
	Diablo Regimiento	250
	Pilar Norte	400
	New Det	200
	Dacita	400
	Ext. Norte Sur Andes Pipa	173
Ext. Fw Pipa Norte	213	
Pacifico Superior	400	
Nuevo Nivel Mina	Nuevo Nivel Mina	HIS+100m
Nivel Profundo	Nivel Profundo	400

Tabla 6: Valores considerados para la limitación de altura extraíble por efecto de agua-barro (Codelco, División El Teniente, 2013).

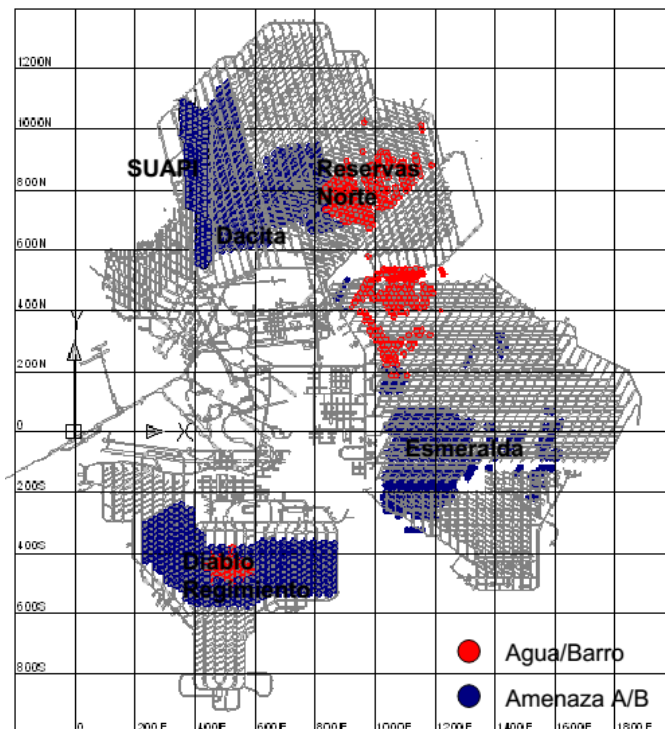


Figura 9: Sectores identificados con potencial de ingreso de agua-barro en El Teniente (Codelco, División El Teniente, 2013).

- Estrategias de extracción: Una de las estrategias seguidas hace un tiempo en Reservas Norte con el fin de controlar eventos de bombeo y escurrimientos, es mediante la tasa de extracción aplicada a los puntos. Cuando se detectan problemas asociados a presencia barro en la operación, la extracción se limita a 1 ó 2 paladas por turno por punto (estado Barro/Agua). En el área circundante al área crítica, se restringe la extracción a razón de 3 a 6 paladas por turno por punto (estado Limitado), o equivalentemente, a una velocidad efectiva⁶ entre 0.33 y 0.66 tpd/m². La medida apunta a realizar un tiraje lento y parejo de las zonas más críticas, demarcando un polígono de extracción limitada (Figura 10), con el fin de drenar el agua cada vez que se realiza extracción, evitando así la formación de bolsones de barro (Ferrada, 2011).

En el caso del sector Diablo Regimiento, actualmente se hace uso de 3 estados para hacer frente al problema del agua-barro: Barrera, Limitado y Barro/Agua (Tabla 7). Los puntos Barrera son aquellos que no necesariamente poseen contenidos críticos de humedad y granulometría, pero de todas formas se cierran para evitar migración lateral de mineral húmedo. Los puntos en estado Limitado rodean a los puntos en estado Barro/Agua y son extraídos a menor tasa (4 baldadas por turno).

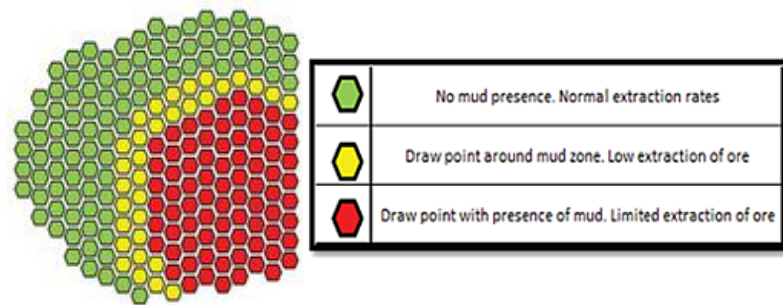


Figura 10: Estrategia de extracción usada en RENO, El Teniente, de acuerdo a la presencia de barro (Ferrada, 2011).

Los puntos de extracción con el más alto peligro de bombear son declarados como estado Barro/Agua y son cerrados. Se ha demostrado en algunos casos que esto resulta ser perjudicial: causa serios daños a la infraestructura, como bateas y paredes del punto de extracción, además de un deterioro acelerado de los refuerzos y pilares. Además, al cerrar un punto ocurre compactación, de modo que la reapertura de un punto se torna en un proceso ineficiente que incluso obliga a la utilización de explosivos durante mucho tiempo con el fin de lograr que el material pueda fluir para una extracción exitosa (Barrera, 2013). Además, existe el consiguiente

⁶ Para el cálculo de velocidad efectiva se consideraron: capacidad de balde de 7 yd³; densidad diluida de 2.6 t/m³; área de influencia de 260 m² por punto.

riesgo de que existan bolsones de barro que puedan desencadenar un bombeo una vez que se intente reabrir un punto (Vargas, 2013).

Estado	Definición
Limitado	Punto con extracción restringida a un tonelaje máximo para un período determinado de tiempo (velocidad controlada).
Reabierto Extracción Tele Comandada	Punto en que se aplica extracción mediante equipos LHD tele comandados.
Barrera	Punto que controla el ingreso de la dilución lateral ó barro de puntos adyacentes; no se extrae.
Barro/Agua	Punto que debido a la penetración del agua presentan riesgo de bombeo y/o escurrimiento; no se extrae.

Tabla 7: Estados de puntos de extracción asociados al agua-barro. Las definiciones son aquellas usadas por Control Producción Mina (CPM)⁷.

- Control de producción: para determinar el riesgo de bombeo de los puntos de extracción, División El Teniente tomó la experiencia adquirida en las minas subterráneas de Grasberg, Indonesia. De esta forma, se creó una matriz de criticidad propia para la División (Tabla 8), cuyos parámetros de entrada son granulometría (% de mineral en los puntos que está bajo 25 cm) y humedad, ya sea categórica midiéndose por inspección en los puntos, o bien mediante mediciones en laboratorio de muestras del punto. De este modo, cuando un operador o supervisor detecta un punto crítico mediante inspección visual, da aviso y se mide humedad en el punto (Becerra, 2011).

Contenido de humedad	Tamaño de grano (G) ≤ 25 cm		
	G < 30% (dominado por granulometría gruesa)	30% ≤ G < 70%	G ≥ 70% (dominado por granulometría fina)
<4%			
4%-7%			
7% - 10%			
≥ 10%			

	Condición normal
	En observación
	Riesgo crítico

Tabla 8: Matriz de criticidad usada en El Teniente para control de agua barro (Becerra, 2011).

⁷ El detalle completo de todos los estados de puntos de extracción, se puede ver en el ANEXO J, página 162.

Las categorías de humedad medidas mediante inspecciones son las que se muestran en la Tabla 9 (Codelco, División El Teniente, 2010). La segunda columna corresponde a las categorías posibles de medir en un punto de extracción, mientras que la tercera es la humedad equivalente a una medición realizada en laboratorio.

Condición de humedad	Humedad categórica	Humedad de laboratorio equivalente
Seco	0	Menor a 4%
Baja humedad	1	
Humedad	2	Entre 4 y 7%
Barro de baja humedad	3	Entre 7 y 10%
Barro de baja humedad	4	Mayor a 10%
Mineral grueso y escurriendo agua	A	-

Tabla 9: Categorías de humedad medidas en terreno mediante inspecciones a los puntos de extracción (Codelco, División El Teniente, 2010).

Al igual que las mediciones de humedad, la granulometría de cada punto es medida en terreno, determinando mediante observación visual qué porcentaje del mineral visible en un punto se encuentra en distintos rangos de tamaño:

Rango de tamaño
- 5 cm
+ 5 cm y - 25 cm
+ 25 y - 50 cm
+ 50 y - 100 cm
+ 100 cm

Tabla 10: Rangos de tamaños medidos en los puntos de extracción mediante inspección visual (Codelco, División El Teniente, 2010).

2.4. Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI)

La aplicación de un índice de uniformidad permite cuantificar qué tan simultáneo o parejo ha sido el tiraje en un sector estudiado. Lo anterior puede realizarse con distintos objetivos, pero principalmente apuntando a determinar cómo ha sido el ingreso de dilución a un sector. Sin embargo, en esta memoria el objetivo de la aplicación del índice de uniformidad es determinar si un tiraje uniforme o desuniforme tiene incidencia en el ingreso de agua-barro al sector analizado.

De los autores A. Susaeta y J. Saavedra (Susaeta, 2004), éste índice es una versión mejorada de su predecesor denominado Índice de uniformidad normalizado (NUI).

El VUI se calcula como se muestra a continuación:

$$VUI = \Delta + \Gamma \cdot \frac{(t_p - t_{min})}{t_{max}^2 \cdot n} \cdot \sum (t_{max} - t_i)$$

Ecuación 1: Expresión para cálculo de Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI).

Dónde:

- Δ : Número de puntos inactivos en la vecindad del punto.
- Γ : Factor de normalización, equivalente a 99/89.
- t_p : Tonelaje extraído en el punto p en estudio, en un periodo determinado.
- t_i : Tonelaje extraído en el punto i perteneciente a la vecindad del punto p, en el mismo periodo.
- t_{max} : Tonelaje máximo extraído en la vecindad del punto p, en el mismo periodo.
- t_{min} : Tonelaje mínimo extraído en la vecindad del punto p, en el mismo periodo.
- n : Número de puntos pertenecientes a la vecindad del punto p.

Se considera como vecindad de un punto en estudio, al punto mismo junto a sus aledaños dentro de cierto radio.

La expresión anterior también puede escribirse como:

$$VUI = \Delta + IEU$$

Ecuación 2: Forma equivalente a la expresión para cálculo de Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI).

Entonces las 2 partes que componen la Ecuación 1 vienen siendo:

- Δ : Cantidad de puntos inactivos en la vecindad en el periodo considerado.
- IEU : Número decimal entre 0 y 1, que indica la uniformidad en el tiraje de los puntos activos.

Característica del tiraje	Índice específico de uniformidad
Completamente uniforme	0
Completamente desuniforme	1

Tabla 11: Valores extremos que puede tomar el IEU.

Dada la naturaleza vectorial del VUI, el valor que puede tomar está determinado por categorías definidas por una matriz o tabla de doble entrada:

		Índice específico de uniformidad (IEU)				
		0 - 0.2	0.2 - 0.4	0.4 - 0.6	0.6 - 0.8	0.8 - 1
Número de puntos inactivos (Δ)	0	U	U	U	SU	SU
	1	U	U	SU	SU	SU
	2	U	SU	SU	SU	DU
	3	SU	SU	SU	DU	DU
	4	SU	SU	DU	DU	DU
	5	DU	DU	DU	DU	DU
	6	DU	DU	DU	DU	DU

Tabla 12: Matriz categórica del VUI (U: uniforme; SU: semiuniforme; DU: desuniforme).

Es importante destacar, que la definición de esta matriz depende de la configuración de vecinos que tenga un punto de extracción; es decir, para puntos con distintas cantidades de vecinos, deben usarse matrices distintas.

2.5. Conclusiones del capítulo “ANTECEDENTES TEÓRICOS”

De acuerdo a los antecedentes teóricos del fenómeno expuestos en el presente capítulo, se concluyeron los siguientes puntos:

- Si bien existen publicaciones que abordan el problema de bombeos y escurrimientos de agua-barro en minería de hundimiento, sería muy útil contar con un estudio acabado sobre los mecanismos y fuerzas presentes que actúan y que permiten que el fenómeno se desencadene. Los análisis realizados hasta la fecha aún son de carácter descriptivo y con un fin preventivo, más que con un fin de mayor carácter científico que pueda mejorar la comprensión del fenómeno. Por lo tanto:
 - Existe incertidumbre acerca de las condiciones bajo las que el mineral saturado tiene potencial de fluir, en términos de granulometría, humedad y de esfuerzos aplicados. Las guías operacionales existentes son una excelente ayuda tanto para operación como planificación minera, pero no se tiene certeza si granulometría y humedad son los únicos parámetros que deben tomarse en cuenta al definir el riesgo de bombeo de un punto de extracción.
 - Los mecanismos propuestos mediante los cuales se genera un bombeo o escurrimiento aún no han sido validados; son ideas que requieren verificación de acuerdo al método científico.
 - Sería de gran utilidad establecer si existe relación entre las alturas de columna de quebrado y la generación de agua-barro en términos de aporte de finos por conminución secundaria.

- Se requiere cuantificar el impacto de la extracción en el aumento de porosidad a lo alto de las columnas de extracción, y su relación en la generación de direcciones preferenciales de flujo de agua-barro hacia niveles productivos.
- Las sugerencias hechas por distintos autores para abordar el problema, se pueden resumir en:
 - Contar con un buen sistema de drenaje que impida o mitigue el ingreso de agua hacia el quebrado y hacia las labores productivas.
 - Realizar una correcta planificación de la extracción, en términos de programar un tiraje parejo y regular de los puntos de extracción.
 - Realizar una operación disciplinada que permita cumplir el punto anterior; en particular, evitar una sobre extracción de puntos. Es indispensable que exista un tiraje interactivo de los puntos.
 - Contar con buenas medidas de control de la operación; realizar continuas inspecciones de los puntos con presencia de humedad.

Sin embargo, los estudios realizados a la fecha no han abordado completamente las sugerencias realizadas; principalmente aquellas que se relacionan con la planificación y la operación minera. Varios autores mencionan el realizar un tiraje continuo y regular, así como evitar sobre extracción de puntos, pero aún falta realizar análisis sobre la extracción histórica de alguna mina con presencia de agua-barro, en términos de cálculos de índices de uniformidad, de perfiles de alturas extraídas ni de velocidades de extracción.

- Varios autores mencionan la pérdida de reservas mineras como consecuencia del ingreso de agua-barro a columnas de mineral, pero no existe ninguna cuantificación aplicada a alguna mina sobre cuánto es el remanente no extraído debido al agua-barro; es decir, no se tiene ninguna cuantificación del potencial negocio que significaría crear una tecnología que permita recuperar reservas no extraídas de mineral saturado, de forma productiva y a bajo costo.
- La experiencia adquirida por PT Freeport con IOZ y DOZ, y la adquirida por Codelco con El Teniente, es de vital importancia para el estudio del fenómeno. Dado que a lo largo de los años la tendencia es explotar niveles cada vez más profundos, y que a mayor profundidad se sabe que el problema del agua-barro toma gran importancia, es de suma relevancia que el fenómeno sea estudiado en diversos ejes: comprensión del fenómeno a nivel geotécnico, de planificación minera, operacional, hidrogeológico, entre otros. El fin de la investigación no debe perder su motivación principal, la cual es proteger la integridad de las personas agregando valor al negocio minero.

3. CUANTIFICACIÓN DEL MINERAL SATURADO REMANENTE

3.1. Introducción

Una de las interrogantes a responder en este estudio, es conocer cuánto es el mineral saturado remanente no extraído, en términos de tonelaje y ley media. Además, interesa conocer a qué leyes fueron cerrados los puntos en estado Barro/Agua. Todo lo anterior con el fin de justificar la extracción de dicho mineral saturado en algún momento.

Respecto a la cuantificación del mineral saturado remanente, se consideraron 2 casos: remanente actual, y remanente a futuro:

- i. Mineral saturado remanente no extraído en puntos afectados⁸ por agua-barro.
- ii. Mineral saturado potencialmente extraíble una vez que puntos secos (operativos o no abiertos aún) sean afectados por agua-barro.

El segundo ítem corresponde a aquel quebrado que quedará sin extraer una vez que el agua-barro ingrese a la zona que está bajo niveles antiguos. Para tal cuantificación se asumieron criterios de ingreso de agua-barro que se explicarán más adelante.

3.2. Reservas extraíbles en sector Diablo Regimiento

La base de datos “Mina Reserva Banco” con que se trabajó, consideraba la extracción 125.4 Mt como reservas, con ley media de 0.85% CuT. Dichas reservas tenían incorporado el criterio de “techos máximos extraíbles” para zonas con alto potencial de ingreso de agua-barro.

Tonelaje extraíble (Mt)	125.4
Finos extraíbles CuT (Mt)	1.06
Ley media (%CuT)	0.85%

Tabla 13: Reservas extraíbles en sector DR, previas al inicio de su explotación.

⁸ Se consideraron como afectados por agua-barro a aquellos puntos en estados Barro/Agua, Limitado y Barrera.

En términos de fases, la situación era la siguiente:

Fase	Tonelaje extraíble (Mt)	Fino extraíble (t)	Ley media (%CuT)
1	25.7	0.22	0.85%
2	26.6	0.23	0.87%
3	23.4	0.18	0.78%
4	30.3	0.27	0.89%
5	19.5	0.16	0.81%
Total	125.4	1.06	0.85%

Tabla 14: Reservas extraíbles por fase en sector DR, previo al inicio de su explotación.

En la Figura 11 se muestran las reservas en términos de alturas extraíbles. Se observan 3 zonas mayoritariamente en color verde: centro, este y noroeste, las cuales consideran extracción de alturas de entre 210 y 260 m.

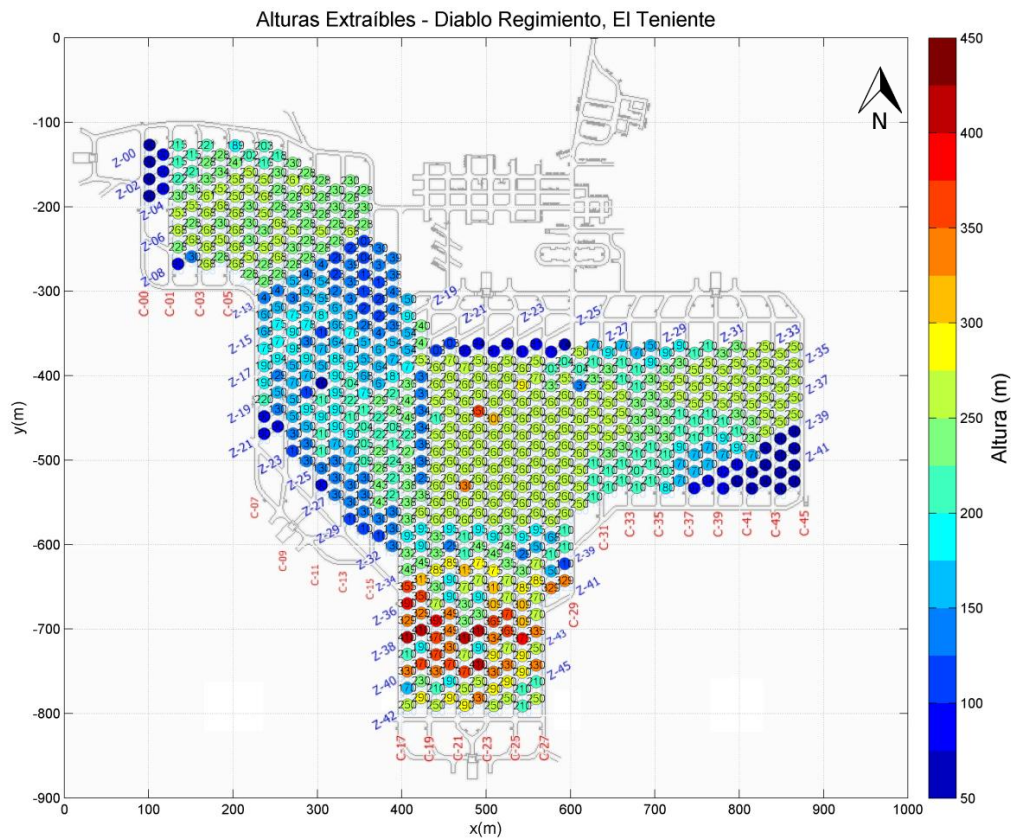


Figura 11: Alturas extraíbles en sector DR.

De acuerdo al histograma mostrado en la Figura 12, se observa que un 40% de los puntos considera una altura extraíble cercana a los 250 m.

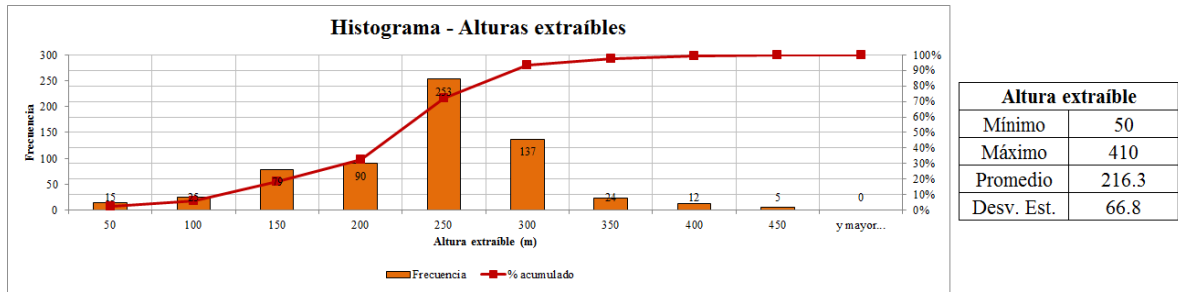


Figura 12: Histograma de alturas extraíbles en sector DR previas al inicio de su explotación.

3.3. Leyes del barro

Un aspecto importante a tener en cuenta respecto al potencial económico del mineral saturado remanente no extraído en puntos cerrados por aparición de agua-barro, es la ley de cierre de puntos, o la ley de la última extracción realizada al punto. La Figura 13 muestra un histograma de estas leyes.

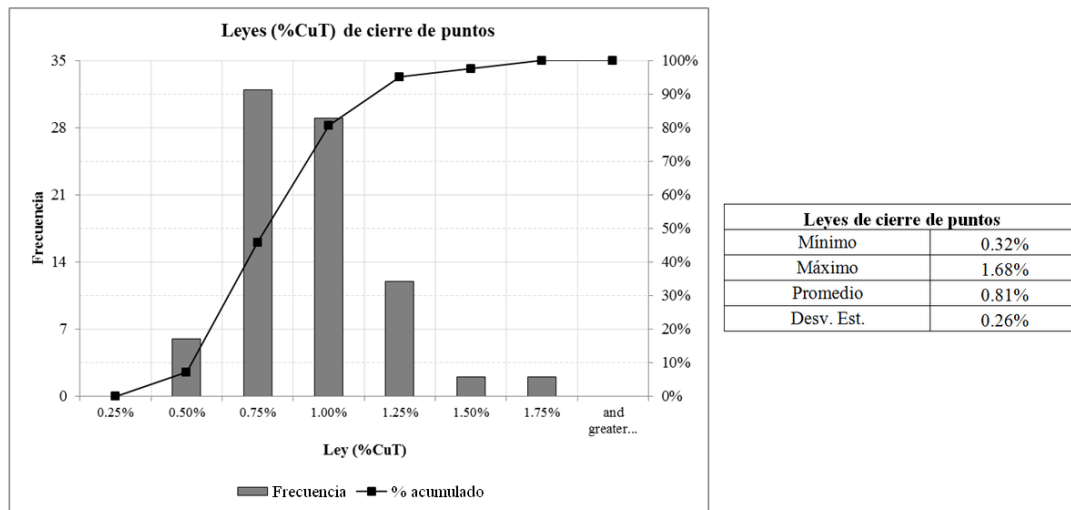


Figura 13: Leyes (%CuT) a las cuales un punto es declarado en estado agua-barro.

Al respecto se observa que sólo un 10% de los puntos fueron cerrados a una ley inferior a 0.50 % CuT.

3.4. Mineral saturado remanente en puntos afectados por agua-barro

La Tabla 15 muestra el desglose de reservas remanentes para los estados⁹ de interés, actualizado al 22 de noviembre de 2013. En términos de puntos de extracción afectados por ingreso de agua-barro ya sea directamente (Barro/Agua) o indirectamente (estados Limitado y Barrera), se tiene que las reservas no extraídas ascienden a 4.4 Mt de mineral, con ley media 0.72% CuT. De este total de reservas no extraídas, 2.4 Mt corresponden a puntos en estado Barro/Agua.

Estado	Mineral (Mt)	Ley media (% CuT)	% respecto al total
Limitado	1.3	0.79%	29.7%
Barrera	0.6	0.70%	14.6%
Barro/Agua	2.4	0.68%	55.7%
Total	4.4	0.72%	100%

Tabla 15: Reservas no extraídas en puntos afectados por ingreso de agua-barro en sector Diablo Regimiento.

Los resultados anteriores se basan en asumir que la altura a la cual pudieron haber sido cerrados los puntos corresponde a aquella “extraíble” definida en el modelo de reservas considerado para este estudio; es decir, no consideran sobre-extracción de los puntos. Sin embargo, según el Plan de Negocios y Desarrollo 2011 (Codelco, División El Teniente, 2010), las máximas alturas extraíbles en zonas con riesgo de ingreso de agua-barro para el sector Diablo Regimiento quedan acotadas por 250 m, independientemente de si la altura económica es superior. Debido a esto, surge la necesidad de cuantificar cuál es el remanente por sobre esos 250 m.

Cuando se determinan alturas extraíbles, en algunos casos se hace uso de algoritmos que optimizan el VAN. Sin embargo, si se evalúan condiciones distintas de costo de oportunidad, se obtienen techos extraíbles más allá que la altura extraíble óptima; esto se debe a que los algoritmos optimizantes retrasan la extracción de recursos que son marginalmente económicos, pues consideran restricciones de capacidad. De esta forma, el uso de alturas marginales puede llevar a un abastecimiento adicional de mineral generando holguras productivas, o también puede ayudar a reducir pérdidas cuando existe desabastecimiento de mineral a planta (Codelco, División El Teniente, 2007).

⁹ El detalle para cada estado posible se encuentra en la Tabla 38, en el apartado ANEXO B.

A continuación se muestran los resultados para el caso en que se consideran como alturas de cierre a las alturas marginales definidas en base a una ley de corte. Las alturas marginales consideradas fueron para leyes de corte de 0.4 y 0.5% CuT, y fueron determinadas usando metodologías propias de la Superintendencia de Planificación Minerometalúrgica de División El Teniente.

- Ley de corte igual a 0.4% CuT:

Estado	Mineral saturado no extraído (Mt)	Ley media (%CuT)	% respecto al total
Limitado	4.1	0.67%	27.3%
Barrera	2.1	0.61%	13.9%
Barro/Agua	8.8	0.60%	58.8%
Total	14.9	0.62%	100%

Tabla 16: Quebrado saturado no extraído en puntos afectados por ingreso de agua-barro, en base a alturas marginales para ley de corte 0.4% CuT.

- Ley de corte igual a 0.5% CuT:

Estado	Mineral saturado no extraído (Mt)	Ley media (%CuT)	% respecto al total
Limitado	3.5	0.70%	30.5%
Barrera	1.7	0.64%	14.8%
Barro/Agua	6.3	0.66%	54.8%
Total	11.4	0.67%	100%

Tabla 17: Quebrado saturado no extraído en puntos afectados por ingreso de agua-barro en base a alturas marginales para ley de corte 0.5% CuT.

3.5. Mineral saturado potencialmente extraíble en puntos no afectados por agua-barro

También es importante cuantificar aquel mineral que quedará remanente en puntos que están ubicados en una zona con potencial ingreso de agua-barro, pero que aún no han sido afectados. Para realizar esta cuantificación, se hizo uso del concepto de alturas marginales explicado anteriormente, y se consideró como zona con alto potencial de ingreso de agua-barro a aquella que se encuentra bajo sectores antiguos suprayacentes (ver Figura 17, capítulo “4.2.1 Sectores

superiores suprayacentes”, página 39). Se excluyeron en este cálculo a aquellos puntos que ya están afectados por agua-barro (fueron cuantificados en el apartado 3.4).

Por lo tanto, los puntos de extracción considerados debieron cumplir simultáneamente las siguientes condiciones:

- i. Altura marginal mayor a 250 m
- ii. No estar en estado Barro/Agua, Limitado o Barrera a la fecha de análisis
- iii. Estar bajo sombra; definido arbitrariamente como altura in situ¹⁰ menor o igual a 230 m

La primera condición considera que los puntos actualmente secos serán extraídos hasta 250 m como máximo. La segunda se debe a que los puntos afectados por agua-barro ya fueron considerados en los cálculos del capítulo 3.4. La tercera condición es aquella que define qué puntos tienen un alto potencial de ingreso de agua-barro, que son justamente aquellos puntos bajo sectores antiguos ya explotados.

En base a lo señalado anteriormente, las reservas potencialmente extraíbles se muestran en la siguiente tabla:

Ley de corte (% CuT)	Mineral saturado potencialmente extraíble (Mt)	Fino (kt)	Ley media (% CuT)
0.4	11.7	59.5	0.51%
0.5	7.4	42.3	0.57%

Tabla 18: Mineral saturado potencialmente extraíble en puntos en zona de riesgo de ingreso de agua-barro.

¹⁰ Criterio basado en la disposición del sector. Para mayor clarificación, observar Figura 17 y Figura 18, pág. 4.

3.6. Resumen: mineral saturado remanente, y mineral saturado potencialmente extraíble

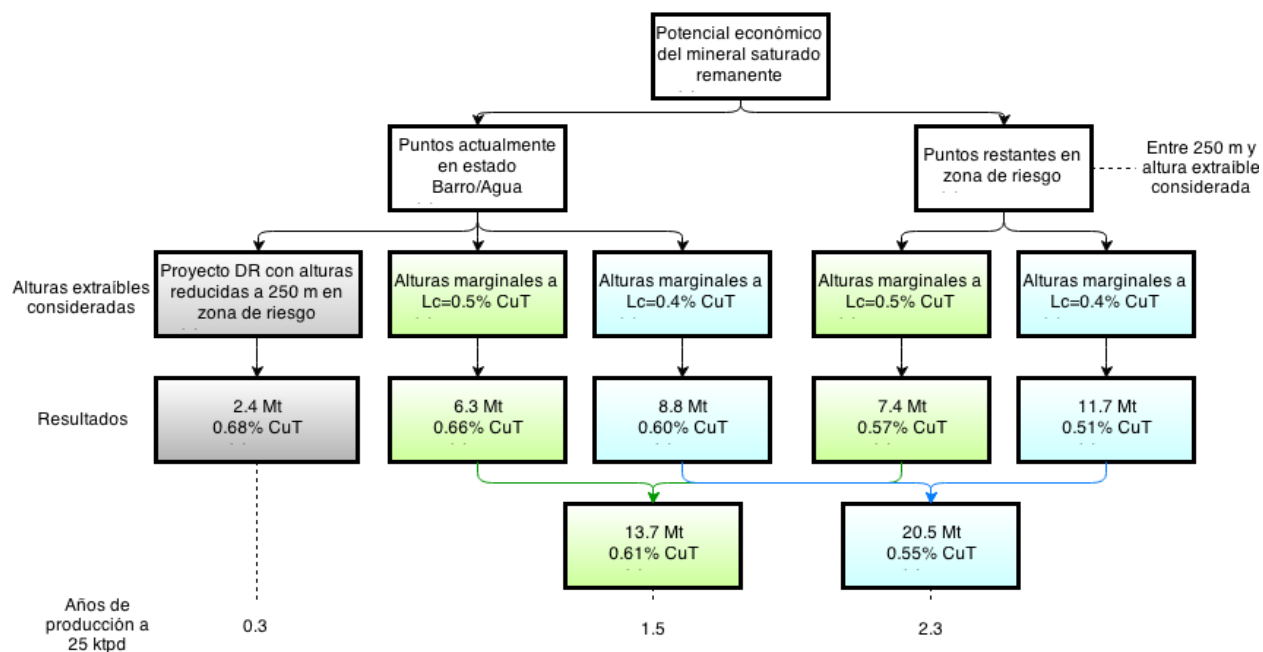


Figura 14: Resumen de la cuantificación del mineral saturado remanente y del potencialmente extraíble.

3.7. Conclusiones del capítulo “CUANTIFICACIÓN DEL MINERAL SATURADO REMANENTE”

Dado que el 90% de los puntos fueron cerrados a una ley mayor o igual a 0.50% CuT, se concluye que existe un remanente de interés económico cuando los puntos son cerrados por ingreso de agua-barro. En particular, el 95% del área cerrada (equivalente a 27,458 m²) corresponde a aparición de agua-barro; el restante 5% es por agotamiento de puntos.

El cerrar puntos por agua-barro implica dejar cantidades interesantes de mineral remanente (2.4 Mt de acuerdo al modelo de reservas utilizado). Por lo tanto, el cierre de puntos implica una reducción en la recuperación de reservas, razón por la cual dichos puntos dejan de incluirse en los planes mineros de mediano y largo plazo.

Considerando el remanente de 2.4 Mt, se observa que tal mineral representa aproximadamente 108 días de producción a un ritmo de 25 ktpd. Aún más atractivos son los casos en que se considera sobre extracción hasta alturas marginales, lo cual no está lejos de una práctica real; en especial si se toma en cuenta el hecho de que ya se tiene un nivel de producción construido. Al

evaluar económicamente un proyecto que implique la extracción de tal mineral, gran parte de la inversión en nivel de producción ya estaría realizada.

Por lo tanto, se concluye que es necesario buscar una solución al problema del mineral remanente, en términos de crear o usar una tecnología que junto a estrategias de planificación y operación, permitan extraerlo.

4. ANÁLISIS DEL INGRESO DE AGUA-BARRO

4.1. Introducción

El cierre de puntos de extracción es una de las medidas para prevenir la ocurrencia de bombeos y escurrimientos. Esto se realiza cuando se detectan contenidos críticos de granulometría y humedad en los puntos (ver Tabla 8, página 24). En otras palabras, previo a la generación de escurrimientos y bombeos, se detecta un ingreso de agua-barro a los puntos en forma de mineral húmedo (Figura 15). Por lo tanto, es de interés estudiar cómo ha ocurrido ese ingreso de agua-barro desde el punto de vista de la planificación y la operación minera. Para estos efectos, se considerará como ingreso de agua-barro a un punto de extracción, a la declaración de estado Barro/Agua del punto.

En el presente capítulo se abordarán primeramente algunos antecedentes sobre el sector Diablo Regimiento, en particular los que se encuentran asociados y son necesarios para una mejor comprensión de la problemática. Posteriormente se realizará un análisis sobre la aparición de agua-barro en el sector: se estudiará la secuencia de aparición, a qué altura apareció, y como fueron las estrategias de tiraje en términos de evolución de perfiles de alturas extraídas en el tiempo. Finalmente se mostrará la uniformidad del tiraje en el sector mediante el cálculo de índices de uniformidad.

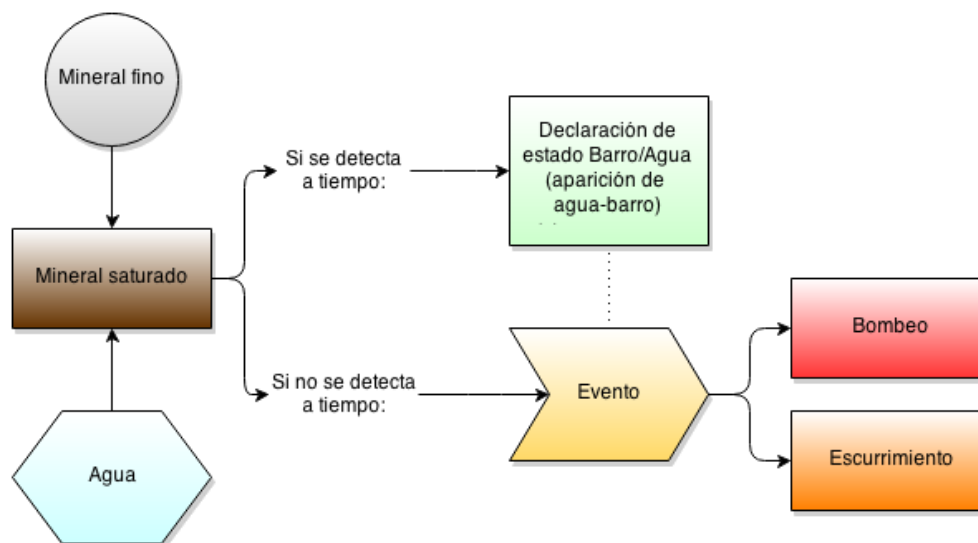


Figura 15: Mapa conceptual sobre problemática de bombeos y detección de aparición de agua-barro.

4.2. Antecedentes generales sobre Diablo Regimiento

El sector Diablo Regimiento es uno de los 15 sectores¹¹ que actualmente están en operación en la Mina El Teniente (Codelco, División El Teniente, 2013), y está ubicado en el extremo sur del yacimiento. Se compone de 5 fases, 3 de las cuales están actualmente en producción (ver Figura 16). Se explota mediante Panel Caving con Hundimiento Avanzado. Para el año 2014 se ha comprometido un ritmo de producción de 28,448 tpd, alcanzando un máximo de 28,833 tpd en 2015, para posteriormente decrecer hasta agotar las reservas del sector en el 2022 a 4,000 tpd (Codelco, División El Teniente, 2013).

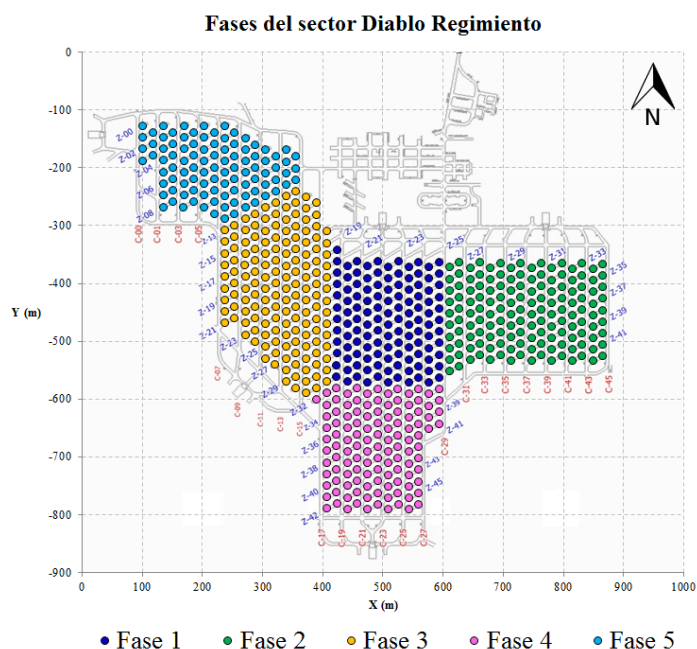


Figura 16: Fases del sector Diablo Regimiento.

4.2.1. Sectores superiores suprayacentes

Diablo Regimiento se encuentra bajo 3 sectores ya explotados, los cuales son: Regimiento, Puente y Fortuna (ver Figura 17). En particular, Regimiento fue cerrado con una considerable cantidad de puntos en estado Barro/Agua.

¹¹ Los sectores en operación son: Rajo Sur, TTE 4 Sur, FC Sub 4, Pipa Norte, Pipa Norte Este, Esmeralda Central Este, Esmeralda Panel 1, Esmeralda Sur, Panel RENO, Reservas Norte Inv+And, Reservas Norte Corbata, Diablo Regimiento, Pilar Norte, Dacita y Suapi Norte (Codelco, División El Teniente 2013).

Sector	Cota base (msnm)	Altura sobre DR (m)
Regimiento	2,376	166
Puente	2,369	159
Fortuna	2,368	158
<i>Diablo Regimiento</i>	2,210	0

Tabla 19: Cotas base de Diablo Regimiento y sectores antiguos suprayacentes.

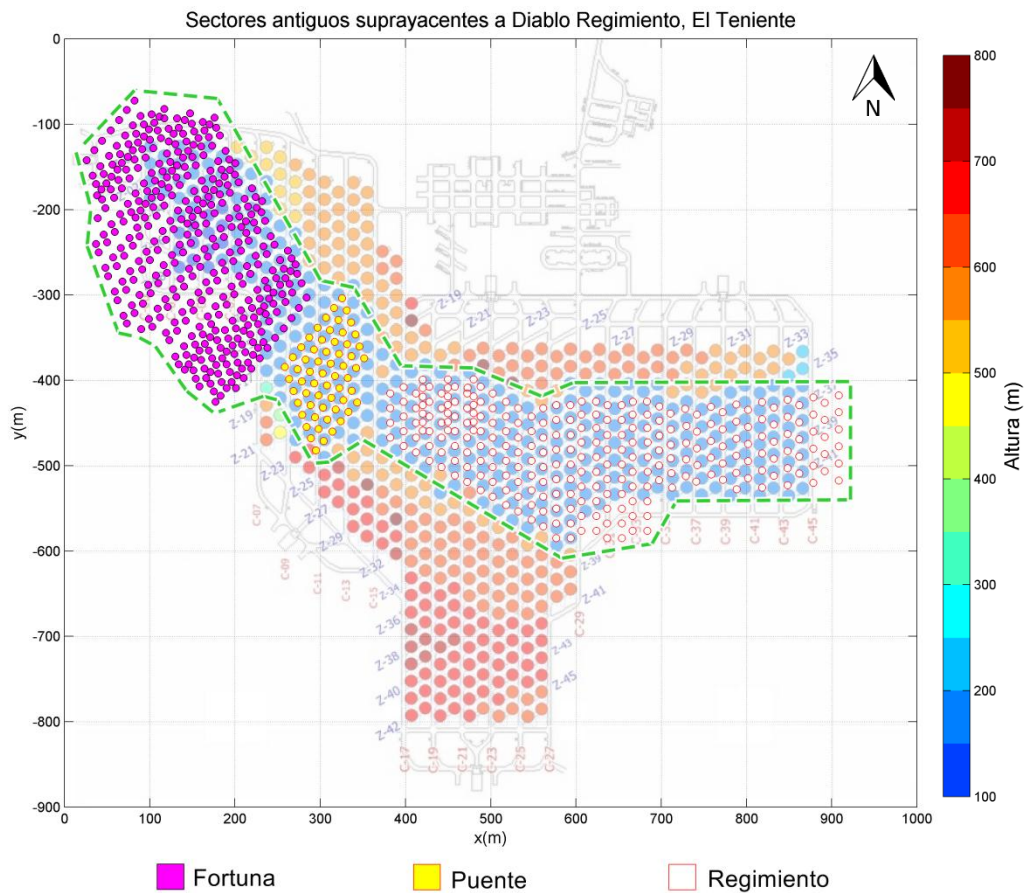


Figura 17: Sectores antiguos suprayacentes a Diablo Regimiento. Vista en planta.

4.2.2. Alturas in situ

La condición de estar bajo sectores antiguos, implica la existencia de un “canalón” que contiene quebrado remanente sobre los niveles antiguos. La base de dicho canalón corresponde a los

techos de columnas in situ que se muestran en color azul en la Figura 17. Dichas columnas son de 160 m de altura aproximadamente.

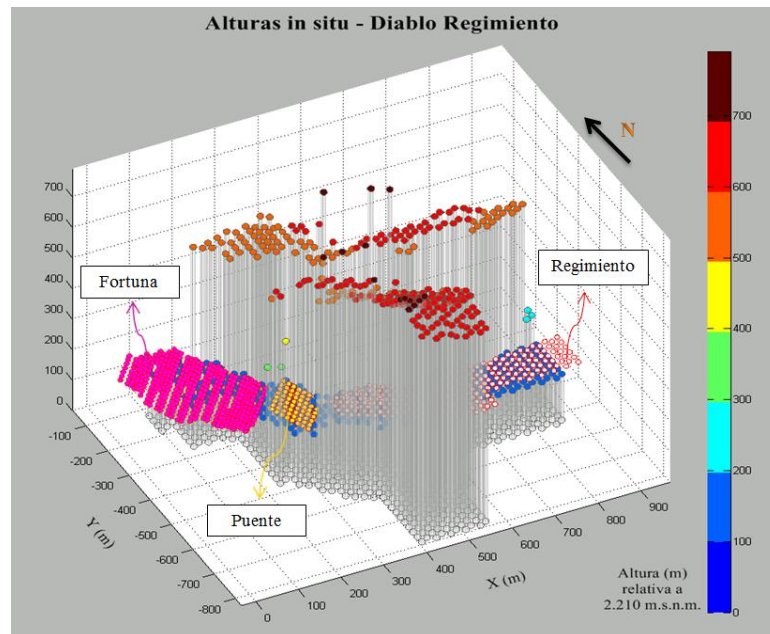


Figura 18: Alturas in situ en sector Diablo Regimiento, previo al inicio de explotación. Vista en perspectiva.

4.2.3. Topografía

La topografía es una de las variables más importantes en el ingreso de agua-barro a un sector productivo. La forma que posee la topografía determinará zonas preferenciales para acumulación de precipitaciones.

En el caso del sector Diablo Regimiento, la explotación de niveles antiguos condicionó la topografía de manera que los puntos que hoy están cerrados por agua-barro son justamente aquellos que están bajo un canalón topográfico (ver Figura 19).

4.3. Situación actual de Diablo Regimiento

La situación de estados de puntos de extracción a noviembre de 2013 se muestra en la Figura 20. El área total cerrada por estado Barro/Agua era de 27,458 m², dividida en 2 polígonos centrados en Fase 1 y Fase 2, de 22,098 m² y 5,360 m² respectivamente.

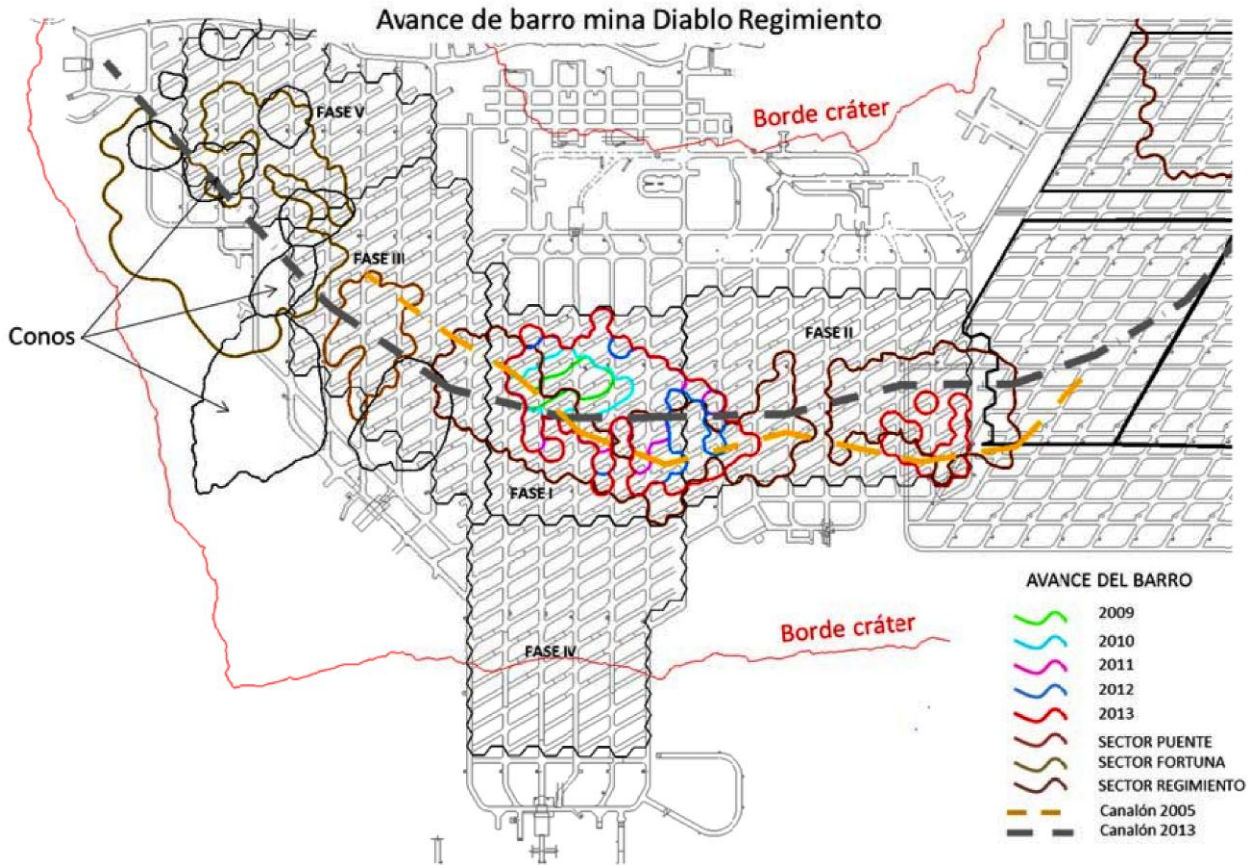


Figura 19: Avance del barro en Diablo Regimiento, y proyección del canalón (Codelco, División El Teniente, 2014).

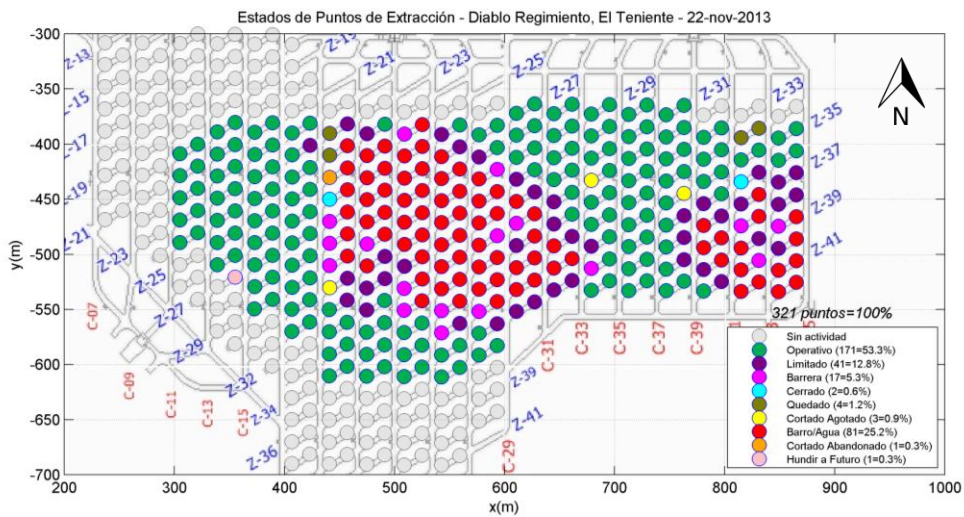


Figura 20: Estados de puntos de extracción para el sector Diablo Regimiento, al día 22 de noviembre de 2013.

Del total de área disponible, un 19% estaba con extracción limitada debido a la estrategia de extracción usada en Diablo Regimiento como control de avance del barro. Respecto al área abierta, un 25% estaba en estados Limitado y Barrera. En cuanto al total de área cerrada, se observó que el 95% había sido cerrado por ingreso de agua-barro.

Área		Estado	# PE	Área (m ²)	
Abierta	Disponible	Colgado	0	0	72,058
		Operativo	171	58,136	
		Reabierto	0	0	
		Limitado	41	13,922	
		Reabierto; extracción tele com.	0	0	
	No disponible	Barrera	17	5,787	7,827
		Cerrado	2	680	
		Razones operacionales	0	0	
		Reparación	0	0	
		Quedado	4	1,360	
Cerrada	Cortado agotado	3	1,021	28,819	
	Barro/Agua	81	27,458		
	Cortado por abandono	1	340		
	Hundido	0	0		
Futura	Hundir a futuro	1	341	341	
	Vacío	0	0		
Sin estado			319	108,683	
TOTAL SECTOR DR			640	217,728	

Tabla 20: Desglose de número de puntos de extracción (# PE) y áreas, para cada estado posible de puntos.

Área en estado Limitado	13,922	m ²
Respecto a área disponible	19%	-
Área en estado Limitado y Barrera	19,709	m ²
Respecto a área abierta	25%	-
Área en estado Barro/Agua	27,458	m ²
Respecto a área cerrada	95%	-
Área en estados Limitado, Barrera y Barro/Agua	47,167	m²

Tabla 21: Áreas en estados Limitado, Barrera y Barro/Agua.

4.4. Evolución de cantidad de puntos de extracción en estados Barro/Agua, Limitado, Extracción Tele Comandada y Barrera

En la Figura 21 se observa la evolución temporal de cantidad de puntos en estados asociados al agua-barro. En ésta se evidencia que el total de puntos afectados¹² es al alza (curva naranja), debido principalmente a la cantidad de puntos en estado Barro/Agua y Limitado. Además, se observó que el inicio del uso de estados Limitados y Extracción Tele Comandada coincide con disminuciones de puntos en estado Barro/Agua debido a que justamente en el inicio del uso de estas estrategias, se pasaron puntos de estado Barro/Agua a los otros estados mencionados.

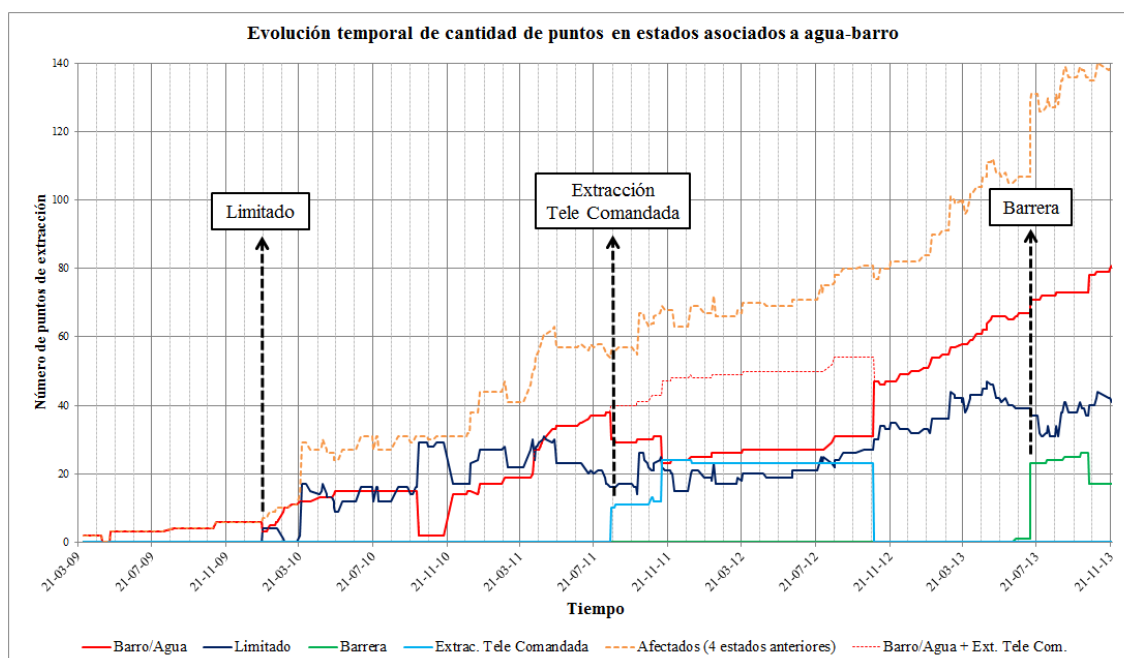


Figura 21: Evolución temporal de cantidad de puntos en estados asociados a agua-barro.

4.4.1. Extracción con equipos tele comandados

Respecto al periodo en que se realiza extracción tele comandada, en la figura anterior se observa que la cantidad de puntos con potencial de bombeo aumenta a menor tasa con respecto al periodo posterior en que se detiene la extracción mediante equipos tele comandados.

¹² Se consideran como puntos afectados a aquellos en los estados Barro/Agua, Limitado, Barrera y Ext. Tele Comandada.

Desplegando el número de puntos en estado Barro/Agua durante y después del periodo de extracción tele comandada (Figura 22), se determinó que en el periodo posterior la tasa de aumento de puntos en estado Barro/Agua fue mayor. En otras palabras, se concluye que el uso de equipos tele comandados implica un menor movimiento lateral del agua-barro hacia otros puntos. Esta idea es lógica, pues al realizar extracción tele comandada, el mineral saturado se mueve hacia abajo y no lateralmente. Al extraerlo, se drenan las columnas de puntos afectados y se reduce el impacto del problema.

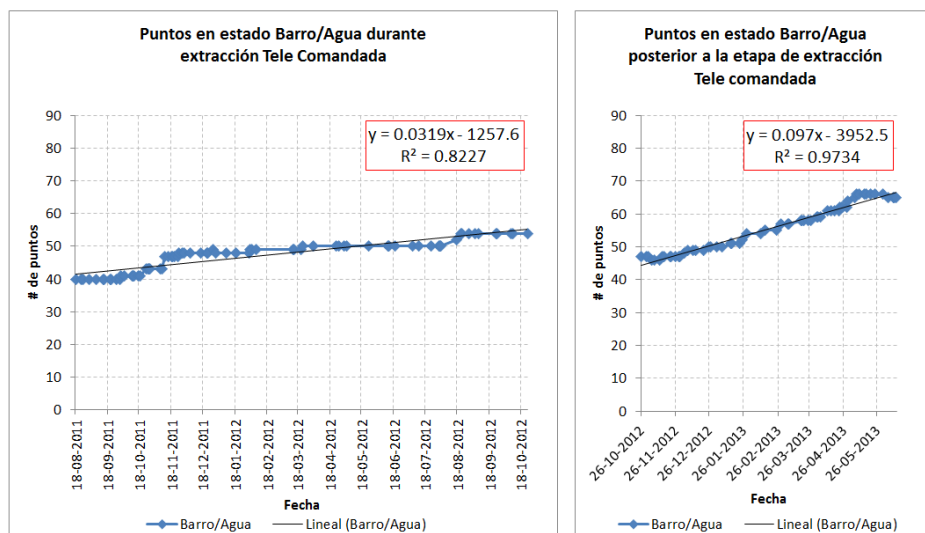


Figura 22: Comparación entre número de puntos en estado Barro/Agua, durante¹³ y después de realizar extracción Tele Comandada.

4.5. Secuencia de aparición de agua-barro

A la fecha de análisis¹⁴, existieron 83 puntos de extracción en estado Barro/Agua, los cuales se distribuyen en 67 puntos en la Fase 1, y 16 en la Fase 2.

A continuación, la Figura 23 muestra una secuencia anual de aparición de barro. Se observó que el ingreso de agua-barro inicia el año 2009 en la calle 23, apareciendo además en las calles 19, 21 y 25 (color azul). Posteriormente el agua-barro fue apareciendo en los puntos circundantes a los

¹³ Para el primer gráfico, se consideraron los puntos en estado Barro/Agua más aquellos en estado Ext. Tele Comandada. Lo anterior se debe a que este último estado considera extracción en puntos con contenidos críticos de granulometría y humedad.

¹⁴ Última fecha disponible en bases de datos: 22 de noviembre de 2013.

iniciales (colores celeste y verde), para finalmente aparecer de forma más disgregada los años 2012 y 2013 (amarillo y anaranjado). En este último, se observó que apareció agua-barro cerca de los puntos del año 2012, y también se inició la aparición hacia el lado este del sector.

Observando entonces que la aparición de agua-barro ocurrió en 2 zonas separadas, se consideraron 2 polígonos para facilitar descripciones y posteriores análisis:

- i. Polígono 1: entre calles 19-F y 33-H
- ii. Polígono 2: entre calles 39-F y 45-H

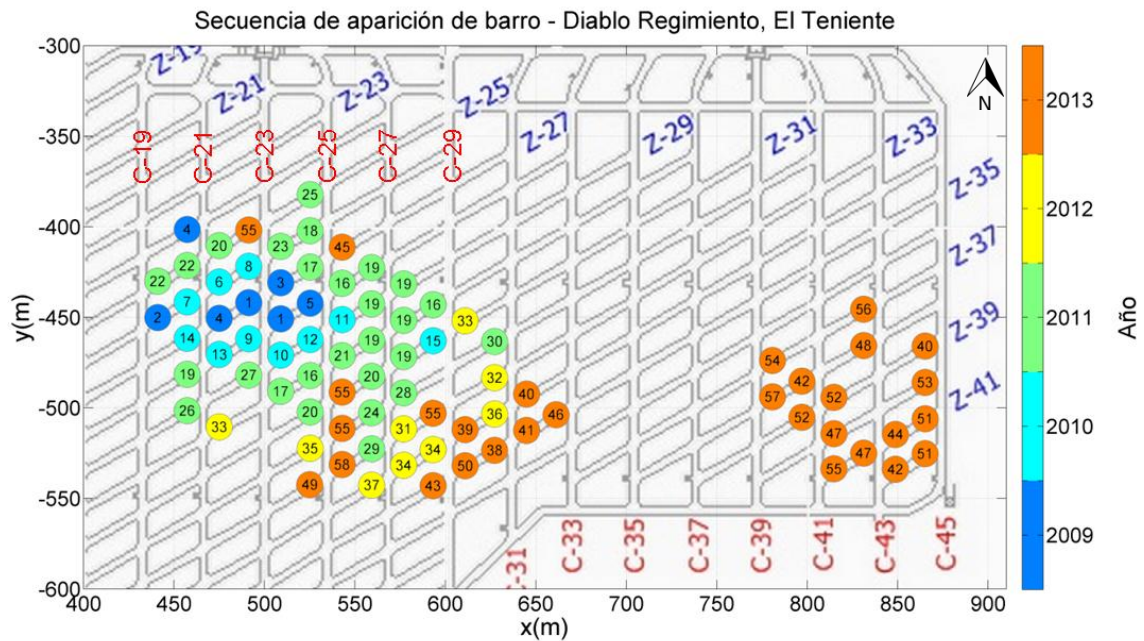


Figura 23: Secuencia anual de aparición de agua-barro en DR.

Respecto a la Figura 24, se observó que el agua-barro apareció de forma ordenada a lo largo de una calle, ya sea desde un punto y luego hacia norte y sur (caso de calles 21, 23 y 25 principalmente), o bien desde un punto y luego hacia el norte o hacia el sur (caso de calles 19, 27 y 45 principalmente).

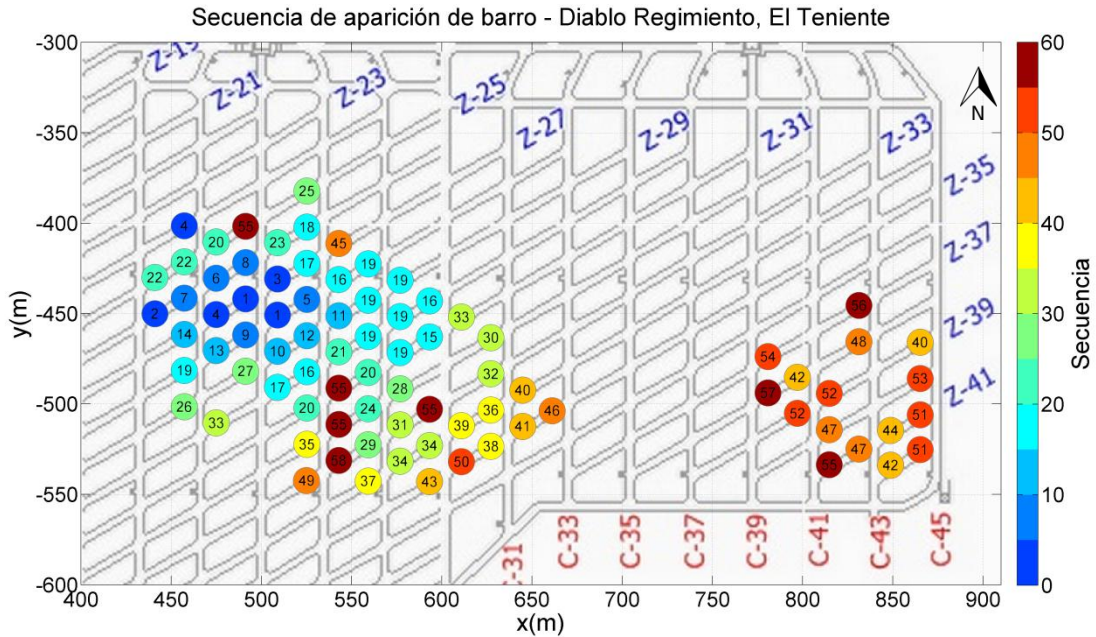


Figura 24: Secuencia (orden) de aparición de agua-barro en DR.

4.6. Estrategia de caving

En Diablo Regimiento se aplicó una estrategia de caving virgen; se comenzó la extracción desde el centro de la Fase 1 generando un “domo” que finalmente conectó con el sector Regimiento suprayacente, tal como se observa en la Figura 25.

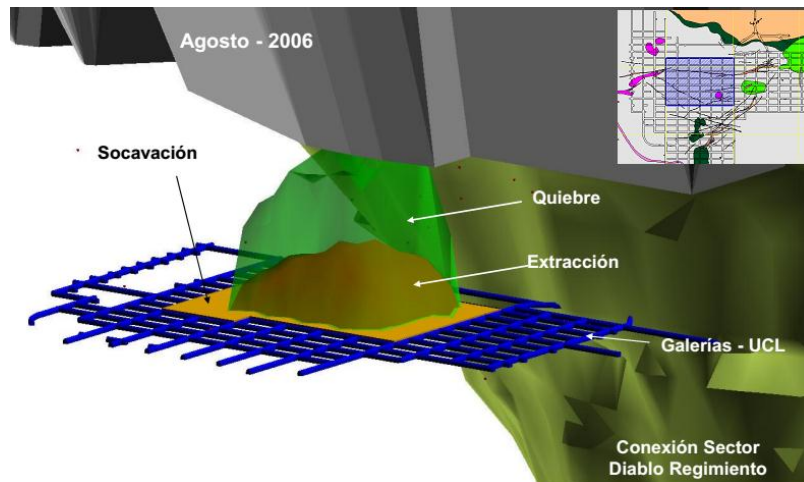


Figura 25: Conexión del sector Diablo Regimiento (Codelco, División El Teniente, 2009).

Al respecto, se determinó que los primeros puntos en conectar con Regimiento, fueron los primeros en reportar aparición de agua-barro. Justamente estos puntos corresponden a los que conectaron los años 2006 y 2007 (ver Figura 26, y comparar con Figura 24 de la pág. 46).

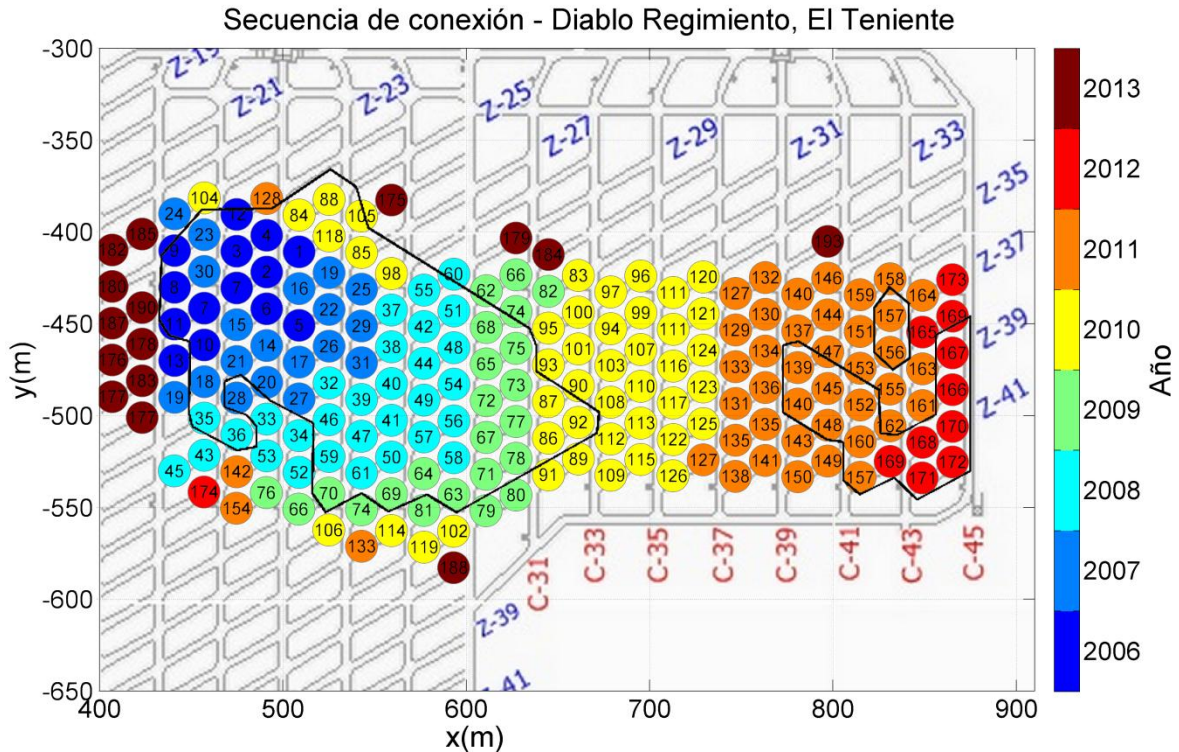


Figura 26: Secuencia de conexión (extracción de 1/3 de columna in situ). En negro se demarcan las zonas con actual presencia de agua-barro.

Además se estudió cuál fue el área de conexión con el sector Regimiento, y su evolución durante el año 2006. Al respecto, mediante estudio de alturas extraídas en el tiempo, se determinó que la conexión ocurrió en agosto de 2006¹⁵ (para el caso en que se considera conexión al extraer 1/3 de la columna in situ). Además, el área de conexión varía entre 340 y 5,000 m² entre agosto y diciembre de 2006.

¹⁵ Coincidente con lo determinado en “Informe back análisis punto inicio caving” (Codelco, División El Teniente, 2009).

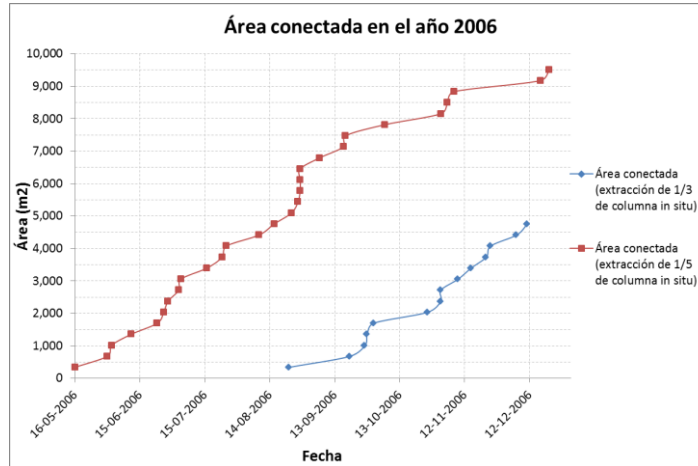


Figura 27: Evolución del área conectada durante el 2006, para 2 casos: 1/3 y 1/5 de columna in situ extraída.

Sin embargo, de acuerdo a estudios realizados por la Superintendencia de Geomecánica, a junio de 2006 el área fuertemente afectada en Regimiento fue estimada en 8,000 m², e iba proyectada en Diablo Regimiento entre las calles 21 y 27 (Codelco, División El Teniente, 2006). Esta mayor área estimada en un tiempo menor, es consecuente con el hecho de que en el sector se aplicó hidrofracturamiento (Molina et al., 2008). Por otro lado, el área de quiebre proyectada sobre Diablo Regimiento coincide justamente con las primeras apariciones de agua-barro en el sector.

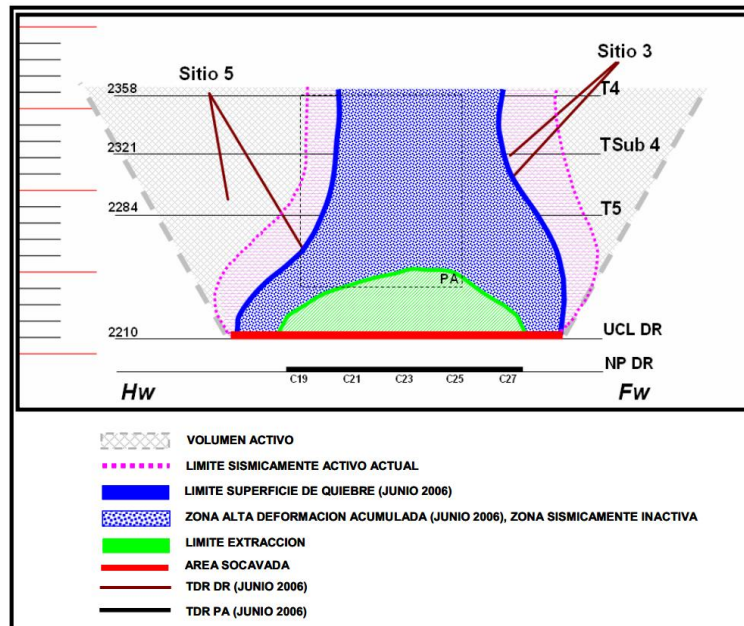


Figura 28: Resultado de información integrada (Junio 2006) obtenido por Superintendencia de Geomecánica, respecto a conexión de Diablo Regimiento con Teniente 4 (Codelco, División El Teniente, 2006).

4.7. Altura extraída a la que apareció agua-barro

Un aspecto importante a analizar fue a qué altura extraída apareció agua-barro, pues esto permitiría dar mayores luces sobre si el gatillante de la aparición es la extracción de la totalidad de la columna in situ (agua-barro proveniente de sectores superiores antiguos ya explotados), si corresponde a migración lateral del agua-barro desde puntos vecinos, o bien se debe directamente al ingreso de agua y/o de agua-barro desde superficie¹⁶.

Periodo		Polígono 1				Polígono 2				Ambos polígonos			
		Número de declaraciones	Rango de alturas de aparición de barro			Número de declaraciones	Rango de alturas de aparición de barro			Número de declaraciones	Rango de alturas de aparición de barro		
			Mínima	Máxima	Promedio		Mínima	Máxima	Promedio		Mínima	Máxima	Promedio
Marzo - Noviembre	2009	7	111	168	148	0	-	-	-	7	111	168	148
Enero - Diciembre	2010	10	155	212	180	0	-	-	-	10	155	212	180
Enero - Diciembre	2011	27	148	298	213	0	-	-	-	27	148	298	213
Febrero - Diciembre	2012	9	184	297	232	0	-	-	-	9	184	297	232
Enero - Noviembre	2013	14	209	330	271	16	113	248	170	30	113	330	217

Tabla 22: Secuencia y rangos de altura extraída a la que apareció agua-barro en el sector.

En base a la Tabla 22, la aparición inicial de agua-barro se dio a valores promedio de 148 y 170 m para cada polígono, lo cual es similar a la altura de columna in situ que separa el sector Diablo Regimiento con el sector Regimiento. Posteriormente, la altura promedio fue aumentando, llegando a máximos de 330 m. En ambos polígonos la aparición inicial se dio a alturas casi iguales: 111 y 113 m; esto se observa en los puntos más azules de la Figura 29.

En los gráficos mostrados en la Figura 29 y la Figura 30, y tal como se mostró en la Tabla 22, se determinó que existe una relación entre “orden (secuencia)” y “altura” de aparición de agua-barro: en los puntos en que la aparición de agua-barro ocurre primero, ésta ocurre a menores altura de columna extraída. Esto se observa para ambos polígonos por sí solos (ver Figura 30; polígono 1: tonos más azules; polígono 2: tonos más amarillentos). Lo anterior induce a descartar que el ingreso inicial de agua-barro haya sido directo desde topografía por eventual sobre tiraje inicial; más bien, se cree que la fuente de agua-barro fue el sector Regimiento, el cual pudo haber actuado como acumulador de agua-barro.

Dado que la aparición de agua-barro ocurre en vecinos de puntos en ya había agua-barro reportado, y teniendo en mente la relación entre orden/secuencia y altura de aparición de agua-barro, entonces se establece la idea de que el agua-barro va migrando desde puntos de

¹⁶ No se descarta un efecto combinado de las 3 causas nombradas.

aparición inicial, hacia puntos vecinos. En otras palabras, se cree que existieron puntos que fueron entradas iniciales de agua-barro hacia Diablo Regimiento, los cuales a su vez fueron contaminando al resto. Esto se evidencia en que en los contaminados, la aparición de agua-barro se dio a mayor altura extraída, la cual es incluso en algunos casos considerablemente mayor que la altura de columna in situ.

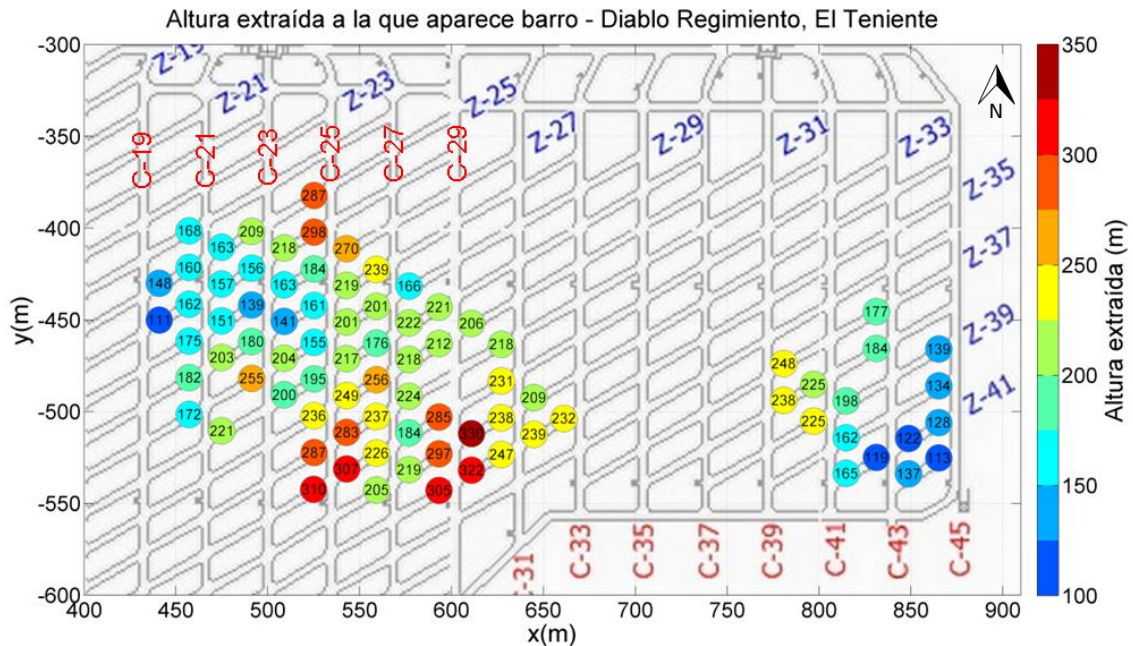


Figura 29: Altura extraída a la que apareció agua-barro en DR.

En la Figura 31 se observa que la aparición de agua-barro ocurrió cada vez a un mayor rango de alturas extraídas. Para el año 2009 se evidencia que las apariciones iniciales coinciden con la altura de columna in situ entre Diablo Regimiento y Regimiento. Posteriormente, a partir del uso de puntos en estado Limitado, se observa que la altura extraída comienza a dispersarse.

Dado que la aparición de agua-barro ocurrió en un rango cada vez más amplio de altura extraída respecto al paso del tiempo, se cree que la causa de aparición inicial de agua-barro (2009) no fue la única existente hacia el final del periodo de análisis (2013).

Secuencia y alturas a la que aparece barro - Diablo Regimiento, El Teniente

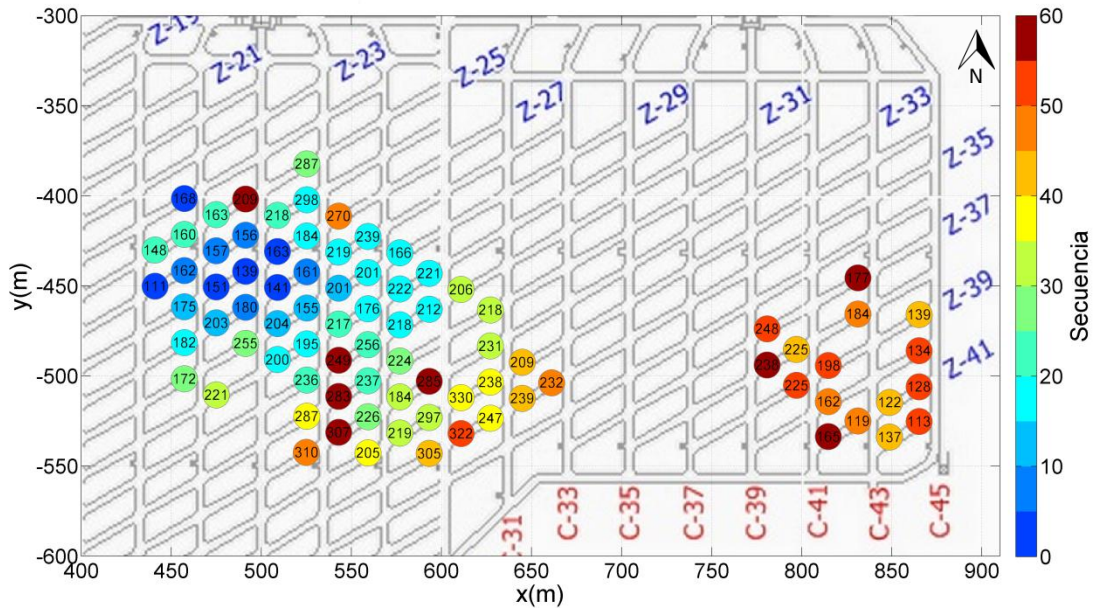


Figura 30: Secuencia y altura extraída a la que apareció agua-barro en DR.

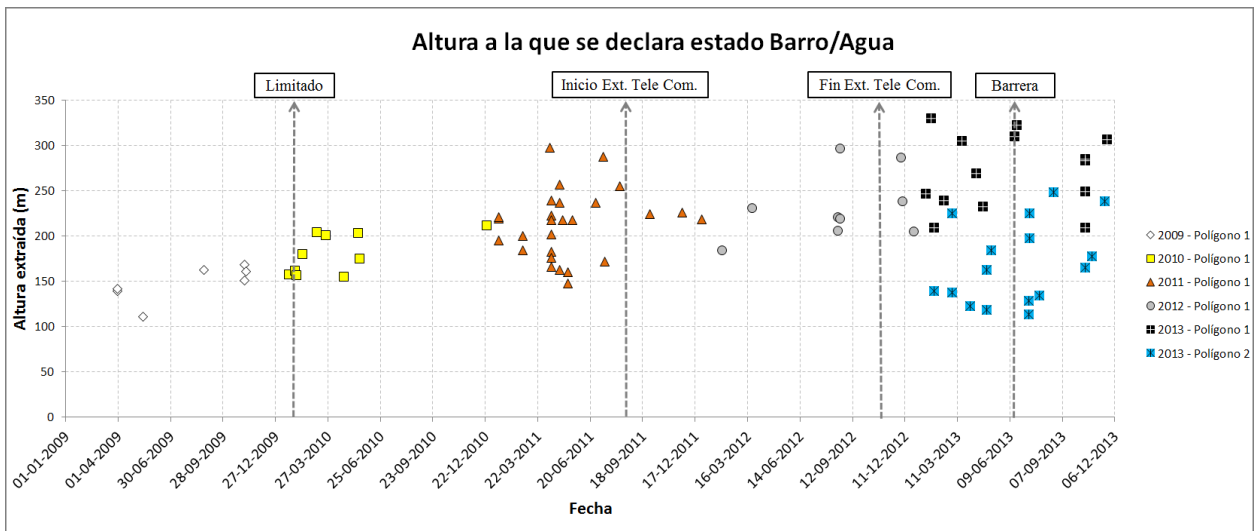
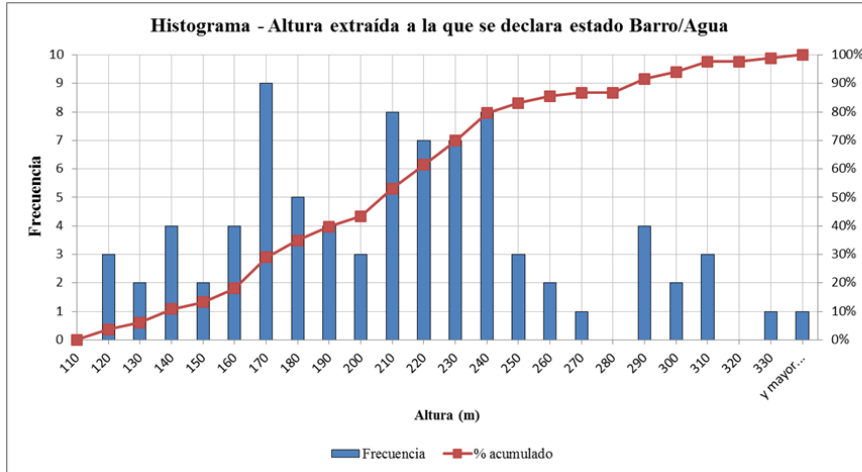


Figura 31: Altura extraída a la que aparece agua-barro en DR, versus tiempo.

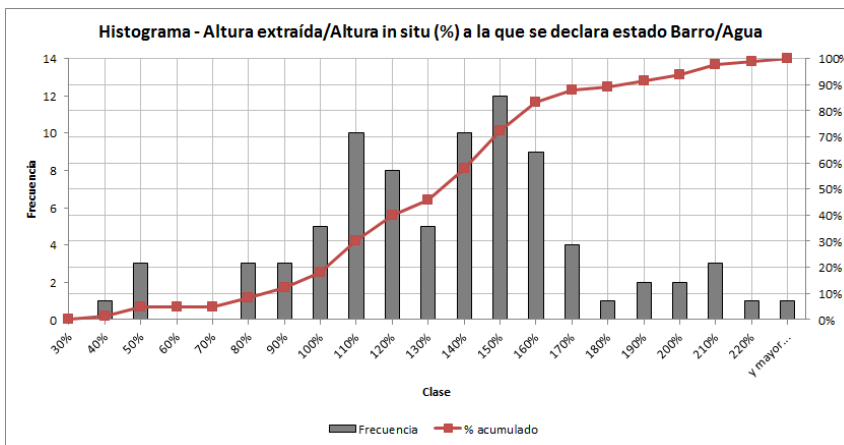
Es más; desplegando un histograma de las alturas a las que apareció agua- barro (Figura 32), se pudieron observar al menos 3 poblaciones: una centrada en torno a los 170 m, otra en torno a los 230 m, y una tercera centrada en los 310 m.



Altura extraída (m)	
Mínimo	111
Máximo	330
Promedio	207
Desv. Est.	52.4

Figura 32: Histograma de alturas extraídas a la que aparece agua-barro en DR.

Si bien es evidente que el ingreso de agua-barro inicial ocurrió bajo la influencia de los niveles antiguos, no quedan suficientemente claros los otros mecanismos que hacen que el ingreso de agua-barro haya sido a alturas extraídas mayores. Por lo tanto, se hace necesario estudiar la influencia de sobre extracción y de movimiento lateral del agua-barro.



Alt. Extraída / Alt. In situ (%)	
Mínimo	38%
Máximo	220%
Promedio	131%
Desv. Est.	39%

Figura 33: Relación entre altura extraída y altura in situ a la cual ocurrió aparición de agua-barro.

4.8. Perfiles de alturas extraídas

Para la realización de este estudio, se define como perfil de altura extraída a aquel gráfico bidimensional cuyo eje Y denota la altura extraída acumulada a un tiempo determinado, y cuyo eje X denota la posición de puntos de extracción a lo largo de una recta determinada por la sección elegida para el despliegue del perfil: norte-sur o este-oeste (Figura 34). El eje Y se representó de forma positiva hacia abajo, con el fin de crear una analogía entre la forma del perfil y una topografía ficticia que se generaría con la extracción, en un supuesto de que sobre el quebrado existiese una topografía real totalmente plana. En otras palabras, los puntos más bajos en los perfiles (coordenada Y máxima, local o global) señalan direcciones preferenciales de flujo de fluidos y de finos; en particular, de agua y de mineral fino saturado.

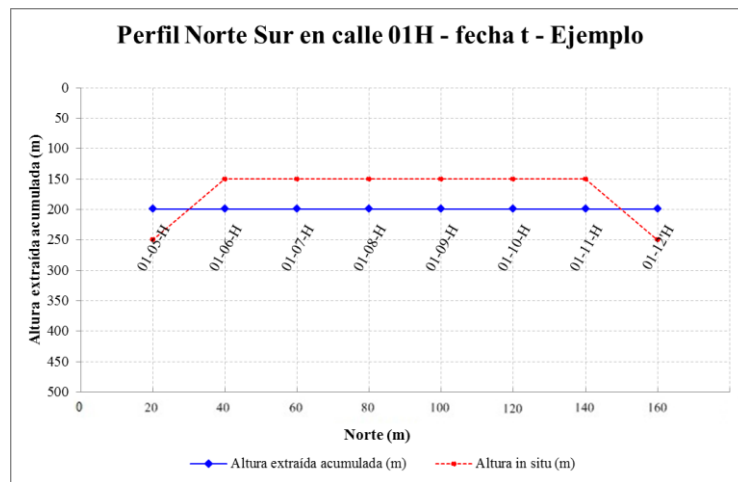


Figura 34: Ejemplo de perfil de alturas extraídas.

En teoría, una extracción perfectamente regular en términos geométricos, se manifestaría por un perfil de alturas extraídas totalmente horizontal, tal como el de la figura anterior. Sin embargo, dado que en ese perfil sólo se ve una sección y no otras direcciones, es indispensable al menos observar cómo es el perfil en una dirección perpendicular a la considerada.

El principal objetivo que se persiguió al estudiar perfiles de alturas extraídas, fue el determinar si la aparición de agua-barro en algunos puntos de extracción se debió a un tiraje irregular al crear direcciones preferenciales de flujo de agua-barro. Además, se pretendió justificar la elección de algunos puntos con el fin de estudiar su uniformidad en base a índices cuantitativos.

4.8.1. Evolución temporal de perfiles de alturas extraídas

Con el fin de observar la evolución temporal de perfiles de alturas extraídas, se superpusieron varios de ellos en un mismo gráfico. Cada uno de los perfiles fue obtenido cada 6 meses desde el año 2005 hasta el 2013, obteniéndose así la evolución temporal de perfiles de alturas extraídas, para todas las secciones norte-sur y este-oeste que contienen puntos en estado Barro/Agua. De esta forma, se pudieron analizar los siguientes aspectos:

- i. Regularidad de alturas extraídas a lo largo del perfil, definiéndose arbitrariamente como *perfil regular perfecto*¹⁷, a aquel perfil de extracción completamente horizontal a un periodo determinado (Figura 34).
- ii. Uniformidad cualitativa, determinada a simple vista observando qué tan equidistante se encuentra un perfil de otro para distintos periodos.
- iii. Si la entrada de barro ocurrió al extraerse la totalidad de la altura de columna in situ, o fue anterior o posterior a este hecho.
- iv. Direcciones preferenciales de flujo de fluidos y de mineral fino saturado, inferidas como aquellas zonas de los perfiles que están en la vecindad de los puntos más bajos de un perfil (puntos cuya coordenada Y es máximo local o global).
- v. Puntos con eventual sobre extracción, en base a mayor distancia en la vertical entre perfiles consecutivos para un mismo punto de extracción.

Se debe notar que en esta Memoria se considera que el concepto “Regularidad” tiene que ver con qué tan distinto es un perfil de alturas extraídas respecto de un perfil teórico perfectamente regular (perfil horizontal, Figura 34), mientras que “Uniformidad” tiene que ver en cómo un perfil, sea o no regular, se ha desplazado equidistante o desigualmente respecto a otro. La idea tras de esto es que a mayor equidistancia entre 2 perfiles consecutivos para periodos distintos, mayor uniformidad hubo en el tiraje de los puntos de extracción representados por tal perfil, lo cual no necesariamente implica que el perfil haya sido regular durante esa extracción.

4.8.2. Calle 23: aparición inicial de agua-barro

En base a la Figura 23, se determinó que la calle 23 fue donde se inició el ingreso de agua-barro. A continuación se muestra la evolución de perfiles de alturas extraídas para dicha calle. Los puntos de extracción cerrados por agua-barro se señalan en color anaranjado.

¹⁷ No confundir con el concepto “tiraje regular”.

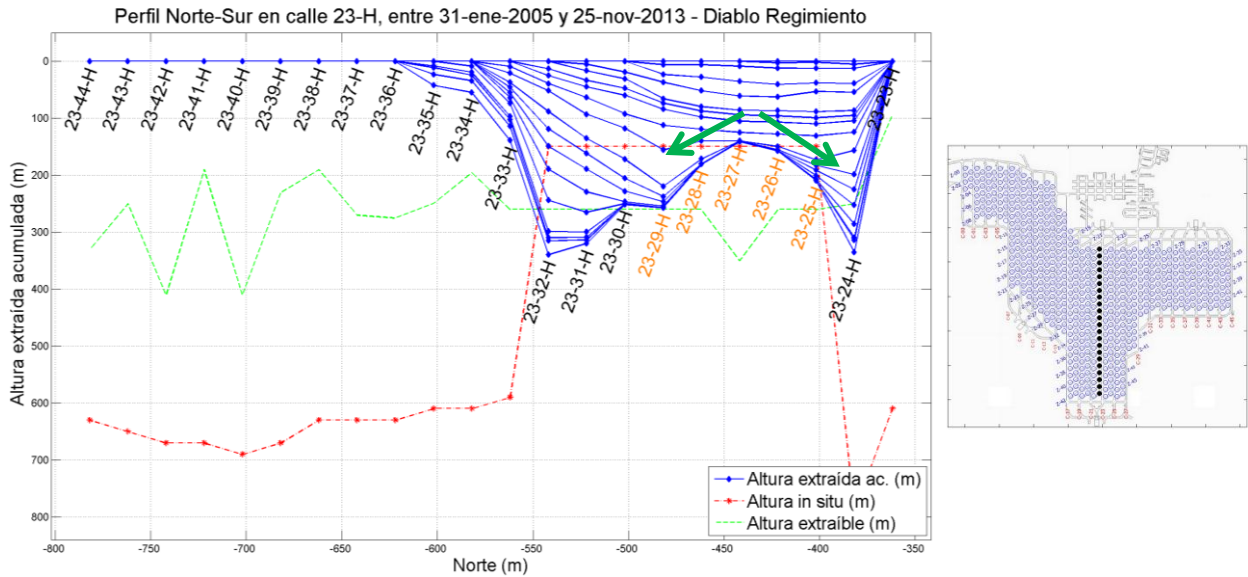


Figura 35: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraídas, para calle 23-H.

Justamente en la evolución de perfiles de la Figura 35, se determinó que la estrategia de extracción aplicada generó direcciones preferenciales de flujo de agua-barro hacia norte y sur (señalados en flechas verdes). Es decir, la idea planteada de “topografía ficticia” al observar estos perfiles de alturas extraídas, induce a pensar que el agua-barro migró hacia zonas donde el perfil tiene máximos locales o globales (puntos más bajos de los perfiles en el gráfico).

La misma idea anterior se repite en la evolución de perfiles este-oeste de la Figura 36; sólo que en este caso, un punto escapa a la hipótesis planteada: 43-37-H. Sin embargo, se debe destacar que respecto a este punto, sólo se está desplegando la dirección este-oeste.

De todo el sector Diablo Regimiento, el primer punto con aparición de agua-barro fue el 23-27-H, a 139 m de altura extraída. En la Figura 35 se observó que a dicho punto se le extrajo casi completamente su altura de columna in situ al detectarse agua-barro, por lo cual se corrobora que el nivel antiguo superior actuó como acumulador de barro.

Otro aspecto importante a señalar es que previo al ingreso de barro al punto en cuestión, en la misma figura se observó una extracción muy regular y uniforme entre los puntos 23-29-H y 23-24-H (perfiles cercanos a la horizontalidad y equidistantes entre sí); posteriormente, debido al cierre del punto, el perfil de alturas extraídas se tornó mucho más irregular creando las direcciones preferenciales de migración de agua-barro. Es más: se establece como hipótesis que el agua-barro que ingresó inicialmente hacia el punto 23-27-H fue el que se distribuyó y contaminó a los puntos de extracción aledaños.

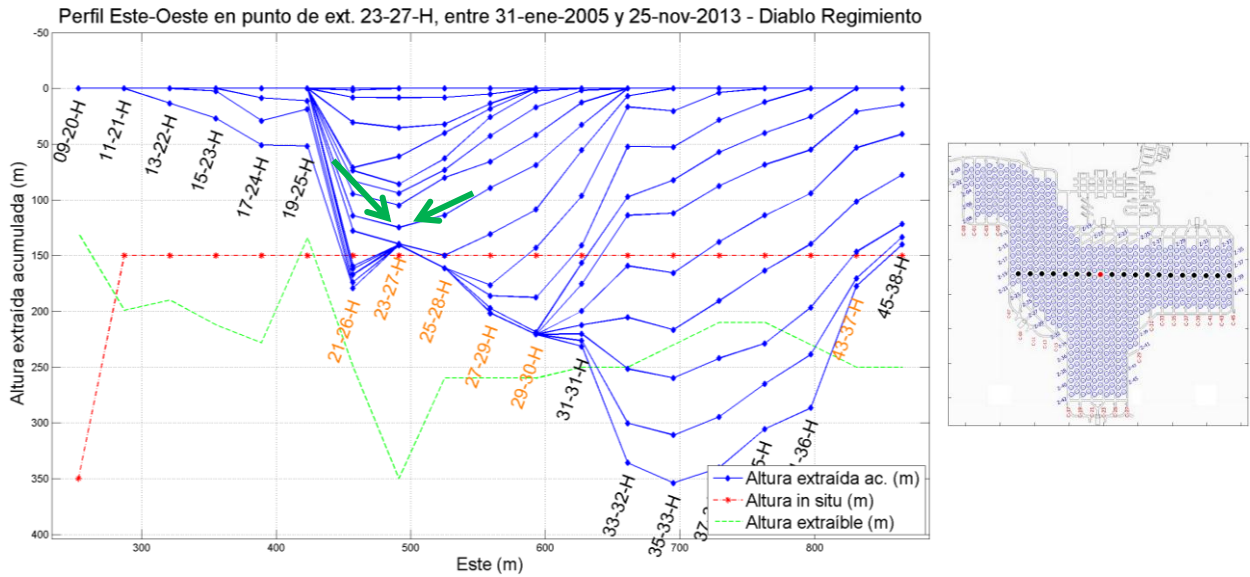


Figura 36: Evolución 2005-2013 de perfiles este-oeste de alturas extraídas; punto de extracción 23-27-H.

Respecto a la dirección este-oeste (Figura 36), se determinó que existió un tiraje preferencial en el punto en cuestión. Dicho punto fue extraído a mayor tasa que sus vecinos.

4.8.3. Calle 25: mayor cantidad de puntos cerrados por agua-barro

A simple vista, la calle 25 destaca por haber sido aquella con más puntos cerrados por agua-barro, y también porque tanto al norte como al sur fueron cerrados a gran altura extraída. De esta calle, los 2 puntos de extracción en que la aparición de agua-barro ocurrió a menor altura extraída fueron el 25-28-H y 25-29-H, a 161 y 155 m, respectivamente. El caso es análogo al de la calle 23: la aparición de agua-barro inicial en ambos puntos fue la que migró posteriormente hacia los alrededores, hacia el norte y hacia el sur (ver Figura 37).

Observando el perfil este-oeste que pasa por el punto 25-29-H en la Figura 38, se observó que también corresponde a uno de los puntos en donde la aparición de agua-barro ocurrió a menor altura extraída.

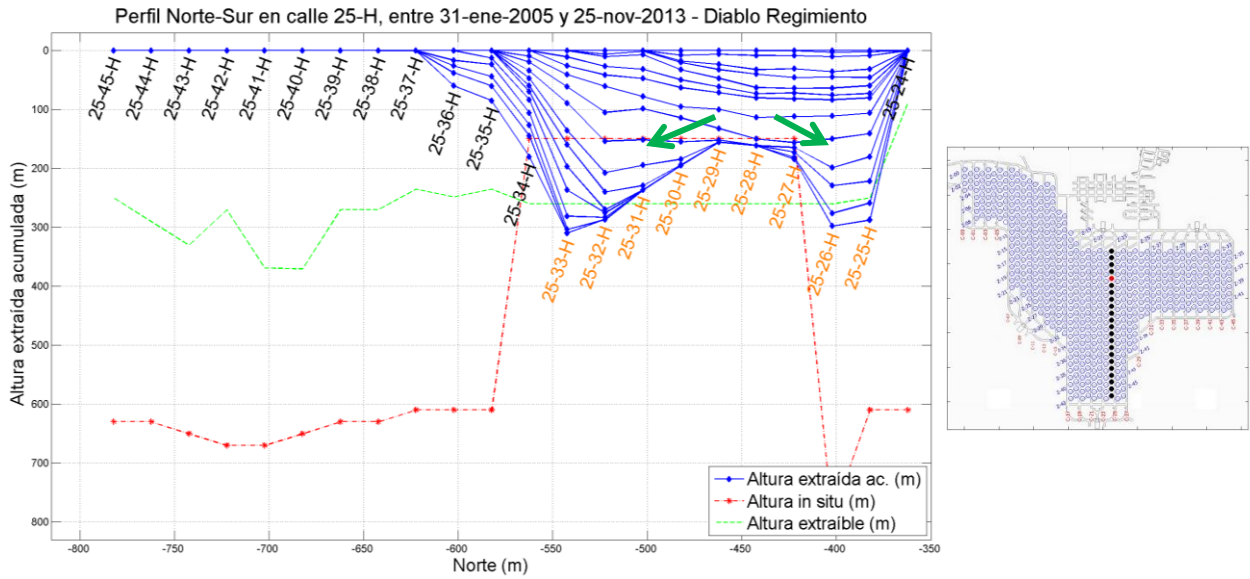


Figura 37: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraídas, para calle 25-H.

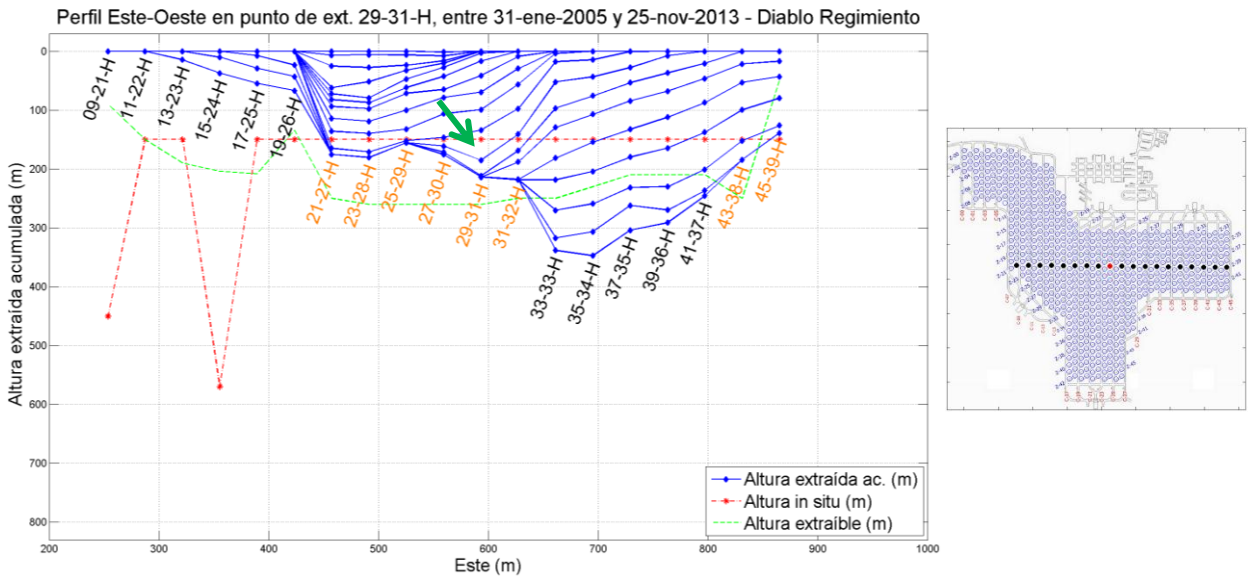


Figura 38: Evolución 2005-2013 de perfiles este-oeste de alturas extraídas; punto de extracción 25-29-H.

4.8.4. Calle 27: movimiento de agua-barro hacia el sur

En la calle 27, 6 puntos de extracción fueron declarados al mismo tiempo con aparición de agua-barro en abril de 2011. Las alturas extraídas en estos puntos variaban entre 166 y 239 m de altura de columna extraída. Un aspecto importante respecto a esta calle es que la aparición comenzó desde el norte, a la misma coordenada norte que los puntos que iniciaron aparición de barro en la calle 23, para posteriormente ir avanzando hacia el sur. Es decir, no se tuvo el caso en que el barro se abrió hacia el norte y hacia el sur; sino que en este caso solo migró solo hacia el sur.

En la evolución de perfiles norte-sur de alturas extraídas de la Figura 39, se observó que se mantuvo un perfil irregular de extracción a lo largo de la calle. Además se observó que existió sobre tiraje hacia el lado sur, lo cual es consecuente con la idea de que el agua-barro migró en esa dirección. En particular, la sobre extracción fue desde el punto 27-32-F hacia el sur, y justamente desde ese punto hacia el sur fue donde ocurrieron las siguientes apariciones de agua-barro posteriores a las 6 primeras apariciones de la calle.

Respecto a la evolución de perfiles este-oeste de alturas extraídas en la Figura 40, se observó una alta irregularidad que se acentúa hacia el lado este del perfil debido que hacia esa dirección existen puntos sin humedad. Además se observó un gran sobre tiraje en el punto 25-28-F.

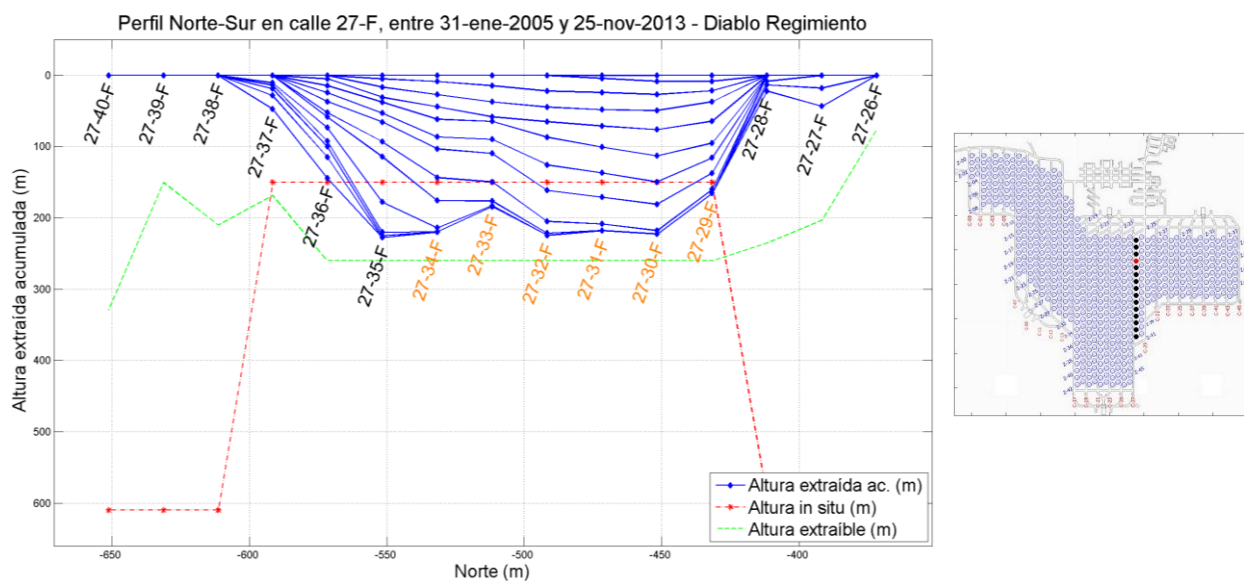


Figura 39: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraídas, para calle 27-F.

Otro aspecto importante a destacar es que en la calle 27 la aparición inicial de agua-barro se dio en el punto 27-29-F. En ese instante dicho punto estaba en la interfase entre roca in situ y quebrado, pues al norte de ese punto en calle 27 no habían otros puntos abiertos. De este modo, además de que la aparición de agua se diera en el momento en que se extrajo la totalidad de la columna in situ, otro factor contribuyente pudo haber sido el gradiente de presión entre in situ y quebrado, en el caso de existir cuerpos de agua subterráneos que fluyan a través del macizo in situ.

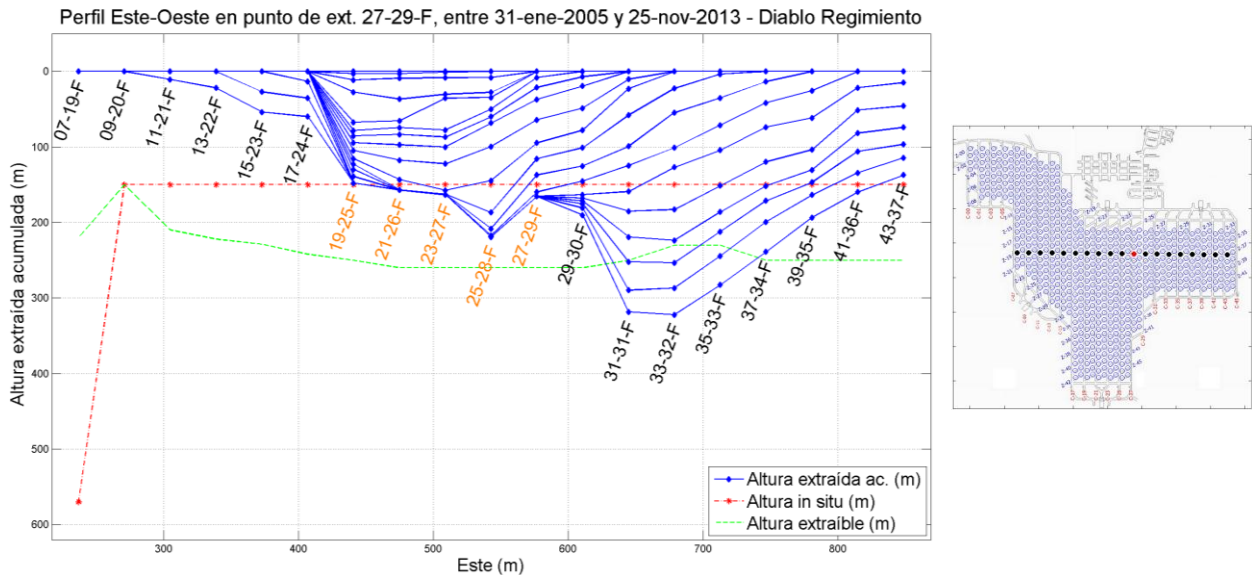


Figura 40: Evolución 2005-2013 de perfiles este-oeste de alturas extraídas; punto de extracción 27-29-F.

4.8.5. Calle 29: aparición discontinua de agua-barro a lo largo de la calle

En la calle 29, la aparición de agua-barro se dio de forma discontinua; es decir, existían puntos con aparición de agua-barro tanto al norte como al sur de la calle, pero también existían 3 puntos sin agua-barro al centro de la calle, en torno a la zanja 32. De acuerdo a la evolución temporal de perfiles de alturas extraídas, se observó que para el caso del lado oeste de la calle 29, el punto 29-32-H fue dejado como una barrera a la migración de agua-barro hacia el sur. Esto se muestra a continuación en la Figura 41, en donde se ve que existió una irregularidad en dicho punto, mientras que a ambos lados existieron puntos con agua-barro.

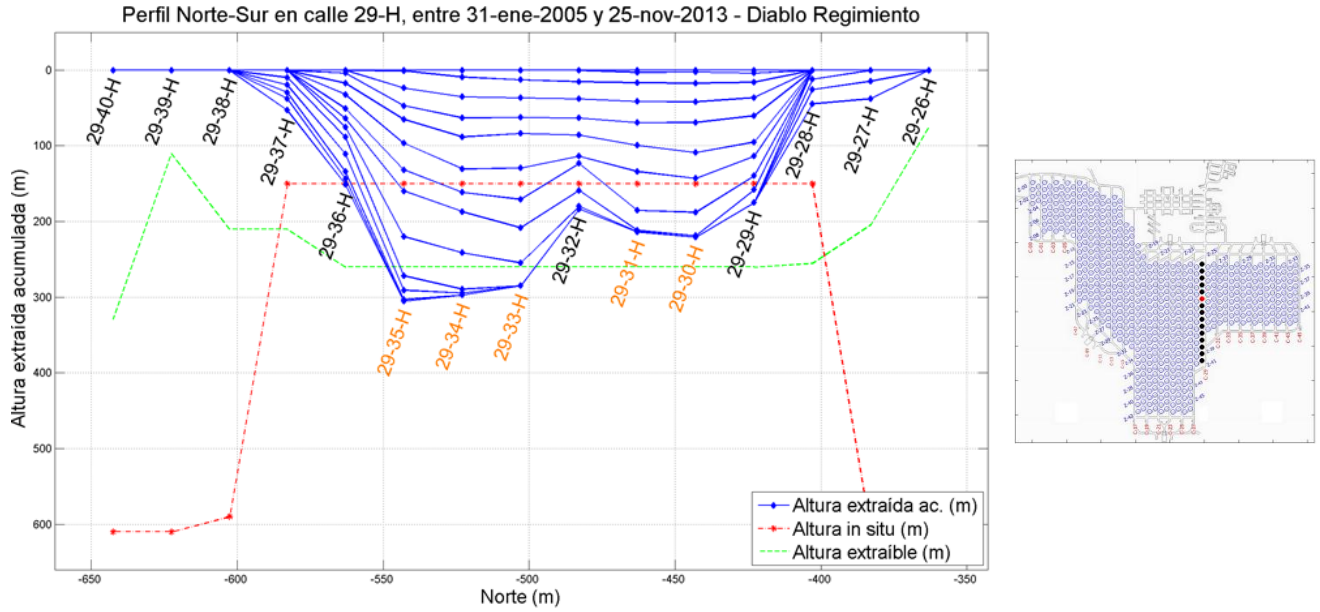


Figura 41: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraída, para calle 29-H.

En la calle 29, la mayor extracción fue en el lado sur, lo cual coincide con el hecho de que hacia el sur fueron las últimas apariciones de agua-barro en la calle. Si bien los puntos de entremedio no reportan agua-barro a la fecha de análisis, se espera que estos sí tengan aparición de agua-barro en algún instante.

Además, en el caso analizado se observó que el haber dejado el punto 29-32-H como barrera fue una medida efectiva, pues permitió que los puntos del lado sur de la calle fueran extraídos entre 285 y 330 m, antes de ser cerrados en estado Barro/Agua.

4.8.6. Polígono 2: aparición de agua-barro discontinua

Para analizar el caso del polígono 2, se hizo necesario observar la secuencia de aparición de agua-barro pero restringida sólo para este polígono (Figura 42).

Se observó que la aparición de agua-barro fue dispersa en comparación al polígono 1. La aparición inicial de agua-barro en este polígono se dio en el punto 45-39-H, a 139 m de altura de columna extraída, similar a la altura de columna in situ del punto. Al momento de la aparición inicial de agua-barro, dicho punto era el que manifestaba mayor altura de columna extraída, lo cual se evidencia en el punto más bajo en el perfil de la Figura 43.

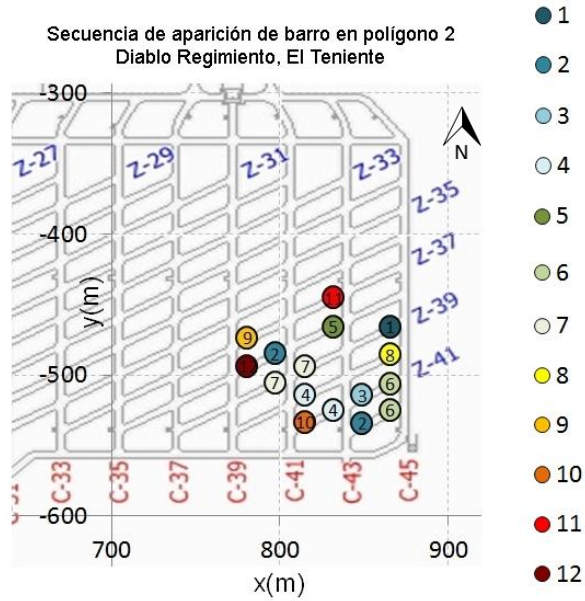


Figura 42: Secuencia de aparición de agua-barro en polígono 2 (lado este) en DR.

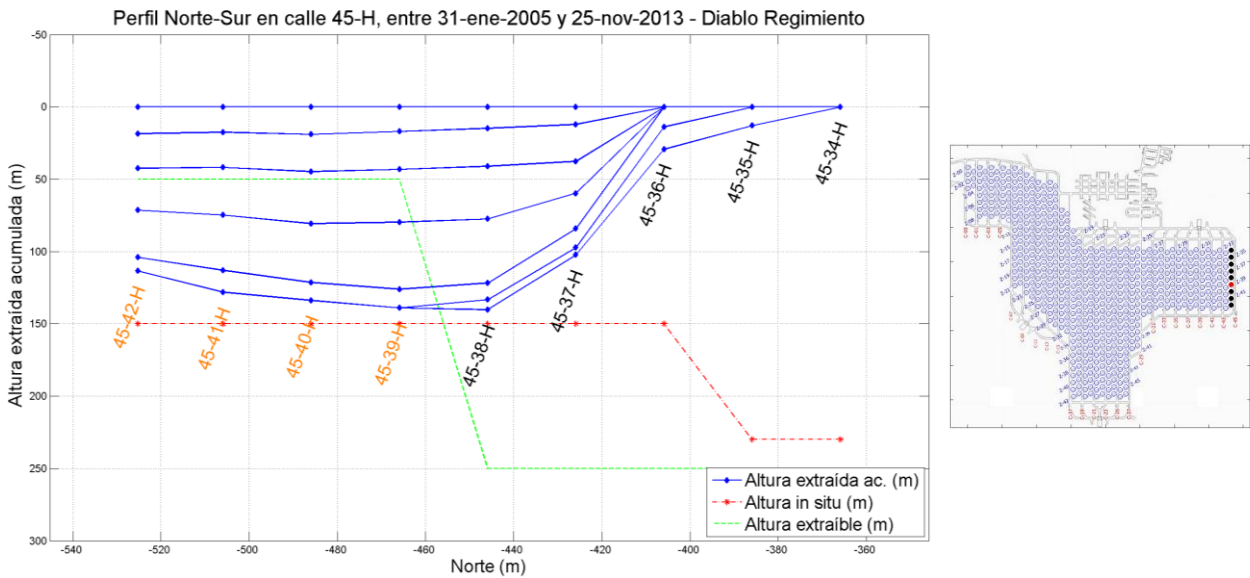


Figura 43: Evolución 2005-2013 de perfiles norte-sur de alturas extraídas, para calle 45-H.

Según la idea de “direcciones preferenciales de flujo” asociada a puntos cercanos a un máximo global o local en un perfil (punto más bajo de la curva), la aparición inicial de agua-barro debería haber sido desde sur a norte según el perfil de la Figura 43. Sin embargo, lo ocurrido realmente

fue todo lo contrario: en dicha calle fue de norte a sur. Además, para los puntos de más al sur la entrada de agua-barro fue a menor altura de columna extraída.

Algo que destaca del análisis de aparición de agua-barro en el polígono 2, es que al observar los perfiles norte-sur, todos muestran gran regularidad. Sin embargo, observando los perfiles en dirección este-oeste, se evidenció que existieron perfiles irregulares. Además, se cumplió la condición de que las apariciones de agua-barro ocurrieran en perfiles irregulares de extracción, aunque en menor medida en comparación a lo detectado en el polígono 1. Lo anterior se muestra como ejemplo en la Figura 44, para el caso de apariciones de agua-barro en puntos 39-38-F y 41-39-F.

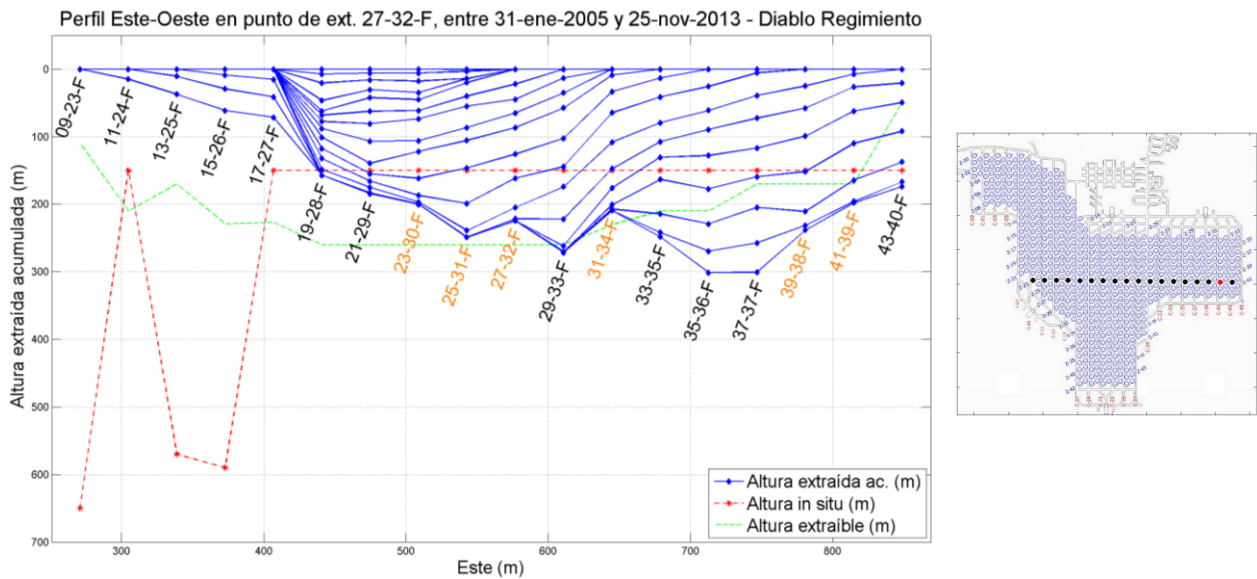


Figura 44: Evolución 2005-2013 de perfiles este-oeste de alturas extraídas, para puntos 39-38-F y 41-39-F.

4.8.7. Resumen de lo observado

	Altura de aparición de agua-barro (m)		Uniformidad (%)		Dirección de aparición de agua-barro	Observaciones
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
Calle 23	139	255	33	53	Norte y sur	Marca inicio de aparición de agua-barro. Extracción preferencial luego de ingreso de agua-barro. Perfiles altamente irregularidades tanto norte-sur como este-oeste.
Calle 25	155	310	38	58	Norte y sur	Calle con más puntos cerrados por agua-barro, y con apariciones a grandes alturas al norte y sur de la calle. Extracción preferencial luego de ingreso de agua-barro. Perfiles altamente irregulares tanto norte-sur como este-oeste.
Calle 27	166	256	48	65	Sur	Aparición de agua-barro hacia el sur. Extracción preferencial luego de ingreso de agua-barro. Perfiles regulares en norte-sur y altamente irregulares en este-oeste.
Calle 29	206	330	45	65	Sur	Aparición de agua-barro discontinua, hacia el sur, con grandes alturas de aparición en esa zona. Perfiles regulares en norte-sur y irregulares en este-oeste.
Polígono 2	113	248	61	64	Oeste	Aparición de agua-barro muy discontinua. Perfiles altamente regulares en norte-sur, e irregulares en este-oeste.

Tabla 23: Resumen de lo observado mediante evolución de perfiles de alturas extraídas.

4.9. Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI)

El principal objetivo de realizar un tiraje uniforme¹⁸, es evitar el ingreso de dilución hacia un sector en operación (Paredes, 2012). Para el caso en estudio no se habla de dilución propiamente tal, sino que de material saturado. Éste puede provenir de 2 fuentes¹⁹: lagunas de agua-barro que se forman en el cráter de subsidencia (dilución), y mineral saturado acumulado en el quebrado remanente de la explotación de niveles antiguos superiores (mineral que favorece la explotación de sectores actuales).

¹⁸ Se sabe que es imposible realizar un tiraje perfectamente uniforme a bajas escalas de tiempo, debido a características inherentes al Block/Panel Caving.

¹⁹ También la posibilidad de que material fino diluyente ingrese seco hacia el quebrado, y se mezcle con aguas subterráneas generando agua barro.

La interrogante a responder en este apartado, es si un tiraje no uniforme tiene incidencia en el ingreso de material saturado los puntos de extracción. Además se espera determinar cómo la uniformidad del tiraje afecta a la secuencia de aparición de agua-barro en el sector en estudio. Este último aspecto se relaciona a la idea lógica de que distintos esponjamientos a lo largo de las columnas de mineral (producidos por distintas estrategias de extracción), crean distintas conductividades hidráulicas a distintas cotas, que podrían crear canales preferenciales de flujo de mineral saturado.

4.9.1. Hipótesis de trabajo al calcular el Índice de Uniformidad Vectorizado

En el capítulo “4.7 Altura extraída a la que apareció agua-barro”, se evidenció que la altura a la que apareció agua-barro varió entre 111 m y 330 m para el polígono 1, y entre 113 m y 248 m para el polígono 2. Es importante mencionar que la altura in situ (distancia entre cotas base de Diablo Regimiento y Regimiento) es del orden de 160 m. Estas dos observaciones inducen a pensar que no es sólo una la causante del ingreso de agua-barro al sector Diablo Regimiento. Por lo tanto, para el cálculo y análisis de índices de uniformidad, se propuso la siguiente hipótesis de trabajo:

El ingreso inicial de agua-barro a Diablo Regimiento se debió a conexión con sector Regimiento²⁰. Una vez que el agua-barro ingresó a algunas columnas del sector, este fue migrando lateralmente, en función de cómo se realizó el tiraje y la estrategia de apertura de puntos.

4.9.2. Índice de Uniformidad Vectorizado; caso con vecindad real

En el presente apartado se muestra el análisis y resultados obtenidos para el cálculo del Índice de Uniformidad Vectorizado con vecindad real²¹. El caso con vecindad geométrica fue muy similar al con vecindad real. Los resultados de mayor significancia fueron obtenidos considerando periodos de 3 turnos como espacio temporal (ver Tabla 35, página 115).

Para mostrar la uniformidad del tiraje de los puntos, se consideraron distintos periodos cuyos finales son las fechas de aparición de agua-barro. Los inicios²² considerados fueron 3:

²⁰ División El Teniente cuenta con evidencia de que este nivel actuó como acumulador de agua.

²¹ La razón de usar vecindad real fue suavizar resultados obtenidos en los “puntos borde” de un área productiva.

²² Los gráficos obtenidos para los 2 últimos casos aparecen en ANEXO E.

- i. Desde inicio de extracción
- ii. Desde conexión con sector Regimiento
- iii. Desde 1 mes previo a la aparición de agua-barro

Para cada periodo de tiempo, se contabilizaron las frecuencias de tiraje uniforme, semiuniforme y desuniforme. De esta forma se pudo cuantificar qué porcentaje del tiempo cada punto fue extraído en cada categoría de uniformidad.

4.9.3. Análisis desde el inicio de extracción, hasta aparición de agua-barro

La Figura 45 muestra el porcentaje de tiraje uniforme, semiuniforme y desuniforme para cada punto de extracción. Los puntos están ordenados por calle, H/F (oeste/este) y zanja. Además, en el eje vertical secundario se muestra la altura extraída a la que ocurrió la aparición de agua-barro.

Para el periodo analizado, se observó que los puntos del polígono 2 (lado este del sector) fueron extraídos más uniformemente que los del polígono 1 (derecha versus izquierda en la Figura 45, respectivamente). La mayor uniformidad observada fue de un 91% (punto 41-38-H), y la mínima fue 29% (punto 19-25-F), tal como se muestra en la Figura 46.

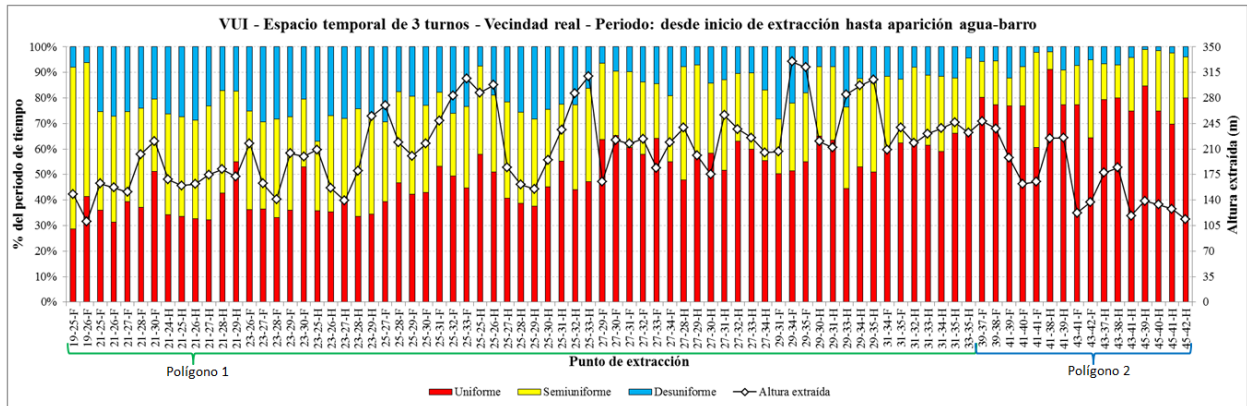


Figura 45: VUI considerando periodo desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.

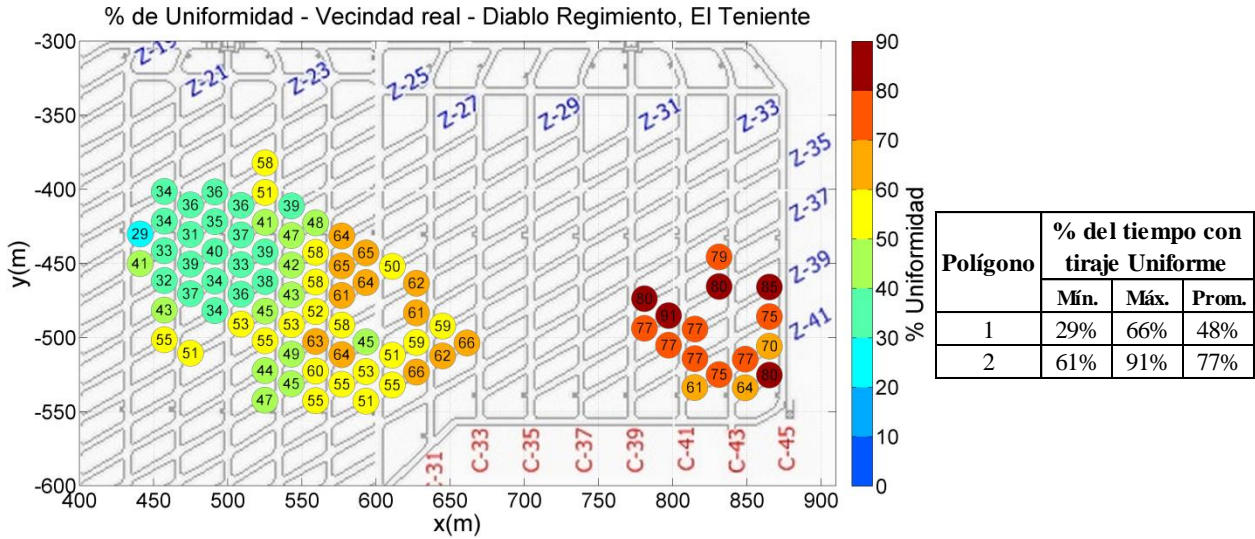


Figura 46: Porcentaje de uniformidad con que fueron extraídos los puntos con aparición de agua-barro. Periodo considerado: desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro. Vecindad real.

La Figura 47 muestra uniformidad del tiraje versus tiempo. El eje Y indica el porcentaje de tiempo que cada punto fue extraído de manera uniforme (equivalente a las barras rojas de la Figura 45). Al respecto, se observa que la tendencia en el tiempo es que los puntos reportan aparición de agua-barro a un mayor rango de uniformidad. Esta misma tendencia se observó en el gráfico de alturas extraídas versus tiempo (ver Figura 31, página 51). Lo natural sería pensar que existe una correlación entre la altura extraída a la que se reporta agua-barro y el porcentaje de uniformidad de extracción. Sin embargo, observando una gráfica entre altura extraída y porcentaje de uniformidad (ver Figura 48), se aprecia una nube dispersa de puntos. Además, el coeficiente de correlación entre ambas variables es de -0.15.

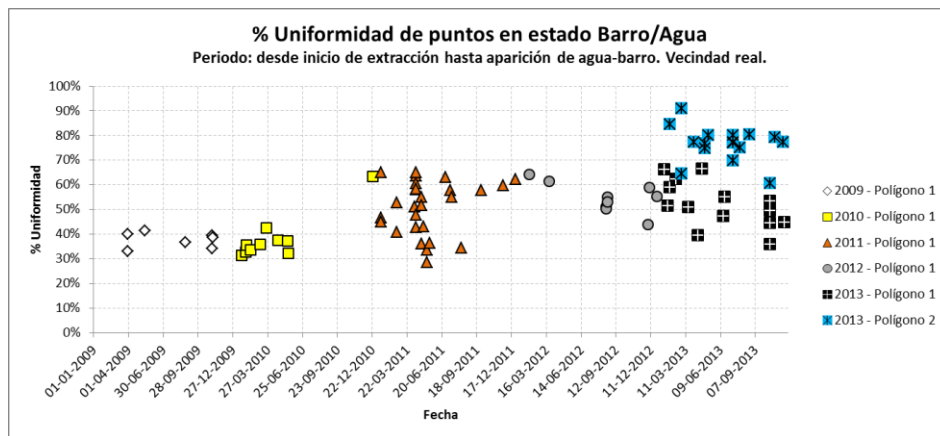


Figura 47: Porcentaje de uniformidad con que fueron extraídos los puntos con aparición de agua-barro.

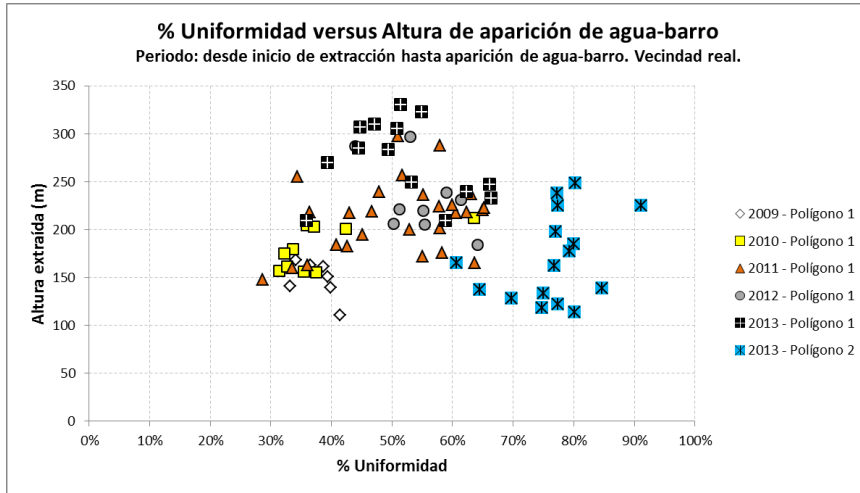


Figura 48: Porcentaje de uniformidad versus altura extraída a la que apareció agua-barro.

Si bien no existe correlación entre altura de aparición de agua-barro y uniformidad de tiraje como puntos individuales, sí existe una tendencia entre los promedios anuales de uniformidad y la altura de aparición de agua-barro.

Año	Polígono	Promedio		Coeficiente de correlación	
		Uniformidad (%)	Altura (m)		
2009	1	37.6%	148	94%	82%
2010	1	38.2%	180		
2011	1	50.8%	213		
2012	1	54.8%	232		
2013	1 y 2	65.1%	217	-	

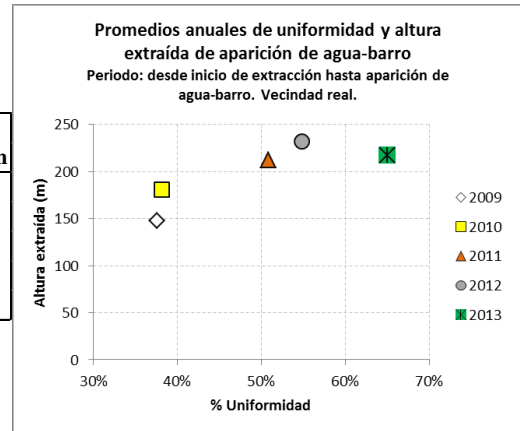


Tabla 24: Promedios anuales de “porcentaje de uniformidad” y “altura de aparición de agua-barro”.

4.9.4. Estudio de puntos de extracción precursores de ingreso de agua-barro

Como se observó en el capítulo “4.5 Secuencia de aparición de agua-barro”, página 44, la aparición de agua-barro es un fenómeno zonal y secuencial que se va dando en puntos contiguos unos a otros. Por lo tanto se analizó la uniformidad de extracción de los puntos, pero teniendo en cuenta la secuencia en que fueron reportados con agua-barro.

Para tales efectos se definieron 2 clases de puntos de extracción:

- Punto precursor: aquel que es fuente de agua-barro para su(s) vecino(s).
- Punto receptor: aquel contiguo a un precursor, y que reporta aparición de agua-barro posterior a sus precursores.

Por ejemplo, para una vecindad como la mostrada en la Figura 49, en donde los números indican la secuencia de aparición de agua-barro, se tendría que el 5to punto podría ser receptor de los puntos 3ro y 4to, y a su vez podría ser precursor del 6to punto.

La hipótesis a verificar es que el ingreso de agua-barro en un punto receptor se debe a que fue extraído con menor uniformidad que alguno(s) de sus potenciales precursores.

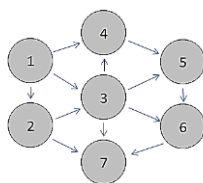


Figura 49: Ejemplo de precursores y receptores.

Para la verificación de la hipótesis, se siguieron los siguientes pasos:

1. Para cada punto potencialmente receptor se determinaron sus potenciales precursores. Esto se hizo en base a análisis de la secuencia de aparición de agua-barro.
2. Se determinó el porcentaje de extracción uniforme durante 1 mes previo a cada declaración de estado Barro/Agua (Figura 50).
3. Para cada punto receptor y sus candidatos a precursores, se compararon sus porcentajes de extracción uniforme.
4. Se determinó si un punto receptor fue extraído con menor uniformidad que sus candidatos a precursores.

Del total de 83 puntos reportados con agua-barro, se determinaron 66 puntos potencialmente receptores²³. De estos 66, 51 puntos (77%) mostraron tener al menos 1 vecino cuya extracción fue más uniforme (es decir, al menos 1 vecino precursor).

²³ Los restantes 17 manifestaron aparición de agua-barro de forma aislada (sin estar rodeado por al menos 1 punto con agua-barro).

Si a los 51 puntos anteriores se le agrega la restricción de que el receptor reporte agua-barro a una altura extraída mayor que la reportada por su precursor, la cifra cambia a 39 puntos (59% de los 66 posibles).

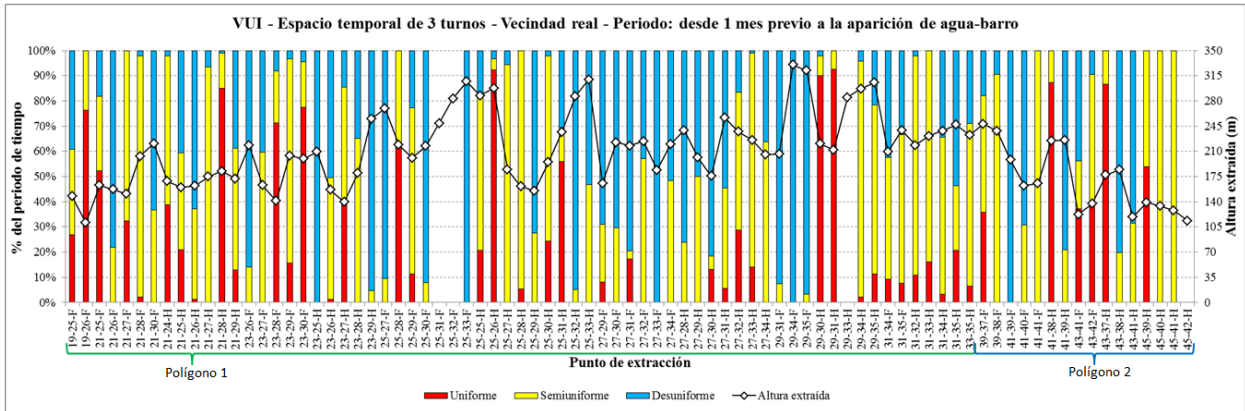


Figura 50: VUI considerando periodo desde 1 mes previo a aparición de agua-barro.

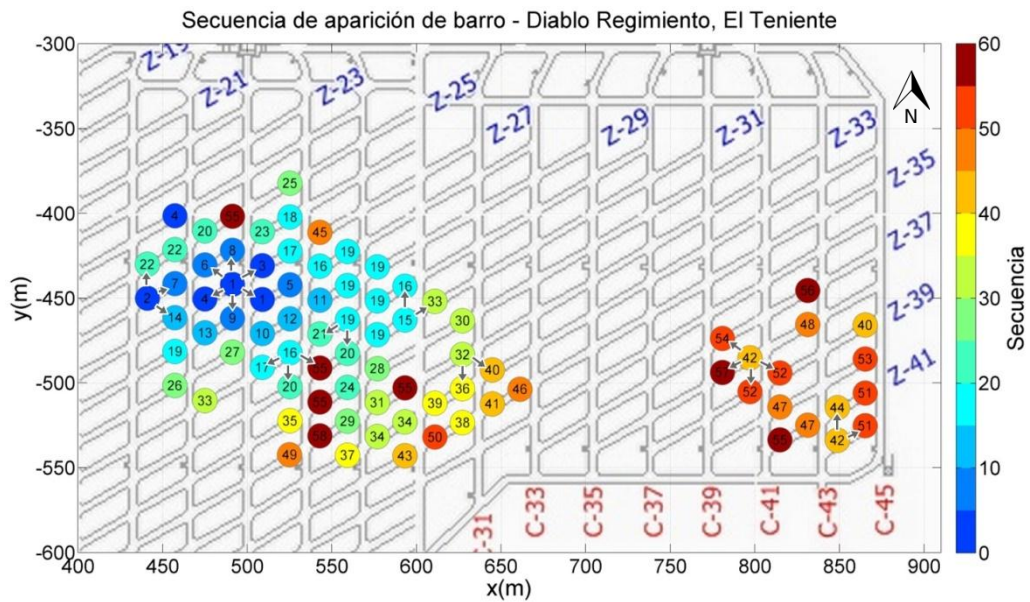


Figura 51: Algunos puntos precursor y sus vecinos receptores, marcados con flechas grises.

Otra forma de validar la hipótesis de los puntos receptores y precursor, fue observando la evolución de la uniformidad a través del tiempo. En los gráficos como el que se muestra en la

Figura 52, el eje Y representa qué porcentaje del periodo de tiempo considerado²⁴ el tiraje fue uniforme, semiuniforme o desuniforme, según corresponda. El eje X corresponde instantes en el tiempo, por lo que para un “t” determinado en el eje X, se muestra en su vertical cómo fue el tiraje durante los últimos 30 días. Cada gráfico corresponde solo a 1 punto de extracción. El eje X se graficó desde el inicio de la extracción del punto, hasta la aparición de agua barro.

El caso más demostrativo de la hipótesis planteada, es el del precursor 41-38-H. Dicho punto fue extraído con una uniformidad cercana al 90% durante casi toda la historia de extracción del punto. Sus vecinos que reportaron ingreso de agua-barro también fueron extraídos la mayor parte del tiempo con altos valores de uniformidad; sin embargo, en los últimos 3 meses varios de ellos se extrajeron semiuniformemente y con desuniformidades de hasta un 100%.

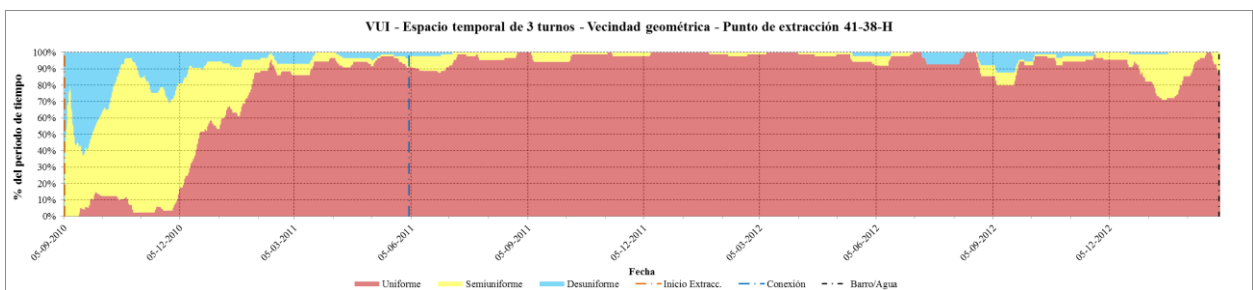


Figura 52: Evolución del VUI para punto 41-38-H, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.

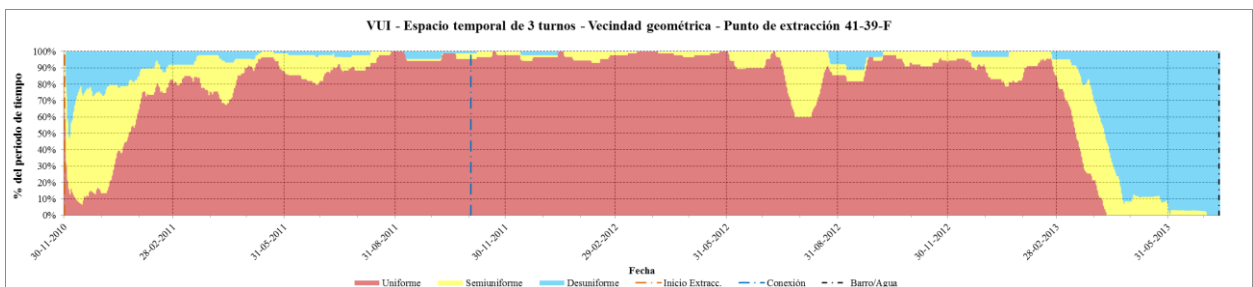


Figura 53: Evolución del VUI para punto 41-39-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.

²⁴ El periodo de tiempo que se consideró fue de 1 mes.

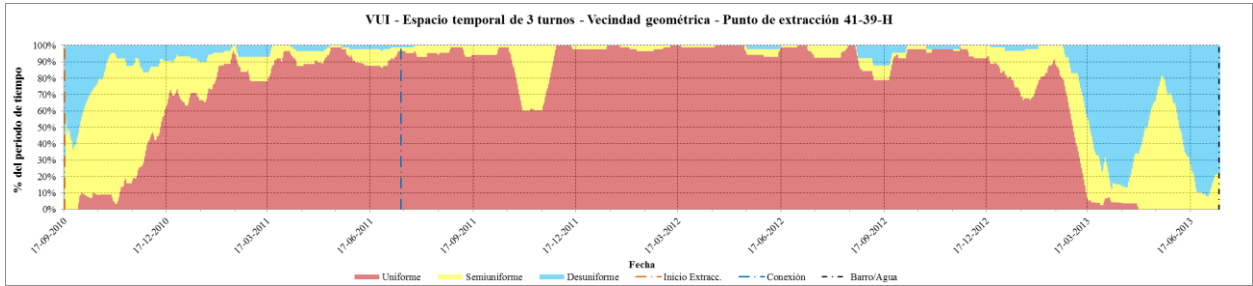


Figura 54: Evolución del VUI para punto 41-39-H, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.

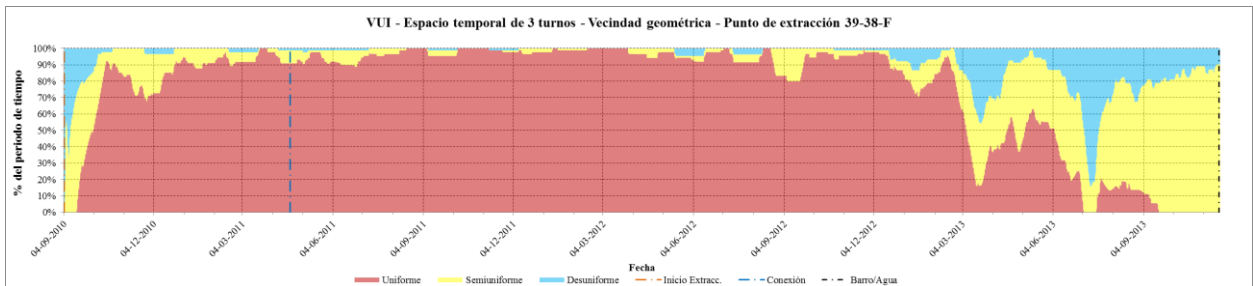


Figura 55: Evolución del VUI para punto 39-38-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.

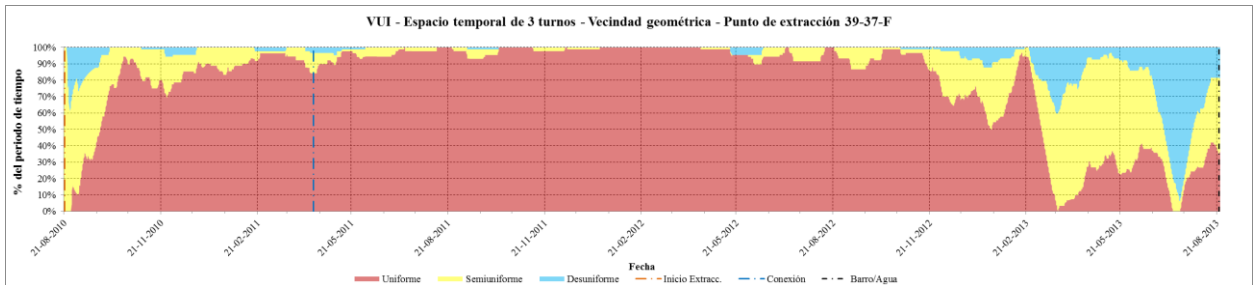


Figura 56: Evolución del VUI para punto 39-37-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.

Otros gráficos similares de casos análogos se muestran en el ANEXO D.

4.10. Tasas de extracción

Para análisis de tasas de extracción previas a la aparición de agua-barro, se eligieron algunos puntos para enfocar el análisis, en base a la altura extraída a la que ocurrió el cierre: para un mismo polígono, se eligieron puntos en que la aparición de agua-barro ocurrió a distintas alturas

extraídas. El periodo de análisis para cada punto fue desde que se inició su extracción hasta la aparición de agua-barro. Se desplegaron histogramas para visualizar la frecuencia de ocurrencia de distintas tasas de extracción²⁵.

Punto de extracción	Polígono	Altura extraída ac. (m)	Fecha estado Barro/Agua	Fecha conexión
23-27-H	1	139	31-03-2009	26-10-2006
19-25-F		148	13-05-2011	09-11-2006
25-33-H	1	310	17-06-2013	08-05-2009
29-34-F		330	25-01-2013	07-04-2009
45-42-H	2	113	11-07-2013	06-02-2012
43-41-H		119	30-04-2013	30-01-2012
39-38-F	2	238	19-11-2013	21-04-2011
39-37-F		248	23-08-2013	15-04-2011

Tabla 25: Puntos de extracción elegidos para análisis de tasas de extracción aplicadas.

Se determinó que para los puntos que fueron precursores de ingreso de agua-barro (aparición a altura extraída similar a altura in situ), sus histogramas de tasas de extracción aplicadas se centraron en el rango 0.4 a 0.5 tpd/m². Por otro lado, para aquellos puntos en que el agua-barro migró desde los puntos en donde ocurrió la aparición inicial, sus histogramas se forman por barras de altura casi constante, o bien se centran a tasas más altas que el caso anterior. Además, para estos últimos puntos la máxima tasa de extracción aplicada es considerablemente mayor que la máxima para los puntos precursores del agua-barro.

A continuación se muestra un histograma para cada caso: para un punto precursor, y para otro en que el agua-barro apareció a mayor altura extraída. En el segundo caso se observa una media superior al primer caso, y un histograma desplazado hacia la derecha.

Los histogramas de los demás puntos listados en la Tabla 25 se muestran en el capítulo ANEXO F.

²⁵ No se consideraron los días en que no hubo extracción.

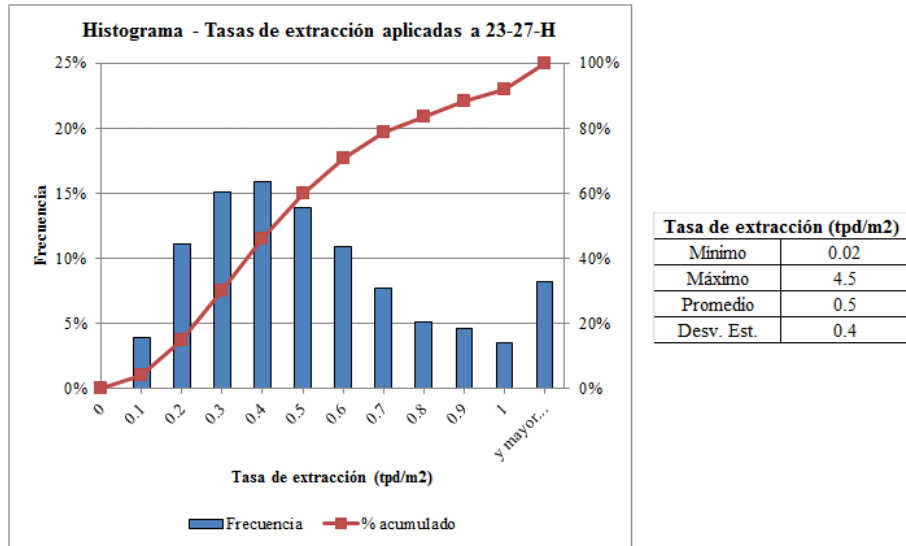


Figura 57: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 23-27-H.

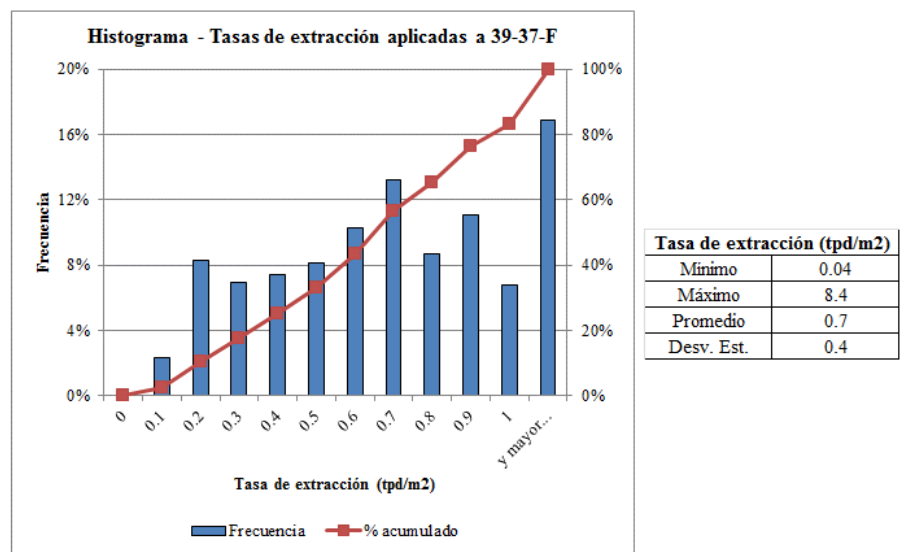


Figura 58: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 39-37-F.

4.11. Conclusiones sobre el capítulo “ANÁLISIS DEL INGRESO DE AGUA-BARRO”

El ingreso inicial de agua-barro en ciertos puntos ocurrió una vez se extrajo una altura similar a la altura de columna in situ (160 m). Por lo tanto, se concluye que los niveles antiguos actuaron como acumuladores de agua y barro, el cual posteriormente ingresó al sector Diablo Regimiento.

La razón de que el agua-barro ingresara al centro del sector Diablo Regimiento, tiene relación con la estrategia de caving implementada, mediante la cual los primeros puntos con registro de aparición de agua-barro fueron en su mayoría los primeros que conectaron con el sector Regimiento suprayacente.

El motivo por el cual el quebrado de los sectores antiguos actúa como acumulador de agua, es la superficie topográfica generada debido a la extracción. Esto es una característica inherente del método de explotación.

Dada la situación de Diablo Regimiento a la fecha de análisis en que la relación entre puntos cerrados por Barro/Agua y Operativos es de 81/171 (32%/68%), y que según la evolución de cantidad de puntos afectados se tiene que ésta es exponencial, es necesario buscar una solución al problema en términos de evitar o retrasar el crecimiento de la cantidad de puntos con agua-barro. Al respecto, el periodo con extracción tele comandada mostró ser efectivo, pues la tasa de aumento de área afectada por barro fue menor mientras se usaron equipos tele comandados.

De acuerdo a la secuencia en que el agua-barro apareció, se deduce que el fenómeno no es de carácter aislado, sino que es mayoritariamente de carácter zonal: existe una relación entre un punto y sus vecinos; el agua-barro no aparece de forma aislada, sino que en la mayoría de los casos ocurre contigua a otro punto con presencia de agua-barro. Por lo tanto, si se realizan estudios para intentar predecir la entrada de agua-barro al sector, éstos deben tomar en cuenta la relación entre puntos cercanos.

El análisis de evolución de perfiles de alturas extraídas en el tiempo denota que existió un tiraje mayoritariamente irregular en el sector. En particular, dicha irregularidad se acentúa cuando se procede al cierre de puntos por condición de agua-barro. Una vez que aparece agua-barro en un punto, éste fue migrando hacia las zonas aledañas debido a que la extracción continuó en los puntos cercanos a puntos con agua-barro. El tiraje de dichos puntos habría creado zonas de flujo preferencial de agua-barro que provocaron la migración lateral del agua-barro.

Respecto a lo anterior, se destaca la importancia de realizar extracción del agua-barro con el fin de evitar contaminar otros puntos; si el agua-barro se extrae lenta y gradualmente, la columna se va drenando y así se evita el avance lateral del barro. Por lo tanto, se concluye que la estrategia de cerrar puntos por presencia de agua-barro potencia la problemática del movimiento lateral hacia otros puntos.

Respecto al periodo que va entre el inicio de extracción y el ingreso de agua-barro, se observó que la tendencia general en el tiempo es al aumento en la uniformidad de la extracción de los

puntos. Los últimos puntos con aparición de agua-barro fueron extraídos más uniformemente que los primeros.

En base al análisis realizado mediante el Índice de Uniformidad Vectorizado, se validó la hipótesis de la aparición inicial de agua-barro en puntos precursores, con su posterior migración lateral hacia puntos vecinos debido a tiraje desuniforme y semiuniforme. Se demostró que en un 77% de 66 casos posibles de migración de agua-barro hacia puntos contiguos, los puntos receptores fueron extraídos más semi-desuniformemente que sus precursores. Por lo tanto, se corrobora el hecho de que un tiraje menos uniforme tiene incidencia en el movimiento de agua-barro hacia puntos vecinos.

Se concluye además que el Índice de Uniformidad Vectorizado es consecuente con lo mostrado en los análisis de evolución de perfiles de alturas extraídas, por lo cual se establece que es válido para realizar análisis de aparición de agua-barro. Sin embargo, no muestra correlación con la altura a la que aparece el agua-barro.

Respecto a las velocidades de extracción aplicadas a los puntos, se concluye que aquella aplicada en los puntos precursores fue menor que la aplicada en aquellos puntos hacia los cuales el agua-barro migró lateralmente. Se establece así que una de las razones de la migración lateral de agua-barro corresponde a aplicación de tasas de extracción mayores a la vecindad de un punto que ya contiene agua-barro.

5. ANÁLISIS DE ESCURRIMIENTOS

5.1. Introducción

En el capítulo anterior se estudió como fue la aparición de agua-barro en el sector Diablo Regimiento. Se puede considerar que la aparición de agua-barro es el paso previo al desencadenamiento de un evento de bombeo o escurrimiento. Sin embargo esto no siempre es así; el caso extremo es un punto sin indicios de humedad que rápidamente cambia su condición debido a una aparición súbita de agua-barro. Por lo tanto, es de interés estudiar bajo qué condiciones han ocurrido escurrimientos en el sector. Una interrogante a responder es si la causa de un evento se relaciona solamente al punto donde ocurre o bien existe alguna influencia de los puntos vecinos. De este modo, interesa saber cómo fue extraído el punto junto a su vecindad, ya sea en términos de tasa de extracción o bien, análogamente, en términos de altura extraída en el tiempo. También interesa saber cómo fue la evolución de los perfiles de altura extraída. Y más aún, qué tan uniforme fue la extracción de los puntos.

Por lo tanto, con el fin de resolver las interrogantes anteriormente planteadas, en el presente capítulo se mostrará un análisis de escurrimientos ocurridos en el sector, tomando en consideración de algunas variables de interés:

- Estados de puntos
- Alturas extraídas
- Velocidades de extracción
- Índice de Uniformidad Vectorizado

5.2. Escurrimiento en calle 25, zanja 26 oeste

5.2.1. Antecedentes del incidente

- Fecha: 09 de abril de 2011
- Hora: 21:30 hrs
- Lugar: nivel de Producción; calle 25, zanja 26 oeste
- Agente: barro
- Lesión: no hay
- Calificación: potencial grave

Descripción: el operador extrae las 3 baldadas programadas para el punto 25-26-H, el cual estaba en estado Limitado. Posteriormente, luego de volver de la tolva de vaciado en camino a extraer a

la zanja 31-H, el operador se encuentra con el escurrimiento en la zanja 26-H, el cual era de aproximadamente 4 baldadas.

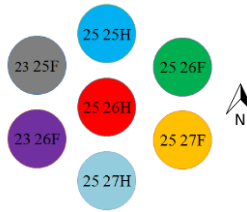


Figura 59: Vecindad del punto de extracción 25-26-H.

5.2.2. Estados de puntos de extracción

La situación de los puntos de la vecindad, previa al evento, se muestra en la Figura 60. Al respecto, la vecindad estaba compuesta por: 1 punto en estado Barro/Agua, 3 puntos en estado Limitado y 3 puntos en estado Operativo.

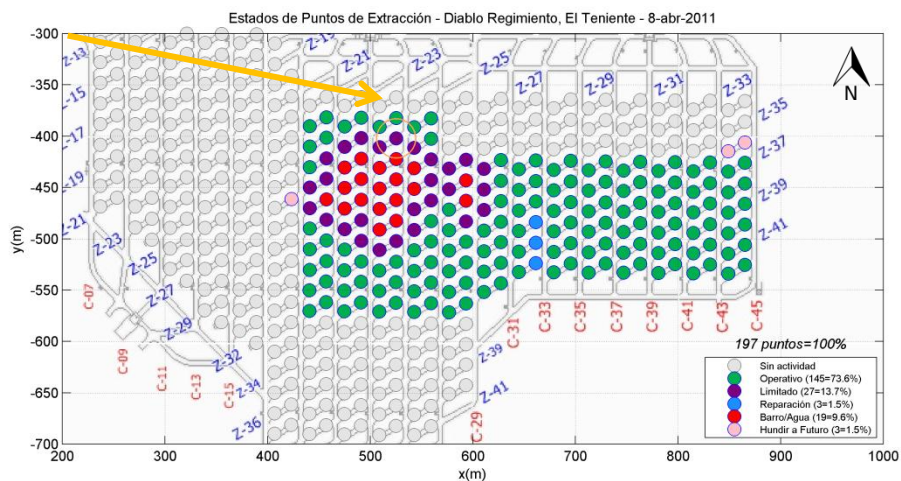


Figura 60: Estados de puntos de extracción en DR previo al incidente. 8 de abril de 2011.

La evolución temporal de estados (Tabla 26) muestra que 2 puntos estuvieron durante mucho tiempo en estado Limitado; éstos son los puntos que están al suroeste en la vecindad. Posteriormente, el punto en estudio junto al que está al sureste, pasaron a Limitado. En otras palabras, la condición crítica de humedad y granulometría avanzaba de sur a norte. Finalmente, el punto del sur de la vecindad entró en estado Barro/Agua 1 mes y medio antes del evento.

Fecha en que algún PE cambia de estado	23 25F	23 26F	25 25H	25 26F	25 26H	25 27F	25 27H	Leyenda	
01-03-2010	2	2	2	2	2	2	2	2	Operativo
23-03-2010	2	4	2	2	2	2	2	2	
25-03-2010	2	4	2	2	2	2	2	4	Limitado
05-05-2010	2	7	2	2	2	2	2	4	
18-05-2010	8	7	2	2	2	2	2	4	Reab. Extr.TC
31-05-2010	8	8	2	2	2	2	2	4	
01-07-2010	2	4	2	2	2	2	2	4	Cerrado
22-07-2010	8	8	2	2	2	2	2	4	
27-07-2010	2	4	2	2	2	2	2	4	Razones Ops.
31-07-2010	2	4	2	2	2	8	8	4	
31-08-2010	2	4	2	2	2	2	2	4	Barro/Agua
14-01-2011	2	4	2	2	2	4	4	4	
24-02-2011	2	4	2	2	4	4	12	12	
11-04-2011	4	4	4	4	12	4	12		

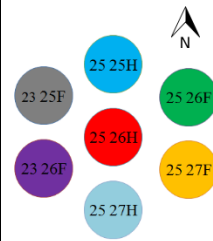


Tabla 26: Evolución de estados de la vecindad de puntos de extracción del 25-26-H.

5.2.3. Alturas extraídas

La situación de alturas extraídas cuando ocurrió el evento se muestra a la derecha de la Figura 61. Se observó que el punto en estudio fue aquel con mayor altura extraída de su vecindad (298 m extraídos).

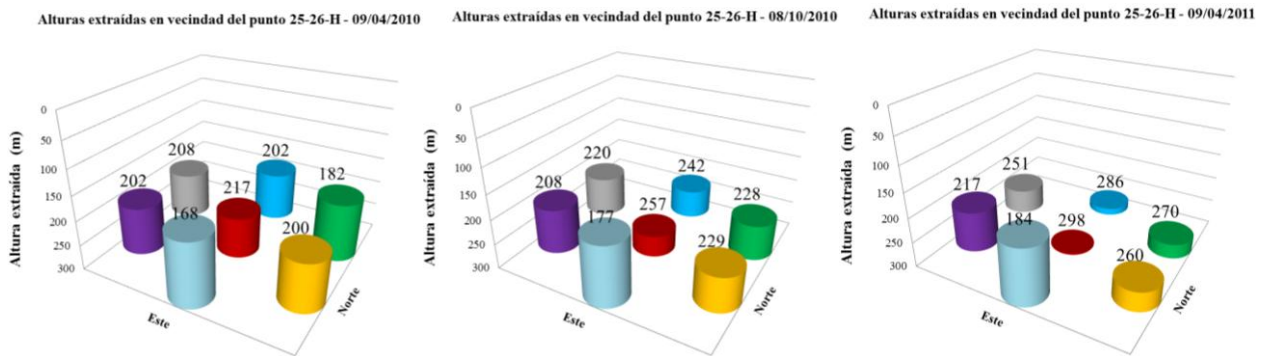


Figura 61: Alturas extraídas en la vecindad del punto 25-26-H. Izquierda: 1 año antes del evento; centro: 6 meses antes del evento; derecha: durante el evento.

La extracción preferencial hacia el norte fue debido a que el lado sur de la vecindad estaba en estado Barro/Agua y Limitado, como fue mencionado. Por lo tanto, se establece la siguiente hipótesis:

Existió migración de agua-barro desde sur a norte, favorecida por mayores tasas de extracción aplicadas tanto en los puntos del noreste de la vecindad como en el punto en estudio.

Una forma de estudiar la evolución de las tasas de extracción aplicadas, es observando cómo evolucionaron las alturas extraídas en el tiempo. Con este objetivo, se estudiaron las alturas extraídas de la vecindad, considerando 1 año, y 6, 3 y 1 meses antes del evento. Tanto para 1 año como para 6 meses antes, se observó una notoria alta tasa de altura extraída para el punto en estudio. A continuación se muestra en la Figura 62 el caso para 6 meses previos al evento.

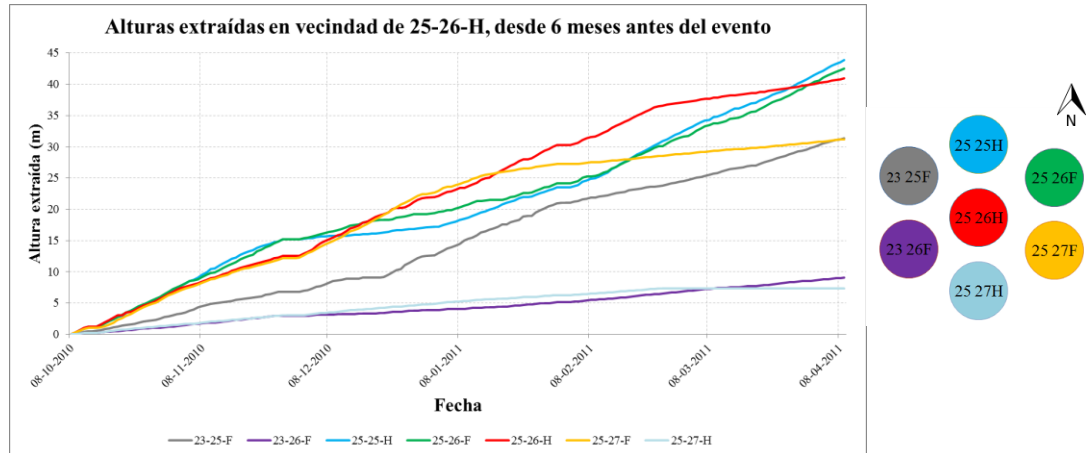


Figura 62: Evolución de alturas extraídas para punto de extracción 25-26-H y su vecindad

Del gráfico anterior se observó que de los 7 puntos mostrados, 3 mostraron mayor tasa de altura extraída a la fecha del evento (y por ende, mayor tasa de extracción). Estos fueron: 25-25-H, 25-26-F y 25-26-H (punto en el que ocurrió el escurrimiento).

Al analizar mediante regresión lineal la recta que modela la altura versus tiempo para cada punto de extracción, se obtuvo que los 3 puntos mencionados anteriormente fueron extraídos a mayor tasa (Tabla 27). En particular, aquellas pendientes bajas justamente corresponden a los puntos que mayoritariamente estuvieron en estado Limitado.

Punto de extracción	Pendiente (m/día)	R ²
23 25F	0.17	0.99
23 26F	0.04	0.99
25 25H	0.2	0.97
25 26F	0.19	0.98
25 26H	0.22	0.99
25 27F	0.16	0.93
25 27H	0.04	0.95

Tabla 27: Pendiente de rectas de regresión de alturas extraídas para vecindad de punto 25-26-H.

En la Figura 63 se muestra la situación de alturas extraídas a la fecha de ocurrencia del evento en estudio. Al respecto, se evidenció que dicho evento ocurrió en la zona con mayores alturas extraídas del sector. En particular, el punto en estudio era al que se había extraído una mayor altura. Se observó además que la zona norte de las calles 21, 23 y 25 mostraban sobre 250 m de altura extraída.

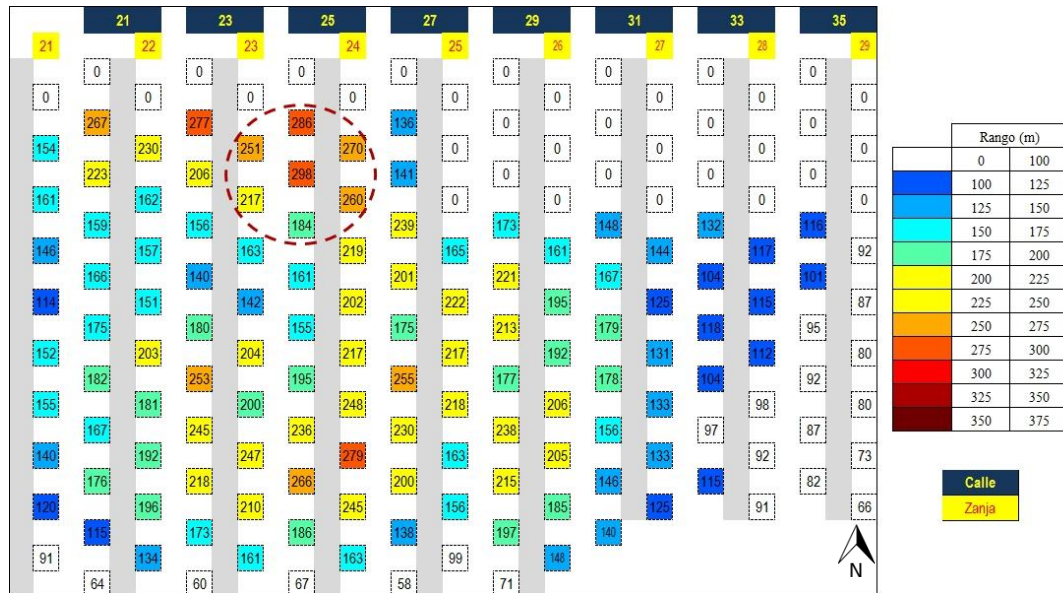


Figura 63: Situación de alturas extraídas al 09 de abril de 2011.

En la Figura 64 se muestra la evolución de perfiles de alturas extraídas acumuladas en el tiempo, para la calle 25-H, durante 2 años previos al evento. Además, se destacan en color anaranjado aquellos puntos que a la fecha del evento ya estaban en estado Barro/Agua. Cada curva fue obtenida a intervalos de 2 meses entre sí.

En la figura se observó que se mantuvo un perfil irregular de alturas extraídas debido a que los puntos en estado Barro/Agua estaban detenidos en su extracción. Debido a lo anterior, se produjo sobre extracción del punto 25-26-H con respecto a su vecino del sur, 25-27-H. En este último se observó que la aparición de agua-barro ocurrió cuando se extrajo una altura equivalente a la altura de roca in situ del punto. De esta forma, se estableció que el haber cerrado dicho punto manteniendo la extracción del 25-26-H, produjo que el agua-barro migrara lateralmente hacia el norte, al punto 25-26-H. Lo anterior se corroboró al observar la Figura 62, en la cual en los 6 meses previos al evento, al punto 25-27-H se le extrajeron casi 7 m, mientras que al 25-26-H se le extrajeron 40 m.

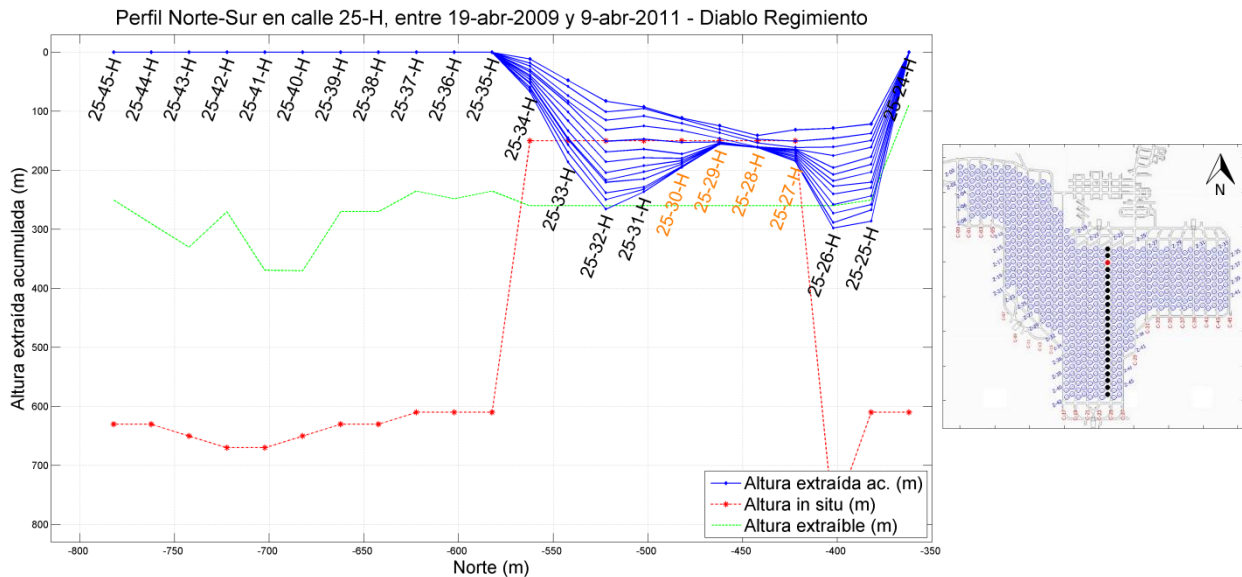


Figura 64: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección norte-sur, calle 25-H; abril-2009 a abril-2011.

Análogamente a lo observado en el perfil anterior, en la Figura 65 se observó un perfil este-oeste que pasa por el punto en estudio. En éste se observó la misma situación anterior: el punto en estudio es parte de un perfil irregular de extracción.

5.2.4. Velocidades de extracción

Según la hipótesis propuesta para el caso en estudio, el ingreso de agua-barro estaría gatillado por mayores tasas de extracción en los puntos del noreste de la vecindad, incluido el punto en estudio. Con el objetivo de verificar dicha hipótesis, se desplegaron las velocidades efectivas de extracción para los puntos de la vecindad, desde 1 año antes del evento, y considerando periodos de 30 días²⁶. Lo anterior se muestra en la Figura 66.

Se determinó que durante la ocurrencia del evento (parte final de las curvas del gráfico anterior), la velocidad de extracción del punto en estudio fue de 0.25 tpd/m^2 , muy por debajo de los máximos en ese periodo. Sin embargo, observando el periodo anual, se determinó que el máximo de las tasas de extracción, desplegado en una curva amarilla segmentada, correspondía

²⁶ Al desplegar velocidades efectivas diarias, se obtenían curvas que dificultaban su visualización. Por lo tanto, cada punto de la curva mostrada en este estudio se obtuvo considerando los tonelajes extraídos de los últimos 30 días para cada velocidad diaria desplegada.

principalmente a la alternación de las curvas celeste (25-25-H), verde (25-26-F) y roja (25-26-H). Sólo al final del periodo, la velocidad de extracción del punto decae debido a que éste pasó a estado Limitado.

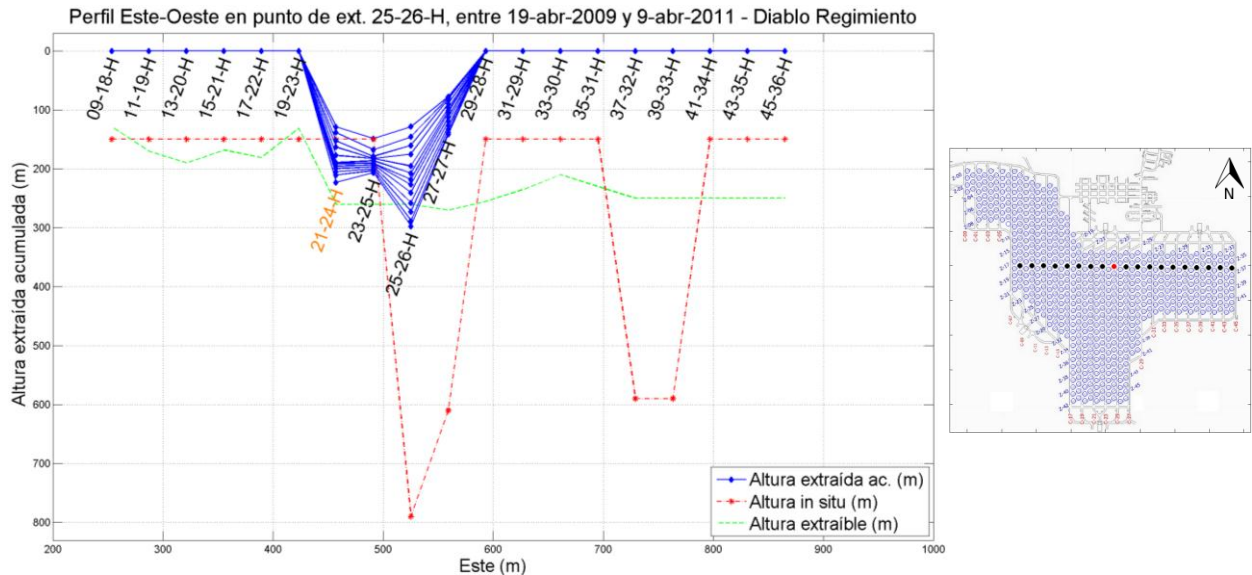


Figura 65: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección este-oeste; abril-2009 a abril-2011.

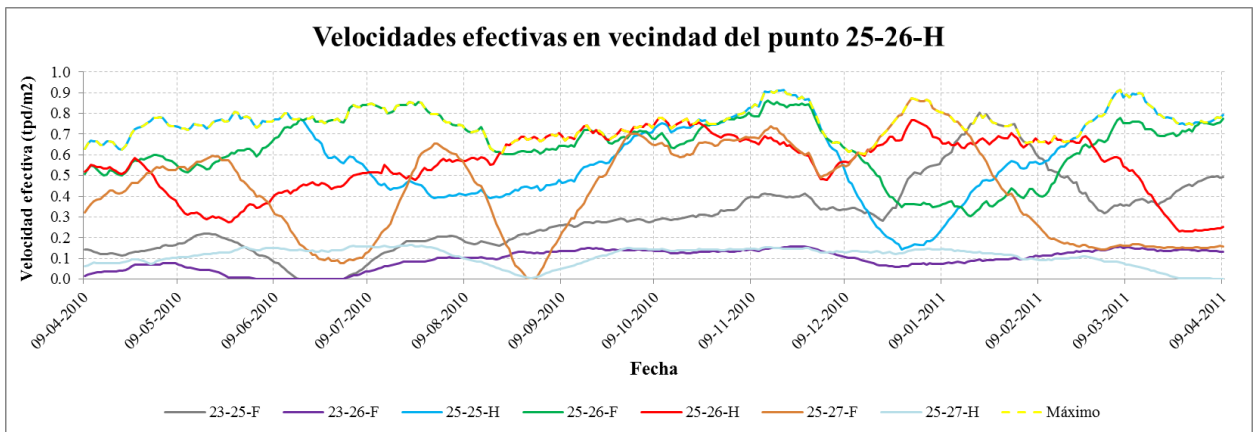


Figura 66: Velocidades efectivas en vecindad del punto 25-26-H, desde 1 año antes del evento.

Lo anterior se corroboró considerando histogramas de las velocidades de extracción. Considerando aquellas desde 1 año antes del evento, se determinó que los 3 puntos mencionados anteriormente mantuvieron un histograma desplazado hacia mayores tasas de extracción, en comparación a los otros puntos de la vecindad. Lo anterior se muestra en la Figura 67. A la izquierda se ve el caso en que las velocidades estuvieron desplazadas hacia la izquierda del

histograma. A la derecha se observa el histograma del punto que está al noreste de la vecindad; se observa que éste se desplaza más hacia la derecha (mayores velocidades). Los demás histogramas se muestran en el capítulo ANEXO H.

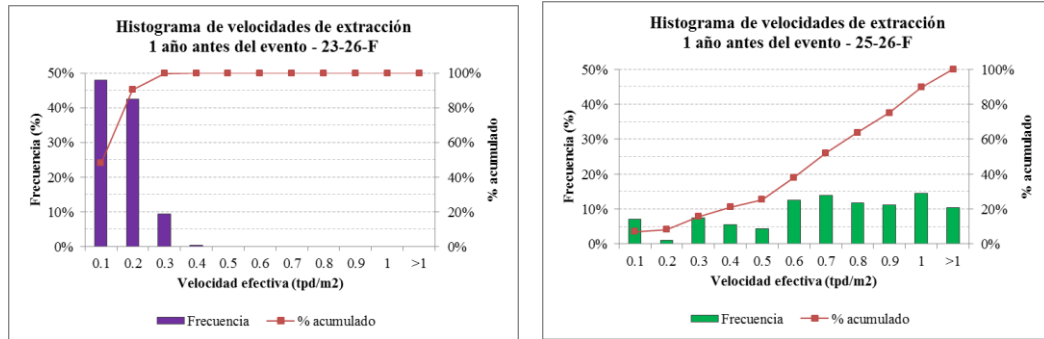


Figura 67: Izquierda: histograma de velocidades de extracción del punto 23-26-F. Derecha: histograma de velocidades de extracción del punto 25-26-H.

5.2.5. Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI)

La uniformidad fue analizada considerando periodos de 1 año, 6, 3 y 1 meses previos al evento. Al respecto, el resultado más notorio se obtuvo considerando un periodo de 1 mes previo al evento, el cual se muestra en la Figura 68.

Se determinó que el punto extraído más uniformemente fue el mismo punto en que ocurrió el evento. Sin embargo, los 2 puntos al noreste en la vecindad, fueron extraídos con desuniformidades de un 63% y un 73%. Justamente estos puntos fueron los que se extrajeron a mayor tasa durante el último mes. Destacan otros 3 puntos que fueron extraídos con sobre un 90% de semiuniformidad, que son los puntos que están al sur de la vecindad y que estaban en estados Limitado y Barro/Agua.

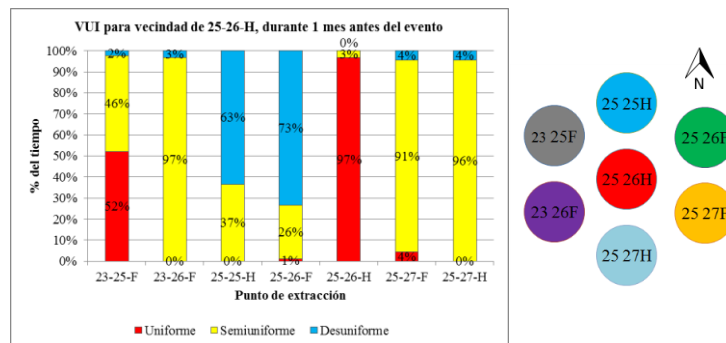


Figura 68: VUI para punto de extracción 25-26-H, durante 1 mes antes del evento.

Si se analizan los gráficos que muestran la evolución del VUI, se observa que el punto extraído más desuniformemente fue el 25-25-H, que es el que está al norte de la vecindad.

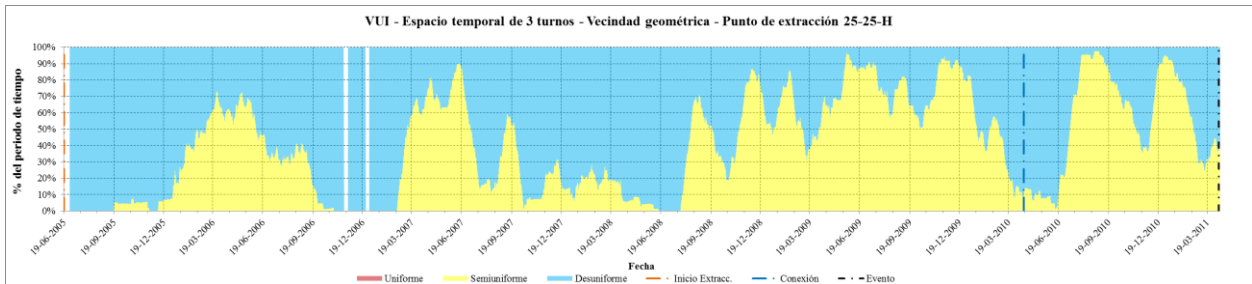


Figura 69: Evolución del VUI para punto 25-25-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

Además, la tónica respecto a la uniformidad de la extracción de la vecindad, es que se repiten ciclos de alta uniformidad, con ciclos de alta semiuniformidad. Además, mucho tiempo antes del evento, todos los puntos manifiestan al menos un periodo con 100% de tiraje desuniforme. Los otros gráficos que explican esto se muestran en el capítulo ANEXO G.

5.3. Esguerrimiento en calle 23, zanja 26 este

5.3.1. Antecedentes del incidente

- Fecha: 18 de octubre de 2011
- Hora: 13:00
- Lugar: nivel de Producción; calle 23, zanja 26Fw.

Descripción: se observó esguerrimiento por cámara de video. La calle estaba en operación mediante Automine. Antes de la extracción, el material observado era barro prensado con fino y fragmentos de mayor tamaño de hasta 20 cm. Además existía esguerrimiento de agua sin llegar a piso de zanja. Durante operación, a la quinta baldada la condición cambia repentinamente a granulometría fina con alta presencia de humedad.

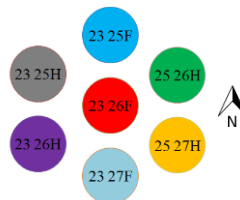


Figura 70: Vecindad del punto de extracción 23-26-F.

5.3.2. Estados de puntos de extracción

La situación de los puntos de la vecindad previa al evento se muestra en la Figura 71. Al respecto, la vecindad estaba compuesta por: 2 puntos en estado Barro/Agua y 5 puntos en estado Extracción Tele Comandada.

Según la evolución de estados de puntos de la vecindad (Tabla 28), el punto en estudio contaba con aparición de agua-barro desde el 20 de mayo de 2011. El escurrimiento ocurrió mientras se operaba con equipos tele comandados.

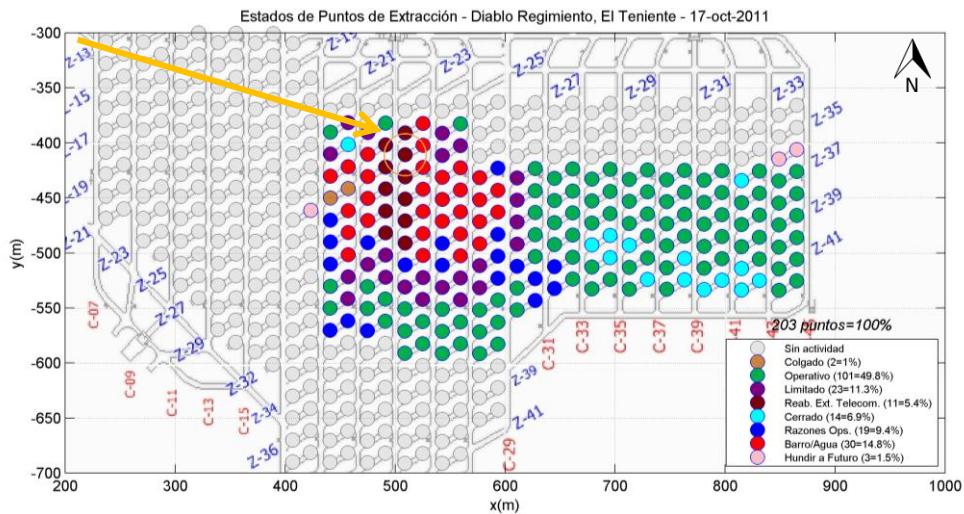


Figura 71: Estados de puntos de extracción en DR previo al incidente. 17 de octubre de 2011

Fecha en que algún PE cambia de estado	23 25F	23 25H	23 26F	23 26H	23 27F	25 26H	25 27H	Leyenda	
31-08-2010	2	4	4	12	12	2	4	2	Operativo
05-10-2010	2	4	4	4	4	2	4	4	Limitado
30-11-2010	2	4	4	12	12	2	4	5	Reab. Extr.TC
24-02-2011	2	4	4	12	12	4	12	8	Razones Ops.
11-04-2011	4	4	4	12	12	12	12	12	Barro/Agua
19-05-2011	4	8	8	12	12	12	12		
20-05-2011	4	8	12	12	12	12	12		
12-07-2011	8	8	12	12	12	12	12		
18-08-2011	5	5	5	5	5	12	12		
27-10-2011	5	5	12	5	5	12	12		

Tabla 28: Evolución de estados de la vecindad de puntos de extracción del 23-26-F.

5.3.3. Alturas extraídas

La situación de alturas extraídas cuando ocurrió el evento se muestra a la derecha de la Figura 72. Se observó que de la vecindad, el punto que está al noreste (25-26-H) fue aquel con mayor altura extraída (punto analizado en el caso anterior). Además, se observó que existió una extracción preferencial hacia el noreste de la vecindad (puntos 25-26-H, 23-25-F y 23-26-F).

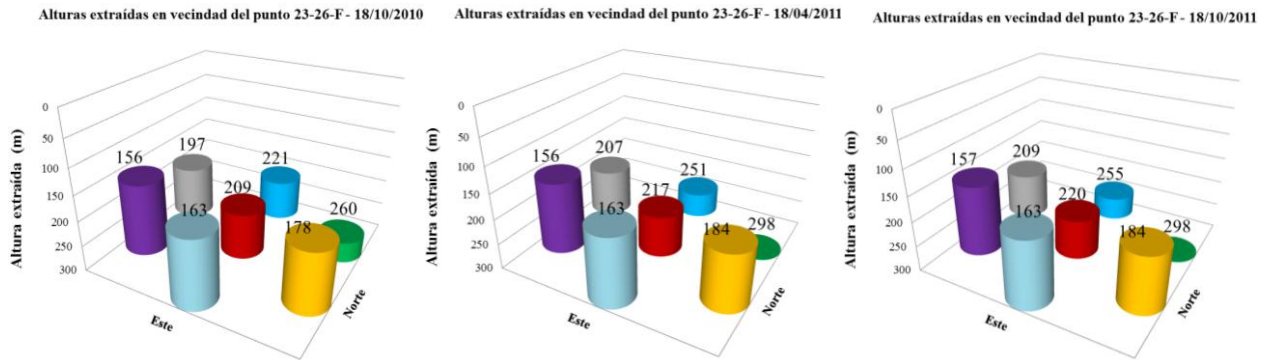


Figura 72: Alturas extraídas en la vecindad del punto 23-26-F. Izquierda: 1 año antes del evento; centro: 6 meses antes del evento; derecha: durante el evento.

En base a lo anterior, se estableció la siguiente hipótesis:

Existió migración de agua-barro desde sur a norte, favorecida por mayores tasas de extracción aplicadas en los puntos del norte de la vecindad.

Al igual que en el caso anterior, se estudiaron las evoluciones de alturas extraídas de la vecindad, considerando 1 año, 6, 3 y 2 meses antes del evento.

Se observó que desde 1 año antes, los puntos con mayor tasa de altura extraída fueron los 2 que están en el noreste de la vecindad (Figura 73). Por otro lado, analizando desde 2 meses antes del evento, se determinó que los puntos al noroeste y el punto en estudio manifestaron mayor tasa de altura extraída (Figura 74). Esto se mantuvo hasta que ocurrió el evento.

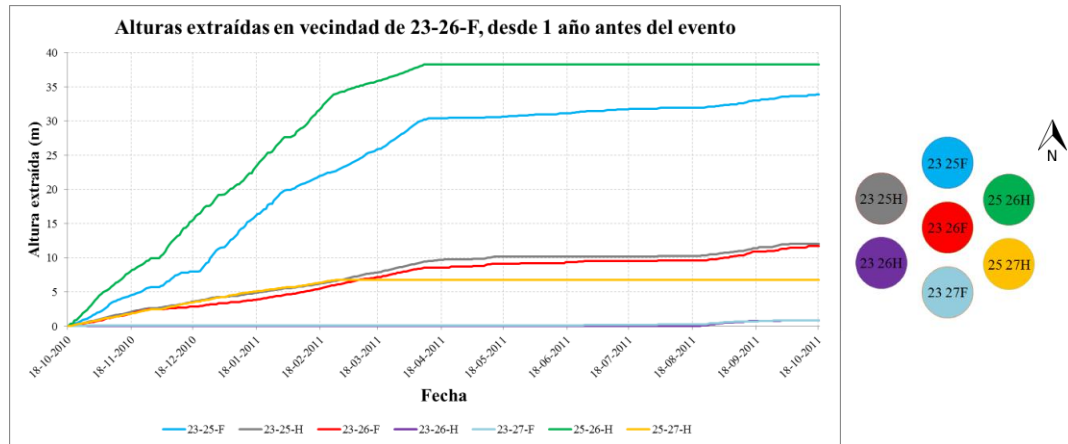


Figura 73: Evolución de alturas extraídas para punto de extracción 23-26-F y su vecindad, desde 1 año antes del evento.

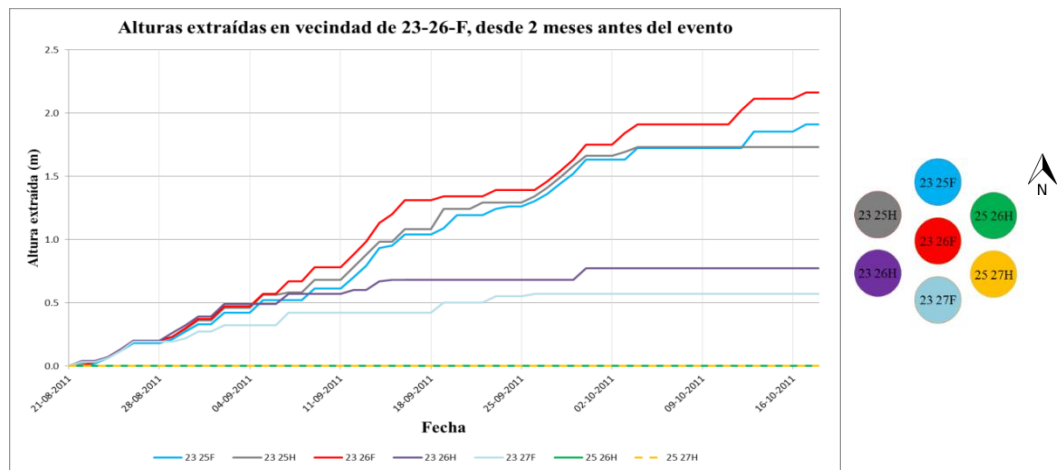


Figura 74: Evolución de alturas extraídas para punto de extracción 23-26-F y su vecindad, desde 2 meses antes del evento.

Mediantes rectas de regresión se determinó numéricamente que el punto en el cual ocurrió el escurrimiento fue extraído a mayor tasa que sus vecinos (recta de regresión con pendiente mayor), considerando 2 meses previos al evento. Es decir, se cumple la misma condición que el caso analizado anteriormente: se re-dirigió el agua-barro hacia el norte.

Punto de extracción	Pendiente (m/día)	R ²
23 26 F	4.00E-02	0.98
23 25 F	3.60E-02	0.98
23 25 H	3.50E-02	0.96
23 26 H	1.20E-02	0.79
23 27 F	8.90E-03	0.83
25 26 H	0	-
25 27 H	0	-

Tabla 29: Pendiente de rectas de regresión de alturas extraídas para vecindad de punto 23-26-F.

En la Figura 75 se muestra la situación de alturas extraídas a la fecha de ocurrencia del evento en estudio. En la vecindad del punto se observó que la altura extraída de aquellos que están al sur va entre 157 y 184 m, que corresponde aproximadamente a la altura in situ de los puntos. En otras palabras, dichos puntos pudieron haber sido la fuente de agua-barro para el punto bajo análisis. Además, se observó que de la vecindad, los puntos con mayor altura extraída a la fecha son aquellos que están al noreste; justamente uno de ellos fue el analizado en el escurrimiento anterior.

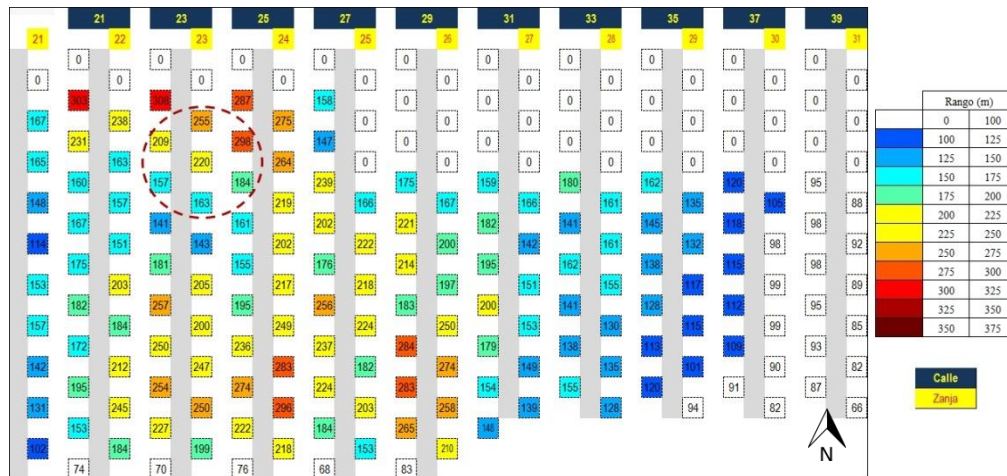


Figura 75: Situación de alturas extraídas al 18 de octubre de 2011.

La existencia de extracciones preferenciales se corroboró mediante análisis de evolución de perfiles de extracción. Tanto en la dirección norte-sur (Figura 76) como en la este-oeste (Figura 77), se observó que los perfiles de extracción pudieron crear condiciones para un escurrimiento preferencial. Además, en ambos perfiles se observó sobre extracción en el punto en estudio. En

particular, en el perfil norte-sur se observó además que existió mayor extracción en el punto 23-25-F.

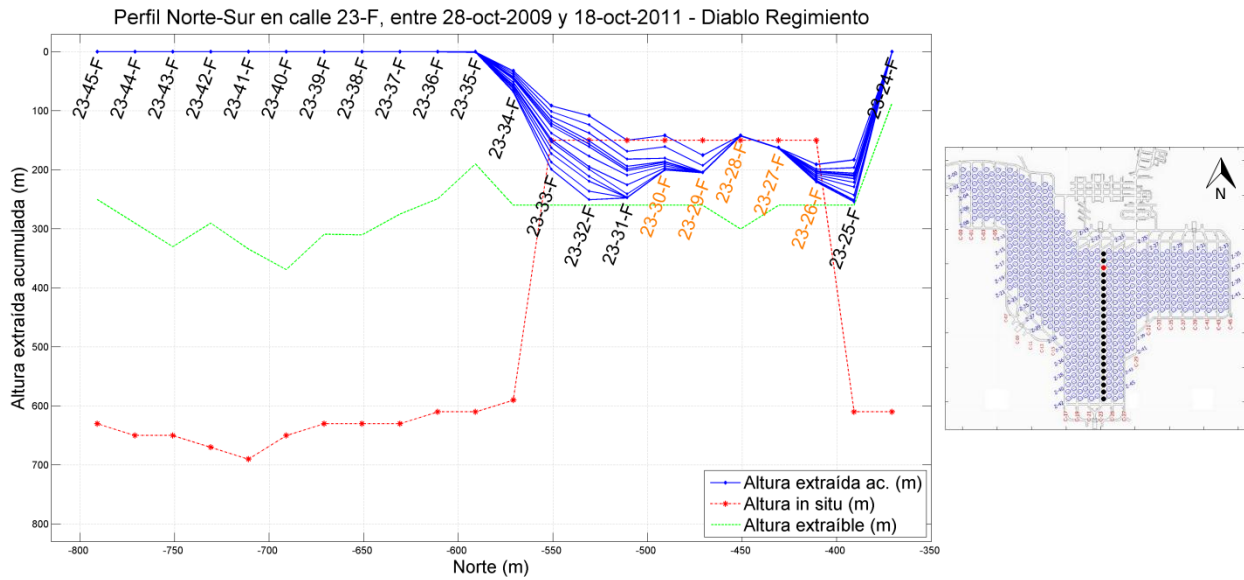


Figura 76: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección norte-sur, calle 23-F; oct.-2009 a oct.-2011

En el perfil este-oeste se observó que un punto cercano que estaba en la zona oeste ya contaba con presencia de agua-barro.

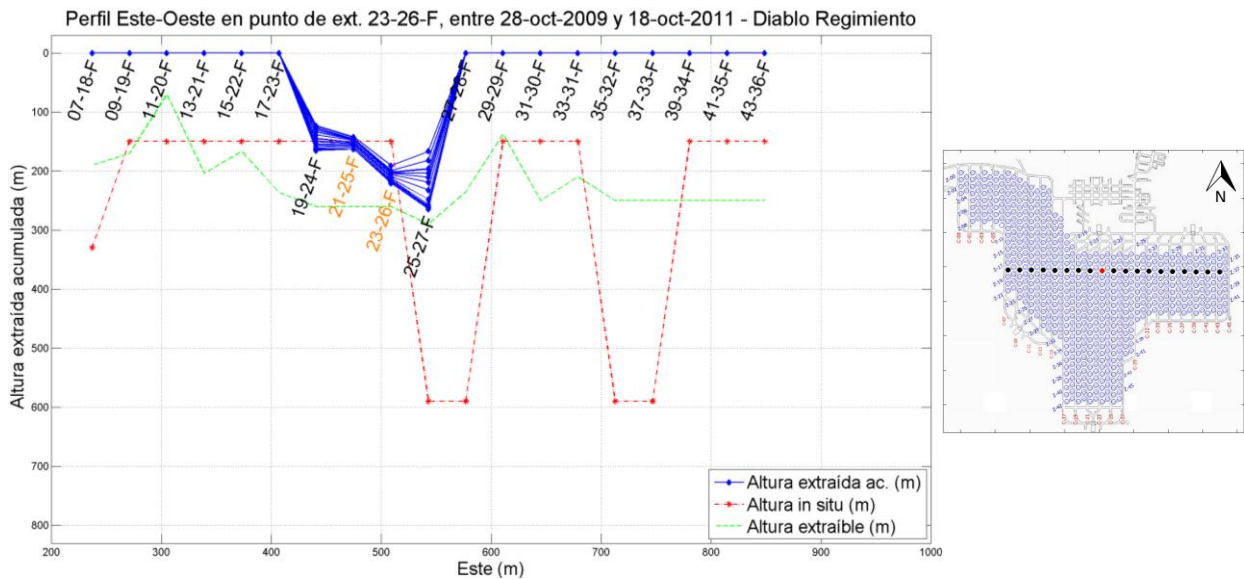


Figura 77: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección este-oeste; oct.-2009 a oct.-2011

5.3.4. Velocidades de extracción

Al analizar las velocidades de extracción aplicadas a los puntos de la vecindad en estudio, se observó que desde 1 año antes al evento, en los primeros 6 meses los puntos con mayor tasa de extracción fueron aquellos ubicados al noreste de la vecindad, lo cual es consecuente con lo mostrado en la Figura 73. Posteriormente, debido a que la condición de los puntos cambió, fueron extraídos a menor tasa.

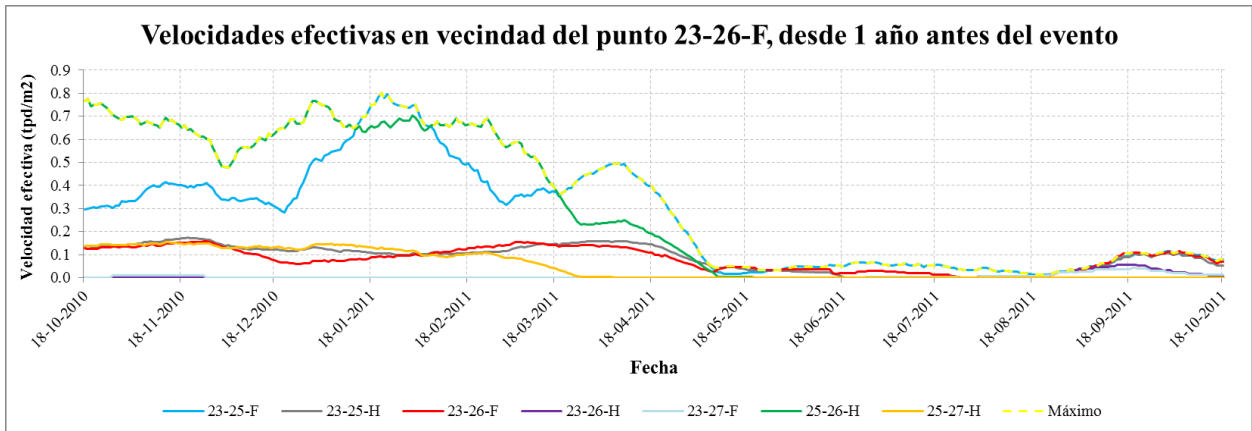


Figura 78: Velocidades efectivas en vecindad del punto 23-26-F, desde 1 año antes del evento.

Analizando las velocidades de extracción desde 1 mes antes del evento, se determinó que fueron 3 puntos los que se extrajeron a mayor tasa en la vecindad: 2 al noroeste de la vecindad, además del punto en estudio. Sin embargo, las tasas de extracción aplicadas a estos puntos fueron muy bajas en comparación a las observadas en la primera mitad del gráfico anterior.

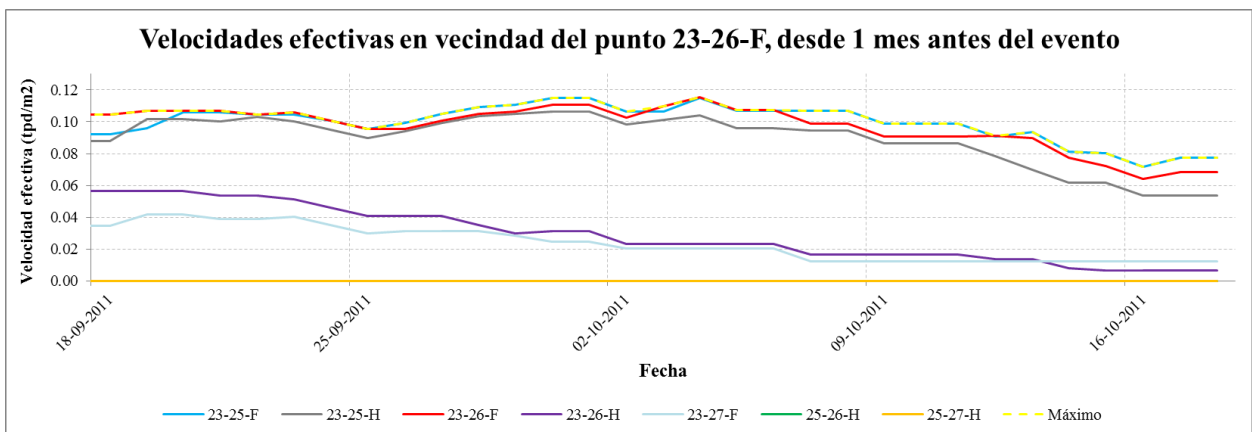


Figura 79: Velocidades efectivas en vecindad del punto 23-26-F, desde 1 mes antes del evento.

En el caso en que las tasas de extracción hayan jugado algún papel en el desencadenamiento del escurrimiento, o bien en el ingreso de agua-barro a la columna del punto en estudio, esto tuvo que haber sido por efecto de los puntos del noreste de la vecindad: 23-25-F y 25-26-H. De ser así, el periodo más crítico en términos de altas tasas de extracción fue aquel entre 6 meses a 1 año antes del evento, mostrado en la Figura 78.

5.3.5. Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI)

Al igual que en el caso anterior, el VUI fue analizado considerando periodos de 1 año, 6, 3 y 1 meses antes al evento. Para los 3 últimos casos se obtuvo que el tiraje en la vecindad fue mayoritariamente desuniforme. En particular, para el caso de 1 mes antes, se obtuvo que los 4 puntos con tiraje más desuniforme fueron el punto en estudio junto a los 3 puntos del sur de la vecindad.

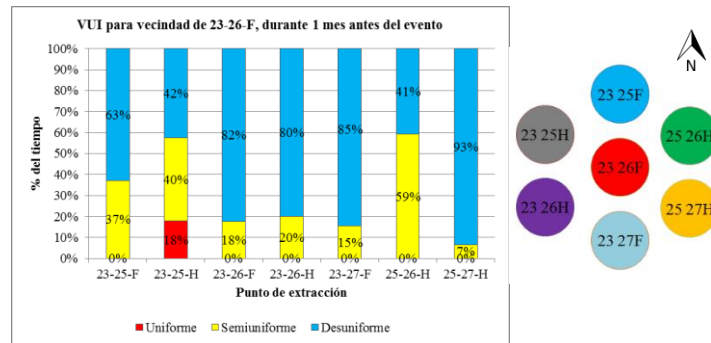


Figura 80: VUI para punto de extracción 23-26-F, durante 1 mes antes del evento.

Para el escurrimiento del caso anterior (punto 25-26-H), y haciendo una analogía entre ambas vecindades, estos mismos puntos fueron extraídos con la mayor desuniformidad en su vecindad.

Por otro lado, si se observa la evolución del VUI del punto en estudio, se pudo observar además que gran parte del tiempo previo al evento, el punto estuvo bajo tiraje desuniforme, incluso de hasta un 100% del tiempo. Además, durante meses previos al evento, se evidenció que todos los puntos que componen la vecindad del punto manifestaron tiraje desuniforme. Los demás gráficos que muestran el VUI se presentan en el capítulo ANEXO G.

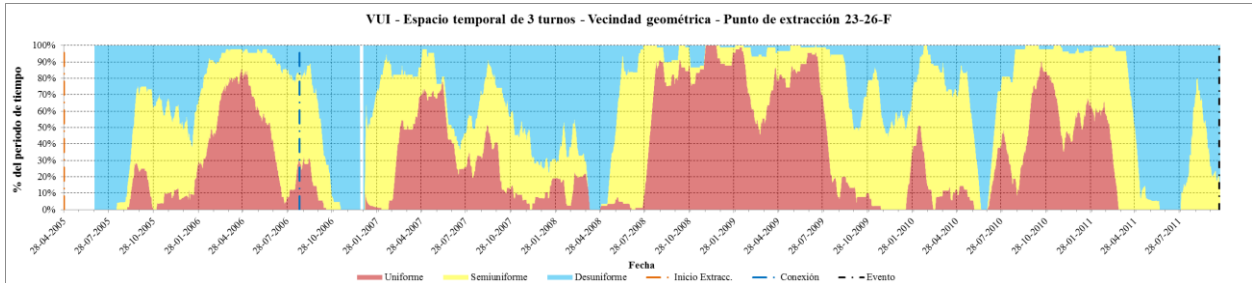


Figura 81: Evolución del VUI para punto 23-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

5.4. Esgurrimiento en calle 39, zanja 37 este

5.4.1. Antecedentes del incidente

- Fecha: 21 de agosto de 2013
- Lugar: nivel de producción de DR, calle 39, zanja 37 oeste

Descripción: ese día, una vez extraídas 3 de las 4 baldadas programadas para el turno, se observó escurrimiento de barro. Luego de esto, el punto fue cerrado colocándose colpa de contención sobre el barro.

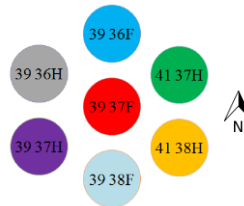


Figura 82: Vecindad del punto de extracción 39-37-F.

5.4.2. Estados de puntos de extracción

La situación de los puntos de la vecindad previa al evento se muestra en la Figura 83. Al respecto, la vecindad estaba compuesta por: 1 punto en estado Barro/Agua, 2 puntos en estado Limitado y 4 puntos en estado Operativo.

Se observó que el punto en estudio pasó directamente desde estado Operativo a estado Barro/Agua; es decir, presentó cambios rápidos en granulometría y humedad. Dado que en toda su vecindad del lado sureste había puntos con humedad, se cree que el agua-barro migró desde éstos.

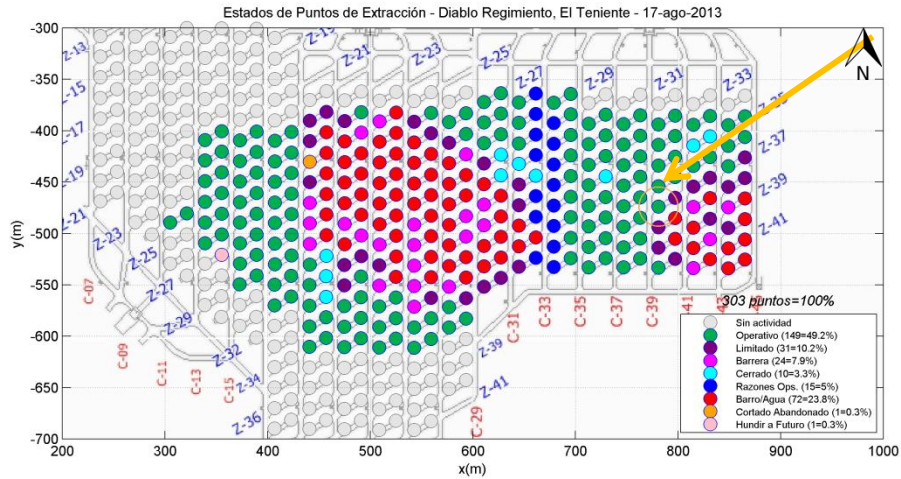


Figura 83: Estados de puntos de extracción en DR previo al incidente. 17 de agosto de 2013.

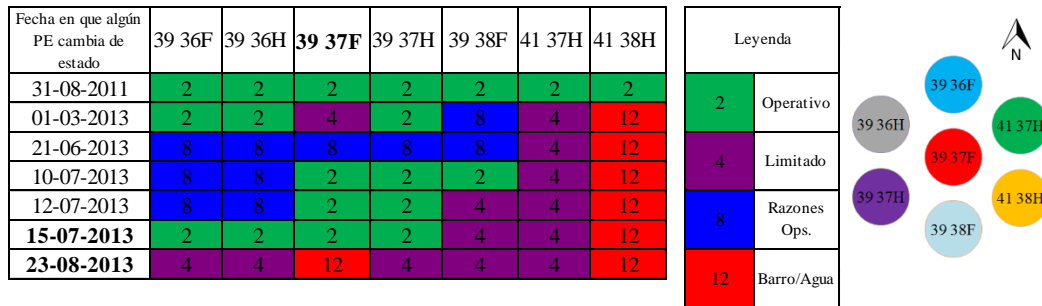


Figura 84: Evolución de estados de la vecindad de puntos de extracción del 39-37-F.

5.4.3. Alturas extraídas

La situación de alturas extraídas cuando ocurrió el evento se muestra a la derecha de la Figura 85. Se observó que existió una extracción preferencial hacia el oeste de la vecindad.

Tal situación se pudo haber debido fundamentalmente a que los puntos del sureste de la vecindad se encontraban en estado Limitado y Barro/Agua. Por lo tanto, se establece la siguiente hipótesis:

Existió migración de agua-barro desde este a oeste, favorecida por mayores tasas de extracción aplicadas tanto en los puntos del noroeste de la vecindad como en el punto en estudio.

Observando las tasas de alturas extraídas, se determinó que para el caso de 6 meses previos al evento, los puntos a los que se les extrajo mayor altura fueron justamente aquellos al noroeste de la vecindad (Figura 86). El punto que manifestó escurrimiento, para todos los periodos analizados, fue extraído a menor tasa que los puntos mencionados anteriormente.

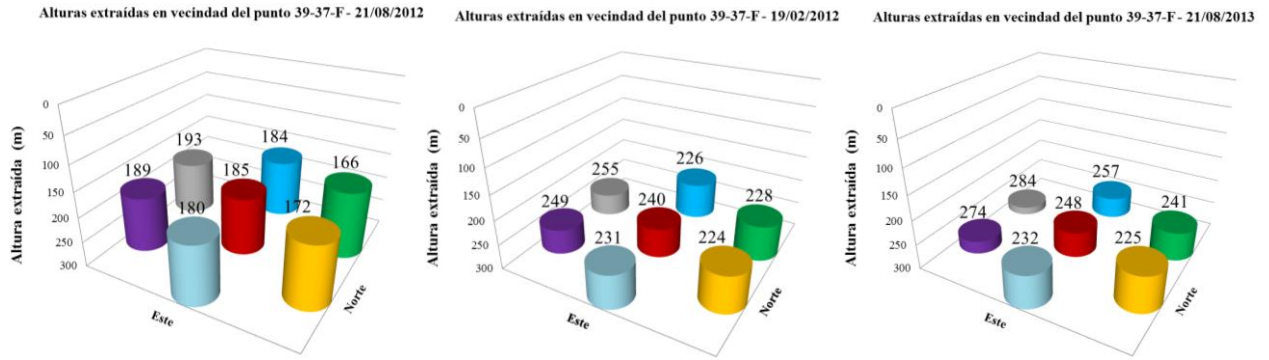


Figura 85: Alturas extraídas en la vecindad del punto 39-37-F. Izquierda: 1 año antes del evento; centro: 6 meses antes del evento; derecha: durante el evento.

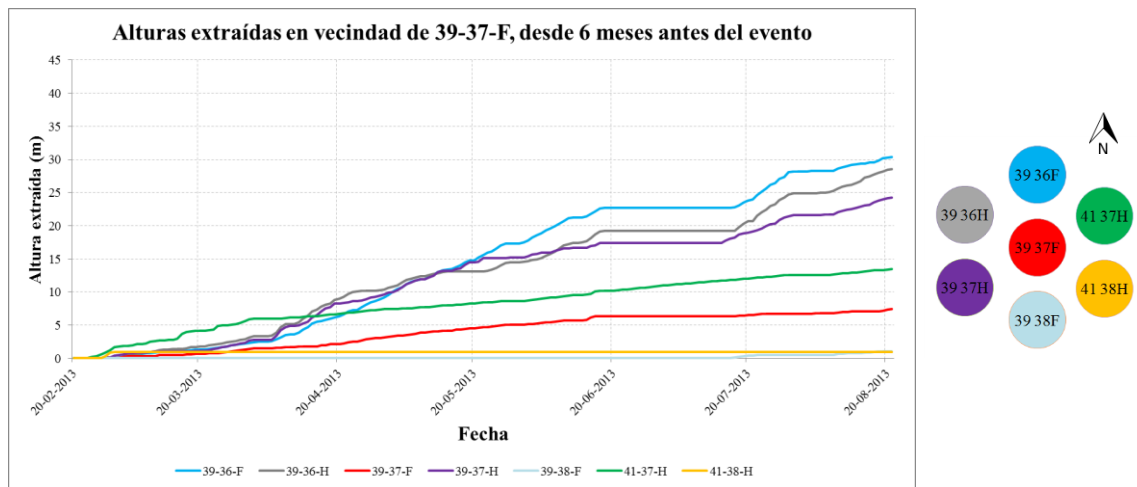


Figura 86: Evolución de alturas extraídas para punto de extracción 39-37-F y su vecindad, desde 6 meses antes del evento.

En la Figura 87 se muestra la situación de alturas extraídas a la fecha de ocurrencia del evento en estudio. Al respecto, se evidenció que dicho evento ocurrió en una zona con alturas extraídas que iban sobre los 225 m. Además, como punto vecino a puntos en estado Limitado y a uno con Barro/Agua, el punto en estudio ya contaba con mayor altura extraída que ellos.

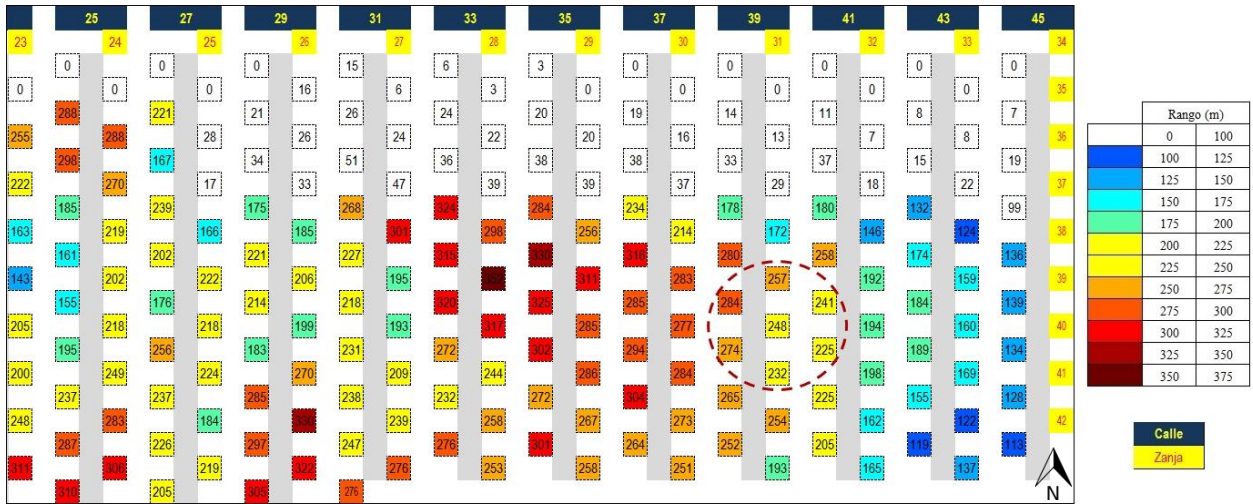


Figura 87: Situación de alturas extraídas al 21 de agosto de 2013.

Analizando la evolución de perfiles de alturas extraídas en una sección norte-sur que incluye el lado este de la calle 39, se evidenció que el punto en estudio era parte de un perfil muy regular y uniforme de extracción. Lo anterior se observa en la equidistancia existente entre cada perfil. Por lo tanto, al menos en la dirección señalada, no se cree que existieron direcciones preferenciales de flujo de agua-barro.

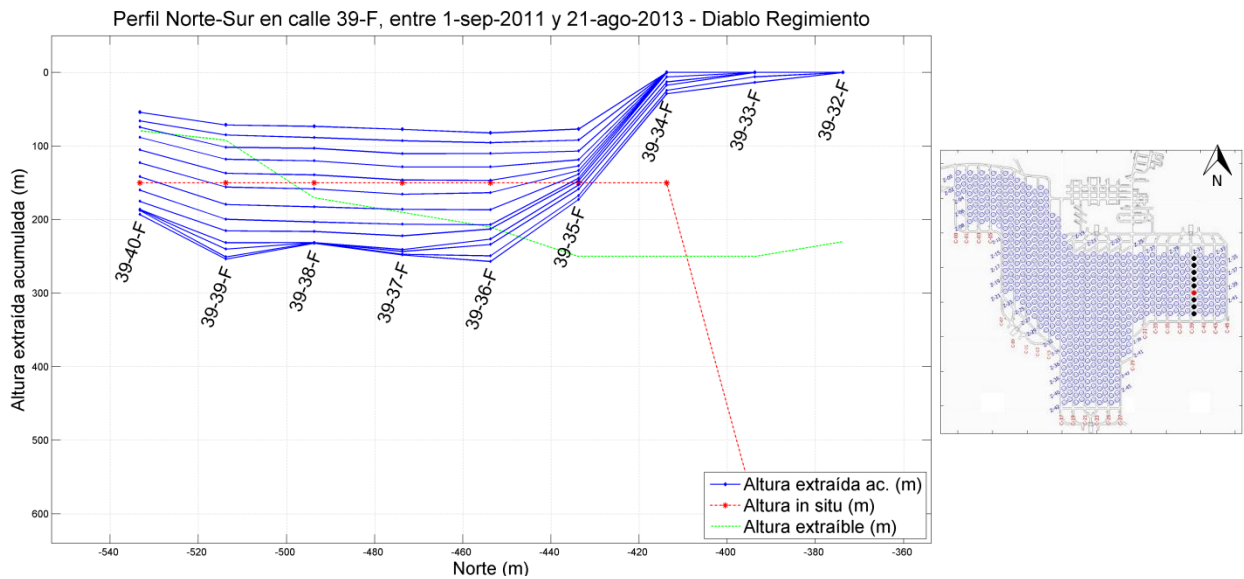


Figura 88: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección norte-sur, calle 39-F; sept.-2011 a sept.-2013.

Al analizar la dirección este-oeste, se evidenció que el punto en estudio era parte de un perfil irregular, pero no de los puntos más bajos en el perfil.

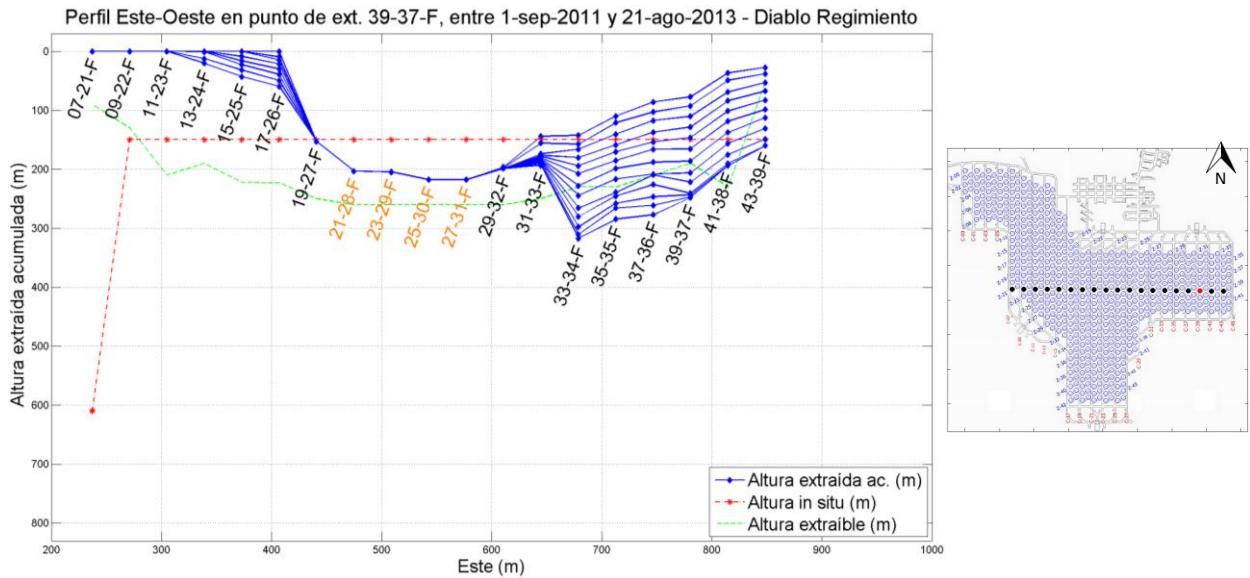


Figura 89: Evolución de perfiles de altura extraída en dirección este-oeste; sept.-2011 a sept.-2013.

En base a dicho perfil, se hubiese esperado que el punto 33-34-H hubiese estado con presencia de agua-barro. Sin embargo, se observó que posiblemente los puntos 29-32-F y 31-33-F, al no ser sobre extraídos, actuaron como barrera al movimiento lateral de agua-barro desde los puntos mostrados en color anaranjado en el perfil.

5.4.4. Velocidades de extracción

En términos de velocidades de extracción, al observar desde 1 año antes del evento, se determinó que en febrero de 2013, el punto en estudio experimentó altas tasas de extracción, superando 1 tpd/m^2 , en conjunto con los puntos 39-37-H y 39-36-H, que son los puntos que están al oeste en la vecindad.

Analizando los últimos 5 meses, se determinó que los puntos extraídos a mayor velocidad fueron justamente aquellos al noroeste de la vecindad. En particular, en el último mes, el punto con mayor tasa de extracción fue aquel ubicado al noroeste del punto en estudio.

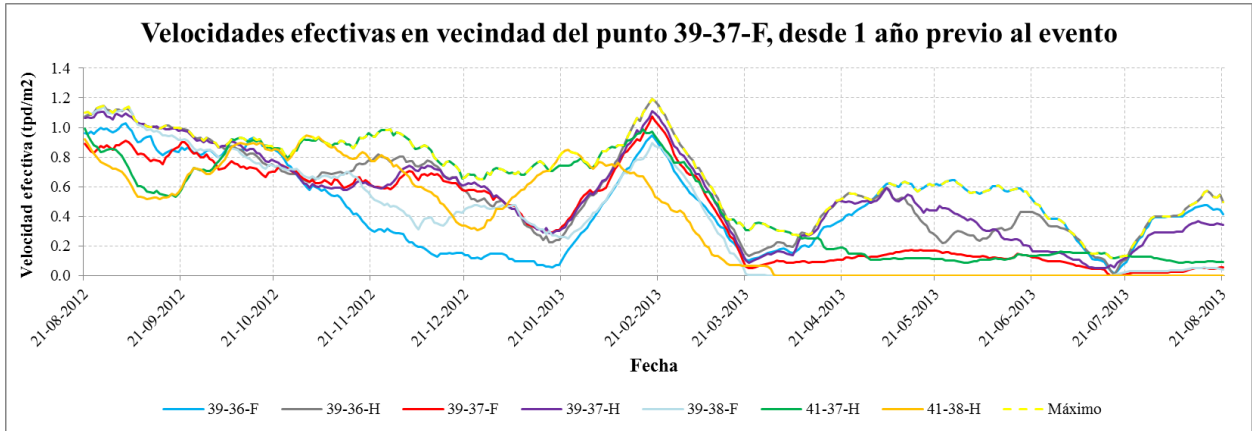


Figura 90: Velocidades efectivas en vecindad del punto 25-26-H, desde 1 año antes del evento.

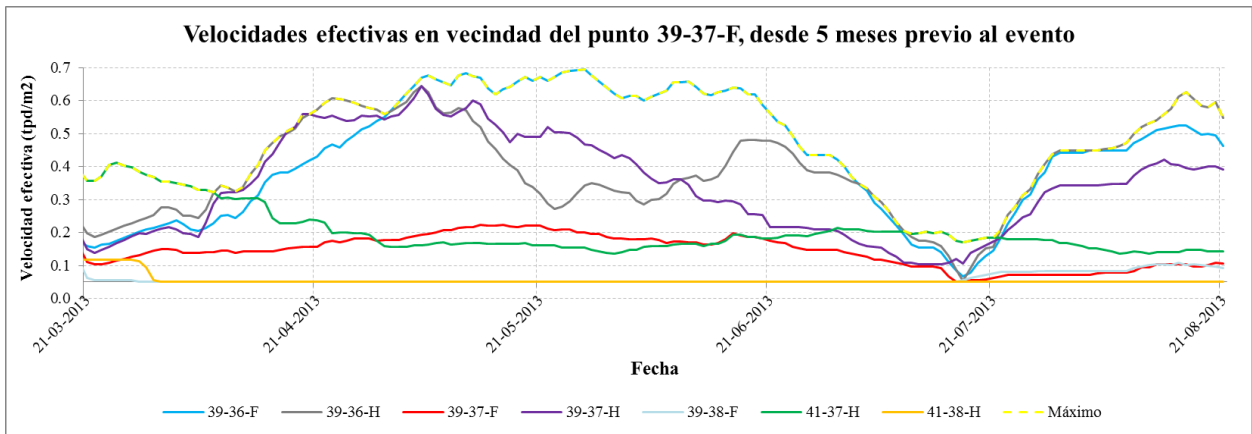


Figura 91: Velocidades efectivas en vecindad del punto 39-37-F, desde 5 meses antes del evento.

5.4.5. Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI)

Tal como se evidenció en el perfil mostrado en la Figura 88, se intuyó un tiraje uniforme para el punto en estudio. Aún con tiraje uniforme, el escurrimiento de todas formas sucedió.

Al tomar en cuenta el periodo que va desde 1 año previo al evento, se evidenció un tiraje muy parecido entre los puntos de la vecindad, en términos del valor que tomó el VUI para cada uno. La proporción de tiraje uniforme varió entre un 53 y un 63%, lo cual es un margen razonablemente acotado. Además, se mantuvo la proporción de desuniformidad a niveles bajo el 18%.

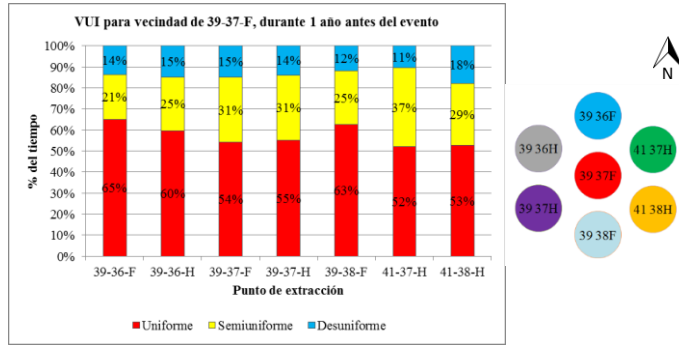


Figura 92: VUI para punto de extracción 39-37-F, durante 1 mes antes del evento.

Sin embargo, si se analiza desde el periodo que va desde 1 mes antes del evento, se determinó que el punto con tiraje más desuniforme fue aquel que se encontraba en estado Barro/Agua (41-38-H). Similarmente, los más desuniformes fueron aquellos puntos que estuvieron en estado Limitado. De los 4 puntos restantes, el que manifestó tiraje más desuniforme (aunque moderadamente), fue el punto en el que ocurrió el evento.

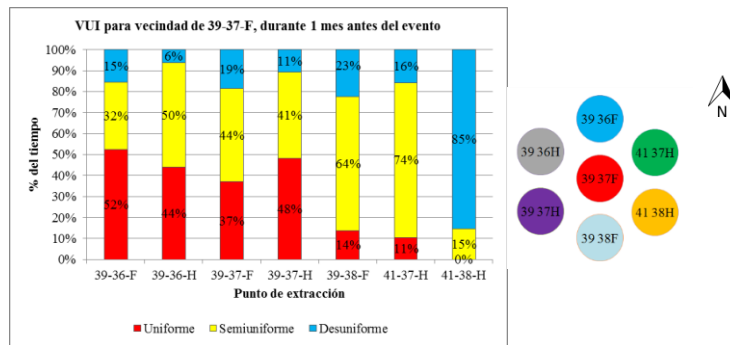


Figura 93: VUI para punto de extracción 39-37-F, durante 1 mes antes del evento.

Por otro lado, al observar la evolución del VUI a través del tiempo, se determinó que todos los puntos de la vecindad manifestaron un tiraje muy uniforme, pero en corto periodo previo al evento, dicha uniformidad cayó abruptamente, pasando a tirajes semiuniformes y desuniformes.

5.5. Resumen sobre lo observado en el análisis de escurrimientos

Punto de extracción	Número de puntos de extracción por estado				Máx. Velocidad Extracción, último año (tpd/m ²)	
	Limitado	Barro/Agua	Operativo	Ext. Tele Comandada	PE en estudio	Vecinos
25-26-H	3	1	3	0	0.77	0.91
23-26-F	0	2	0	5	0.18	0.8
39-37-F	2	1	4	0	1.1	1.2

Punto de extracción	Altura extraída acumulada (m)			Desv. Est. Alturas extraídas en vecindad durante evento (m)	
	Máx. en vecindad	Mín. en vecindad	Diferencia	Valor	Comportamiento previo al evento
25-26-H	298	184	114	40	Creciente
23-26-F	298	157	141	21	Creciente
39-37-F	284	225	59	21	Creciente

Punto de extracción	Observaciones
25-26-H	Altas tasas de extracción en el punto, junto a gran altura extraída acumulada.
23-26-F	Extracción preferencial hacia un vecino que comparte batea con el punto donde ocurrió el evento. Altas tasas de extracción en el vecino, junto a gran altura extraída acumulada.
39-37-F	Altas tasas de extracción en el punto y algunos vecinos.

Tabla 30: Resumen sobre lo observado en el análisis de escurrimientos.

5.6. Conclusiones sobre el capítulo “ANÁLISIS DE ESCURRIMIENTOS”

En los 3 escurrimientos analizados, al menos 1 punto contaba con presencia de agua-barro (estado Barro/Agua). Se concluye entonces que los puntos en este estado definen un radio de riesgo de bombeo o escurrimiento. Todos los escurrimientos estuvieron asociados a extracciones preferenciales en alguna dirección, en términos de alturas extraídas. Lo anterior se debió principalmente a la existencia de puntos en estados Limitado y Barro/Agua en las vecindades analizadas.

En 2 de los 3 casos, el punto en que ocurrió el evento fue extraído a mayor tasa de altura, previo al evento. En el tercer caso el punto, si bien estaba en estado Operativo, manifestaba tasas de altura extraída propias de un punto Limitado. Se concluye entonces que sólo en los 2 primeros casos la tasa de altura extraída pudo haber sido determinante de la ocurrencia del evento.

En los 3 casos analizados, los puntos fueron máximos locales o globales de alguno de los perfiles de alturas extraídas, de entre la serie de perfiles desplegados en cada dirección para cada punto. En otras palabras, los 3 casos fueron parte de perfiles irregulares de extracción. Si bien el tercer caso era parte de un perfil muy regular en la dirección norte-sur, en el perfil este-oeste era parte de uno irregular. Por lo tanto, se concluye la importancia de los perfiles de altura extraída por zonas o puntos, como herramienta de análisis de la ocurrencia de eventos asociados al agua-barro.

Asociado a los puntos anteriores, se estableció la hipótesis de que la principal causa de aparición de agua-barro en los puntos analizados fue una migración lateral del mismo. El detener la extracción de puntos con presencia agua-barro, implica un reacomodo del mineral en la columna; de esta forma, el confinamiento al que es sometido el mineral saturado aumenta. Dado que el agua-barro tiene mayor capacidad de fluir, al estar confinado y al existir una columna aledaña con movimiento, éste migrará lateralmente afectando a los puntos cuya columna está en movimiento.

Respecto a los puntos en donde ocurrieron los eventos, el valor que tomó el VUI para los 3 casos fue muy disímil. Se concluye entonces que el valor del VUI no necesariamente es indicador de un escurrimiento (considerando el periodo de 1 mes inmediatamente anterior a los eventos); sólo reflejó la calidad del tiraje en términos de uniformidad.

Con respecto a la evolución del Índice de Uniformidad Vectorizado, en todos los casos se observó que previo a la ocurrencia del evento, la mayoría de los puntos de la vecindad mostraron periodos con alta semiuniformidad o desuniformidad (hasta un 100%). Para el tercer caso analizado, la vecindad fue extraída con altos niveles de uniformidad, pero previo al evento, se

evidenció que ésta decreció notablemente. Se concluye entonces, que es de mayor utilidad observar la evolución del VUI a través del tiempo (ver capítulo ANEXO G), en comparación a observarlo para un periodo fijo. En otras palabras, la evolución del VUI permite anticipar en cierta medida la aparición de agua-barro.

En base a la observación hecha anteriormente, parece ser que el VUI podría ser un buen indicador del ingreso de agua-barro a una columna, pero en términos categóricos (si ingresará o no). Dado que no se sabe cómo determinar con exactitud cuándo ocurre dicho ingreso a una columna, y junto a lo anterior, no se sabe la correlación temporal entre el ingreso y la posterior aparición en el nivel de producción, no se tiene una conexión directa entre el VUI y la generación de un escurrimiento.

Del análisis de los casos, se obtienen las siguientes lecciones:

No se deben aplicar altas tasas de extracción a un punto inmediato a otro con barro. Lo ideal es que exista una franja de puntos con extracción controlada que minimicen el movimiento lateral de agua-barro. Esto es consecuente con el uso del estado Limitado por parte de División El Teniente. Sin embargo, sería recomendable que no sólo fuera 1 hilera de puntos limitados, si no que al menos 2.

Aplicar altas tasas de extracción a un punto, puede hacer que se sature su punto contiguo de la misma batea. Esto se evidenció en los 2 primeros casos analizados. Por lo tanto, se concluye que es altamente recomendable, que al detectarse contenidos críticos de granulometría y humedad en un punto, detener la extracción de su punto contiguo de batea. Tal es el caso del estado Barrera usado en División El Teniente.

6. CONCLUSIONES Y ENFOQUE FUTURO

En el presente trabajo se realizó un análisis sobre la aparición de agua-barro en el sector Diablo Regimiento de Mina El Teniente, Codelco. El análisis se realizó en 3 ejes:

- Potencial económico del mineral saturado remanente
- Análisis general de aparición de agua-barro
- Análisis de escurrimientos

A continuación se muestran las principales conclusiones del trabajo realizado, así como recomendaciones y enfoque futuro.

6.1. Conclusiones del trabajo de Memoria de Título

Uno de los impactos de la presencia de agua-barro en las columnas de mineral, es la consecuente pérdida de reservas, debido principalmente a una redefinición de las alturas económicas extraíbles con el fin de no incorporar en los planes de producción la extracción de mineral saturado. De esta forma, existe un remanente no extraído que fue necesario cuantificar.

La cuantificación del mineral saturado remanente en el sector Diablo Regimiento mostró ser bastante interesante en términos económicos. En la evaluación, el resultado más conservador obtenido fue de 2.4 Mt de mineral con ley media de 0.68% de CuT. El mejor caso, considerando remanentes actuales y remanentes a futuro, fue de 20.5 Mt con ley media de 0.55% de CuT. Ambos casos representan 0.3 y 2.3 años de producción, respectivamente, a un ritmo de 25 ktpd.

En términos de leyes de cierre, los resultados obtenidos también fueron positivos, pues casi todos los puntos cerrados por condición de agua-barro lo fueron a leyes superiores a las leyes de cierre por agotamiento.

De acuerdo al análisis bibliográfico del fenómeno, algunos autores mencionan que uno de los factores que inciden en el ingreso de agua-barro a un sector, es la existencia de niveles antiguos que actúan como acumuladores de agua. Del análisis de aparición de agua-barro realizado, se concluyó que el ingreso inicial en ciertos puntos ocurrió una vez que se extrajo una altura similar a la altura de columna in situ. Por lo tanto, se corroboró lo dicho anteriormente.

Respecto a la razón de que el agua-barro ingresara al centro del sector Diablo Regimiento, se determinó que esto tuvo relación con la estrategia de caving implementada, mediante la cual los primeros puntos con registro de aparición de agua-barro fueron en su mayoría los primeros que conectaron con el sector Regimiento suprayacente.

Concerniente a la secuencia en que apareció el agua-barro, se dedujo que el fenómeno no fue de carácter aislado, sino que fue mayoritariamente de carácter zonal: existió una relación entre un punto y sus vecinos. En otras palabras, el agua-barro no apareció de forma aislada, sino que en la mayoría de los casos ocurrió contigua a otro punto con presencia de agua-barro. Más importante aún es el hecho de que junto a un punto en que el agua-barro apareció a una altura extraída similar a su altura in situ, en sus puntos vecinos la aparición ocurrió a mayor altura extraída. Por lo tanto, se concluye la existencia de puntos precursores de ingreso de agua-barro como potencial fuente hacia sus puntos vecinos.

Respecto a las estrategias de extracción aplicadas, el análisis de evolución de perfiles de alturas extraídas en el tiempo mostró que existió un tiraje mayoritariamente irregular en el sector. La aparición de agua-barro estuvo estrechamente asociada a lo anterior, ocurriendo en la mayoría de los casos en puntos que fueron máximos locales o globales de un perfil de alturas extraídas.

El uso del Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI) mostró ser útil en términos de realización de análisis de aparición de agua-barro, pero no en la predicción de la generación de escurrimientos. Principalmente, la utilidad del índice se evidenció en aquellos puntos en que el agua-barro apareció como consecuencia de tener un punto precursor en su vecindad.

Respeto al Índice de Uniformidad de la Pendiente (SUI), se determinó que no es aplicable en términos de análisis de aparición de agua-barro, pues mostró un comportamiento contradictorio respecto a la evolución de perfiles de alturas extraídas y del Índice de Uniformidad Vectorizado.

En relación a las tasas de extracción aplicadas a los puntos, se concluye que la tasa de extracción aplicada en los puntos precursores fue menor que la aplicada en aquellos puntos hacia los cuales el agua-barro migró lateralmente. Se establece así que una de las razones de la migración lateral de agua-barro corresponde a la aplicación de tasas de extracción mayores a la vecindad de un punto que ya contiene agua-barro.

Cabe destacar que, si bien se menciona la migración lateral de agua-barro y la existencia de niveles antiguos suprayacentes como causas del ingreso de agua-barro al sector, de todas formas puede existir una combinación de mecanismos, incluyendo sobre extracción e ingreso directo de agua-barro desde superficie. Sin embargo, para corroborar esto último, se deben realizar estudios más detallados que consideren una correlación temporal entre la existencia de agua-barro en la superficie topográfica y la detección de agua-barro en el nivel de producción.

Con respecto al análisis de escurrimientos, se evidenció que todos los escurrimientos estuvieron asociados a direcciones preferenciales de tiraje en términos de alturas extraídas. Además, los 3

casos analizados ocurrieron en puntos en cuyas vecindades existía al menos 1 punto con presencia de agua-barro.

Respecto a la evolución de perfiles de alturas extraídas, se cumplió la misma condición que para el análisis de aparición de agua-barro: los 3 escurrimientos analizados fueron en puntos máximos locales o globales de alguno de los perfiles de alturas extraídas, de entre la serie de perfiles desplegados en cada dirección para cada punto.

Asociado a los puntos anteriores, se estableció la hipótesis de que la principal causa de aparición de agua-barro y el posterior escurrimiento, fue una migración lateral del mismo. El detener la extracción de puntos con presencia agua-barro, implica un reacomodo del mineral en la columna; de esta forma, el confinamiento al que es sometido el mineral saturado aumenta. Dado que el agua-barro tiene mayor capacidad de fluir, al estar confinado y al existir una columna aledaña con movimiento, éste migrará lateralmente afectando a los puntos cuya columna está en movimiento.

Con respecto a la evolución del Índice de Uniformidad Vectorizado, en todos los 3 casos de escurrimientos se observó que previo a la ocurrencia del evento, la mayoría de los puntos de la vecindad mostraron periodos con alta semiuniformidad o desuniformidad; en algunos casos, desuniformidades de hasta un 100%. Para el tercer caso analizado, la vecindad fue extraída con altos niveles de uniformidad, pero previo al evento, se evidenció que ésta decreció notablemente. Se concluye entonces, que es de gran utilidad observar la evolución del VUI a través del tiempo.

En términos de anticipar la ocurrencia de un escurrimiento, parece ser que el VUI podría ser un buen indicador del ingreso de agua-barro a una columna, pero en términos categóricos (si ingresará o no). Dado que no se sabe cómo determinar con exactitud cuándo ocurre dicho ingreso a una columna, y junto a lo anterior, no se sabe la correlación temporal entre el ingreso y la posterior aparición en el nivel de producción, no se tiene una conexión directa entre el VUI y la generación de un escurrimiento.

Se concluye finalmente que es posible en cierta medida, predecir la aparición de agua-barro en base a datos operacionales. Sin embargo, predecir la ocurrencia de un bombeo o un escurrimiento parece ser más complejo, y requiere de mayor conocimiento del fenómeno en términos de un análisis del comportamiento del material. Para poder predecir la ocurrencia de un bombeo o escurrimiento, es fundamental lograr un conocimiento más acabado, principalmente con el fin de determinar bajo qué condiciones ocurre.

6.2. Recomendaciones y enfoque futuro

Del análisis bibliográfico, se sabe que uno de los 4 factores necesarios para que se desencadene un escurrimiento o bombeo es el agua. Por lo tanto, una de las medidas fundamentales a aplicar en minas con potencial de acumular agua, y en particular en El Teniente, es el drenaje. Dicho drenaje debe apuntar a evitar o reducir o el agua que se puede infiltrar mediante el cráter de subsidencia, a extraer los cuerpos de agua subterráneos a modo de que no infiltren lateralmente al quebrado, y a drenar el agua que ya se encuentra en él. En particular, sería de gran utilidad el crear métodos que permitan drenar el mineral en la base de la columna, en el nivel de producción.

La situación en Diablo Regimiento entre puntos cerrados por agua-barro y puntos operativos es de 81/171. Además, se evidenció que la evolución de cantidad de puntos afectados es exponencial. Por otro lado, uno de los resultados de este estudio, es que el remanente muestra un potencial económico interesante en términos de tonelaje y ley media. Surge entonces la necesidad de crear un método de extraer dicho remanente, de forma segura y rentable.

De acuerdo al análisis de aparición de agua-barro, se determinó que existió un movimiento lateral de este. Dado que los puntos con aparición de agua-barro fueron detenidos en su extracción, el agua-barro fue extrayéndose en los puntos vecinos. Lo anterior induce a pensar que lo mejor sería realizar la extracción del barro en los mismos puntos en que aparece, para lo cual sería necesario crear una tecnología que lo permita, o bien usar alguna existente, como palas tele comandadas. Se cree que es fundamental realizar extracción del agua-barro y no permitir que migre hacia otros puntos.

La forma de determinar qué puntos cerrar por condición de agua-barro usada en El Teniente, se basa en mediciones de granulometría y humedad que son hechas de acuerdo a la experiencia y por distintas personas. Por lo tanto, puede existir cierto sesgo en los datos colectados. De este modo, se recomienda la implementación de sistemas de medición basados en instrumentación, con el objetivo de que se reduzca el sesgo y el grado de subjetividad en la toma de decisiones. Lo anterior permitiría además contar con información de mayor calidad para realizar mejores análisis del fenómeno a futuro.

El estudio realizado fue enfocado principalmente usando datos de extracción histórica del sector analizado, y datos de estados de los puntos de extracción. Sin embargo, otros estudios pueden realizarse incorporando más variables, como granulometría, humedad y altura topográfica. Para lo anterior, es de suma importancia contar con mediciones de granulometría y humedad que sean confiables, y en lo posible, realizadas mediante instrumentación.

Si bien en el presente trabajo se estableció un movimiento lateral de agua-barro como una de las razones de que éste apareciera en algunos puntos vecinos a puntos precursores, no existe un modelo de flujo que integre la presencia de mineral saturado, o bien combine columnas de quebrado seco con cuerpos de mineral saturado fino. Es altamente recomendable entender cómo es el comportamiento del material en el segundo caso mencionado anteriormente, principalmente enfocando a replicar experimentalmente la estrategia de cierre de puntos en donde se detecte presencia de agua-barro junto al establecimiento de puntos con niveles de extracción limitada.

Algo ya establecido en la explotación de yacimientos actuales, es que a mayor profundización, la capacidad de almacenamiento de agua aumenta, lo cual es lógico. Por otro lado, a mayor profundización, puede existir mayor aporte por concepto de aguas subterráneas. Por lo tanto, se prevé que en El Teniente, el problema del agua-barro será cada vez más importante, en especial en la explotación del Nuevo Nivel Mina. De este modo, es altamente recomendable que realicen mayores estudios con el fin de contar con criterios confiables en la planificación de largo y mediano plazo.

En la misma línea de lo expuesto anteriormente, es recomendable que en la división se cuente con un área que aborde aspectos relacionados netamente al problema del agua-barro, y que abarque distintas áreas de la minería, principalmente: planificación minera, manejo del agua-barro, drenaje minero e hidrogeología.

Si bien en la planificación minera se hace uso del criterio de un techo máximo extraíble, la existencia de un modelo predictivo de ingreso de agua-barro sería de mayor utilidad, siempre que incorpore variables como granulometría, humedad, altura extraída, y principalmente alguna variable que relacione la altura extraída de un punto con la de sus vecinos. Dicho modelo predictivo permitiría aumentar la certeza en la definición de reservas mineras, y mejorar la confiabilidad de los planes de producción propuestos por la división. Además, permitiría adelantar la preparación de medidas de mitigación del problema.

Con el fin de lograr un conocimiento más acabado del problema, y de lograr así una solución ya sea en términos de evitar que el problema ocurra o bien extrayendo mineral saturado, es de suma importancia contar con datos que permitan la obtención de información de calidad. Se recomienda entonces, que se cuente con un protocolo de mediciones a realizar cada vez que ocurran escurrimientos o bombeos, principalmente orientado a cubicar el material, determinar su mineralogía, humedad y granulometría, y a obtener parámetros geotécnicos propios de la caracterización de materiales con el potencial de licuefacción.

Buscando determinar de dónde proviene el agua que forma al agua-barro, así como de dónde proviene el fino que lo conforma, se recomienda caracterizar el agua y el fino en el barro presente en los puntos de extracción.

Si bien extraer de manera uniforme no maximiza el valor del negocio directamente en comparación al escenario en que se consideren extraer mejores leyes lo antes posible, en el mediano y largo plazo sí permite agregar valor al negocio, pues una extracción uniforme permite incrementar la recuperación minera en términos de mejores cumplimientos de extracción de reservas planificadas en los planes. Por lo tanto, ya sea buscando minimizar dilución o tratando de mitigar el problema del agua-barro, se debe apuntar a realizar un tiraje uniforme manteniendo además perfiles regulares de extracción. Por otro lado, el realizar buenas estrategias de extracción y de planificación no asegura evitar el problema; lo anterior debe ir de la mano con planes de drenaje que reduzcan o eviten la cantidad de agua que ingresa al quebrado.

BIBLIOGRAFÍA

- Becerra, Carolina. "Controlling Drawpoints Prone to Pumping - El Teniente Mine." *International Seminar on Geology for the Mining Industry*, 2011.
- Brown, E. T. *Block Caving Geomechanics*. Brisbane: University of Queensland Press, 2007.
- 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: 817-824.
- Butcher, R., W. Joughin, and T. Stacey. "Methods of Combating Mudrushes in Diamond and Base Metal Mines." *The Safety in Mines Research Advisory Committee (SIMRAC)*, 2000.
- Call & Nicholas, Inc.; Freeport McMoran Copper and Gold Co.; Hydrology Consultants Inc. "IOZ Wet Muck Study." PT Freeport Internal Report, 1998.
- Castillo, Luis. "Análisis de la sensibilidad del índice de uniformidad." Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil de Minas, Santiago, 2009.
- Codelco, División El Teniente. *Conexión Diablo Regimiento - Teniente 4, Informe SGM-I-021/2006*. Nota interna, Superintendencia de Geomecánica, 2006.
- Codelco, División El Teniente. "Criterios de planificación de zonas con amenaza de ingreso de agua/barro." Nota interna, 2013.
- Codelco, División El Teniente. *Definición de matriz de criticidad para control de agua-barro*. Superintendencia Gestión Producción, 2010.
- Codelco, División El Teniente. *Informe backanálisis punto inicio caving*. Estudio de Factibilidad Proyecto Nuevo Nivel Mina; Ingeniería Básica, Vicepresidencia Corporativa de Proyectos; Gerencia Proyecto Nuevo Nivel Mina, 2009.
- Codelco, División El Teniente. *Plan Minero - PND 2008*. Plan de Negocios y Desarrollo, Rancagua: Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo, 2007.
- Codelco, División El Teniente. *Plan Minero - PND 2011*. Plan de Negocios y Desarrollo, Rancagua: Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo, 2010.
- Codelco, División El Teniente. *Plan Minero - PND 2014*. Plan de Negocios y Desarrollo, Rancagua: Gerencia Recursos Mineros y Desarrollo, 2013.
- Codelco, División El Teniente. "Post Evaluación Proceso Extracción con LHD Semiautomático." SMS-GMIN Codelco, 2007.
- Codelco, División El Teniente. *Zonación de riesgo ingreso barro en Mina El Teniente; GRMD-SGL-INF-21-2014*. Superintendencia Geología, 2014.

- Ferrada, Matías. "Gravity Flow Under Moisture Conditions - Control and Management of Drawpoint Mudflow." *35th Apcom Symposium*, 2011: 761-764.
- Flores, Germán. "Future challenges and why cave mining must change." *Proceedings of the Third International Symposium on Block and Sublevel Caving*, 2014.
- Holder, A., A. Rogers, P. Bartlett, and G. Keyter. "Review of mud rush mitigation on Kimberley's old scraper drift block caves." *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2013: 529-537.
- Hubert, G., S. Dirdjosuwondo, R. Plaisance, and L. Thomas. "Tele-Operation at Freeport to Reduce Wet Muck Hazards." *MassMin*, 2000: 175.
- Jakubec, J., R. Clayton, and A. Guest. "Mudrush Risk Evaluation." 2013.
- Laubscher, Dennis. *A Practical Manual on Block Caving*. 2000.
- Molina, R. E., C. B. Cerrutti, J. O. Henríquez, and R. F., Apablaza, R. A. Morales. "Preconditioning implementation on rock bulks in Codelco Chile and its results." *MassMin*, 2008.
- Ross, I., and A. Van AS. "Major Hazards Associated with Block Caving." 2012.
- Samosir, E., J. Basuni, E. Widijanto, and T. Syaifullah. "The Management of Wet Muck at PT Freeport Indonesia's Deep Ore Zone Mine." *5th Internacional Conference and Exhibition on Mass Mining*, 2008.
- Santibáñez Boric, Javier. "Efecto del tiraje en la definición de la zona de movimiento, en un block-panel caving." 2008.
- Santibáñez, Javier. "Efecto del tiraje en la definición de la zona de movimiento, en un block-panel caving." 2008.
- Susaeta, A. "Índice de Uniformidad." 2014.
- Susaeta, A. "Theory of gravity flow (Parts 1 and 2)." *4th Internacional Conference and Exhibition on Mass Mining*, 2004: 167-178.
- Susaeta, A., E. Rubio, J. Henríquez, and G. País. "Dilution behaviour at Codelco panel cave mines." *5th Internacional Conference and Exhibition on Mass Mining*, 2008: 167-178.
- Syaifullah, T., E. Widijanto, and A. Srikant. "Water Issues in DOZ Block Cave Mine, PT Freeport Indonesia." *Water in Mining Conference*, 2006.
- Tapia, Carla, and Claudio Martínez. "Definition of Potential Mudflow from Extraction Points at Río Blanco Underground Mine." *International Seminar on Geology for the Mining Industry*, 2011.

Widijanto, E., A. Wilson, and L. Soebari. "Lessons Learned in Wet Muck Management in Erstberg East Skarn System of PT Freeport Indonesia." n.d.

ANEXO A

Metodología detallada usada para cálculo del potencial económico del mineral saturado remanente

Para la evaluación de reservas extraíbles se contó con 4 bases de datos proporcionadas por División El Teniente, Codelco.

SECTOR PRODUCTIVO	PUNTO EXTRACCIÓN	NUMERO BANCO	CÓD. CATEGORÍA MEDICIÓN	CÓD. TIPO UBC	CÓD. CATEGORÍA MALLA	TIPO ROCA	ALTURA UBC	ESTÉRIL
TONELAJE INSITU	TONELAJE DILUIDO	DENSIDAD INSITU	DENSIDAD DILUIDO	LEY CU INSITU	LEY CU DILUIDO	LEY AS INSITU	LEY AS DILUIDO	LEY SB INSITU
LEY SB DILUIDO	LEY MO INSITU	LEY MO DILUIDO	PIRITA	CALCOPIRITA	BORNITA	CALCOSINA	DUREZA	ALTURA ACUMULADA

Tabla 31: Enoestado de base de datos “Mina Reserva Banco”.

SECTOR PRODUCTIVO	PUNTO EXTRACCIÓN	COORD. X	COORD. Y	AREA INFLUENCIA	ALTURA INSITU	NÚMERO VÉRTICES
NUMERO BANCOS	ALTURA EXTRAIBLE	TONELAJE BASE EXTRAIBLE	TONELAJE BASE INSITU	LEY CU EXTRAIBLE	LEY CU INSITU	LEY AS EXTRAIBLE
LEY AS INSITU	LEY MO EXTRAIBLE	LEY MO INSITU	LEY SB EXTRAIBLE	LEY SB INSITU	TONELAJE SOBRE EXTRAIBLE	LEY SOBRE EXTRAIBLE

Tabla 32: Enoestado de base de datos “Mina Reserva Columna”.

Además, se contó con la extracción histórica de cada sector: Mina Carta Cumplimiento.

SECTOR PRODUCTIVO	PUNTO EXTRACCIÓN	FECHA	TURNO A PROG.	TURNO B PROG.	TURNO C PROG.
TURNO A EXT.	TURNO B EXT.	TURNO C EXT.	LEY PROG.	LEY EXT.	TON. EXT. DIARIO

Tabla 33: Enoestado de base de datos “Mina Carta Cumplimiento”.

En esta última base de datos la última columna se agregó simplemente sumando las columnas correspondientes a la extracción de cada turno.

Respecto a los estados de los puntos de extracción en el tiempo, se generó una matriz de estados de puntos de extracción, con el fin de saber el estado de todos los puntos en un determinado instante de tiempo.

	t=1	t=2	t=T
Punto Extracción 1					
Punto Extracción 1					
...					
...					
...					
Punto Extracción P					

Tabla 34: Matriz de estados de puntos de extracción en el tiempo.

Reservas remanentes no extraídas por estar afectadas por agua-barro

Para el cálculo de reservas no extraídas por estar los puntos de extracción afectados por agua-barro o bien con limitaciones de extracción al ser puntos circundantes a puntos con barro, lo que se hizo fue lo siguiente:

- i. Para cada punto de extracción, se determinaron 2 conjuntos de ponderadores:
 - a. X_b : Con valores entre 0 y 1, indica qué parte del b-ésimo banco es parte o no de reserva extraíble a lo largo de la columna. Esto se hizo en base al tonelaje extraíble por punto de extracción, definido en la base de datos Mina Reserva Columna.
 - b. Z_b : Con valores entre 0 y 1, indica que parte del b-ésimo banco ha sido extraído a un periodo dado. Esto se hizo en base a la extracción histórica de la base de datos Mina Carta Cumplimiento.
- ii. Se determinaron tonelajes extraíble y extraído, y luego restando se obtuvo la reserva remanente para cada punto de extracción:

$$\text{Tonelaje remanente} = \sum_{i=1}^b \text{ton_dil}_i \cdot (X_i - Z_i)$$

Dónde:

ton_dil_i : Tonelaje diluido del i-ésimo banco de un punto de extracción determinado.

- iii. Se determinaron finos de CuT extraíble y extraído, y luego restando se obtuvo la reserva remanente para cada punto de extracción:

$$\text{Fino remanente} = \sum_{i=1}^b \text{ton_dil}_i \cdot \text{ley_cu_dil}_i \cdot (X_i - Z_i)$$

Dónde:

ley_cu_dil_i : Ley de CuT diluido del i-ésimo banco de un punto de extracción determinado.

- iv. Usando tonelaje y fino remanente de cada punto de extracción, se obtuvo la ley media de la reserva remanente:

$$\text{Ley media remanente} = \frac{\text{Fino remanente}}{\text{Tonelaje remanente}} \%$$

- v. En el caso de existir sobre extracción en un punto de extracción, simplemente se reportó como reserva remanente un valor nulo para este punto.

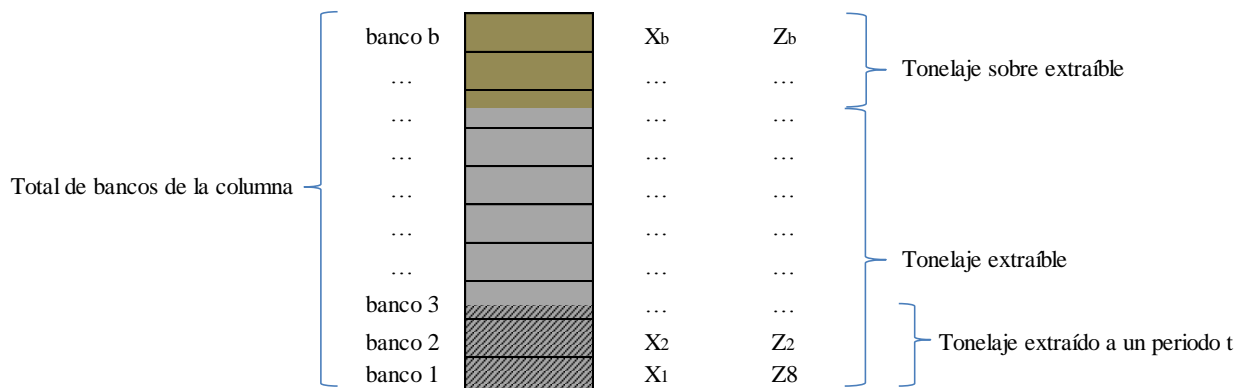


Figura 94: Esquema ilustrativo para estimación de reservas remanentes.

Reservas potencialmente extraíbles en zonas de riesgo de ingreso de agua-barro

Para el cálculo de reservas potencialmente extraíbles por agua-barro, se considera aquel tonelaje ubicado por sobre un techo extraíble para aquellos puntos de extracción con riesgo de ingreso de barro y que aún no se encuentran afectados por agua-barro -es decir, en estado Limitado, agua-barro o Barrera-. Lo anterior se basa en criterios de planificación usados por la SPL de División El Teniente.

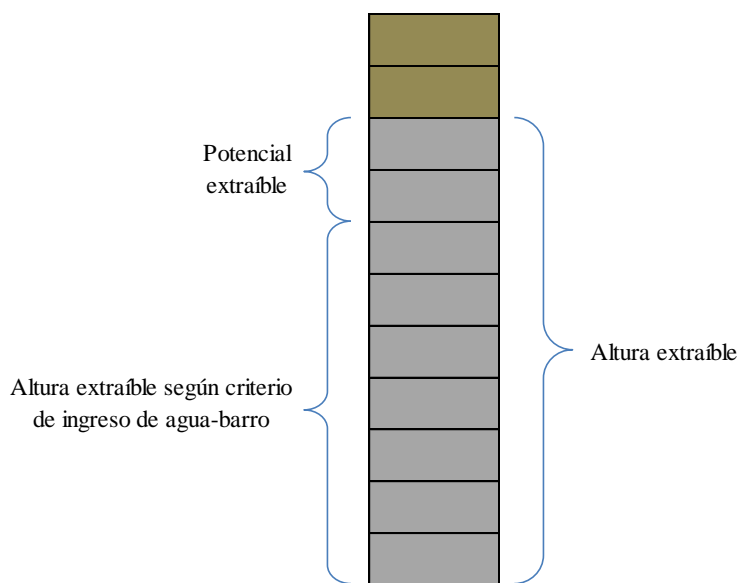


Figura 95: Esquema ilustrativo para estimación de reservas potencialmente extraíbles en zona con riesgo de ingreso de agua-barro.

Además, se consideró como zona con riesgo de ingreso de agua-barro a toda aquella área que está bajo sombra: bajo niveles antiguos suprayacentes al sector Diablo Regimiento.

ANEXO B

Consideraciones para el cálculo del Índice de Uniformidad Vectorizado

Escala temporal

La uniformidad puede analizarse por turno, día, semana, mes, etc. En el presente trabajo se calculó a escala turno, considerando espacios temporales de 3, 5 y 7 turnos; es decir, los tonelajes usados para los cálculos consideran tonelajes acumulados de acuerdo al espacio temporal analizado.

Día	1			2			3		
Turno	A	B	C	A	B	C	A	B	C

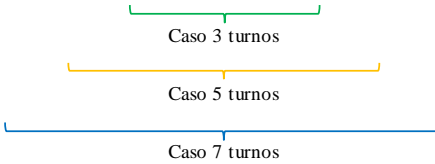


Tabla 35: Ejemplo de espacios temporales considerados para el cálculo del índice de uniformidad, para el día 2, turno C.

Como ejemplo, considerando una matriz de tonelajes extraídos como la de la Tabla 36, al considerar un espacio temporal de 3 turnos, se obtendría la matriz de la Tabla 37. En esta última, el valor en cada celda se obtiene sumando 3 valores, tal como se mostró en la Tabla 35.

Punto de extracción	1			2			3			...
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	...
1	100	50	0	200	50	50	100	200	0	
2	0	150	100	0	50	100	0	50	150	
...										...

Tabla 36: Ejemplo de matriz de tonelajes extraídos por turno.

Punto de extracción	1			2			3			...
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	...
1	150	150	250	250	300	200	350	300	200 + t1	
2	150	250	250	150	150	150	150	200	200 + t2	
...										...

Tabla 37: Ejemplo de matriz de tonelajes extraídos considerando espacio temporal de 3 turnos.

Vecindad de puntos de extracción

Para el cálculo del Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI), se consideraron definiciones usadas en algunos trabajos de Memoria de Título (Castillo 2009) (Santibáñez Boric 2008). Dichos conceptos se formalizan a continuación, asignándole nombre a cada uno.

Vecindad geométrica: corresponde a aquella vecindad inmediata a un punto determinada por la malla de extracción. Por ejemplo, para un punto que no pertenece al borde del sector, su vecindad geométrica serían el mismo punto más sus 6 vecinos inmediatos; es decir, la vecindad sería de 7 puntos.

Vecindad real: subconjunto de la vecindad geométrica; está definida por aquellos puntos que están abiertos a la fecha del cálculo del índice de uniformidad.

Por ejemplo, si se desea calcular el índice de uniformidad para el punto de extracción #3 (Figura

Punto de extracción	Fecha de apertura	Fecha de cierre
1	1	4
2	1	4
3	1	4
5	2	4
6	2	4
4	3	4
7	3	4

96) en la fecha 2 (

Tabla 38), las vecindades serían las siguientes:

- Vecindad geométrica: puntos de extracción #1, #2, #3, #4, #5, #6 y #7.
- Vecindad real: puntos de extracción #1, #2, #3, #5 y #6.

Para la vecindad real los puntos #4 y #7 no son considerados pues en el periodo 2 dichos puntos aún no han sido abiertos.

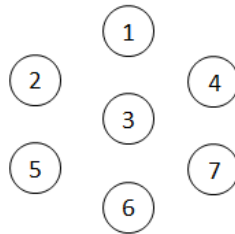


Figura 96: Vecindad del punto de extracción #3 para ejemplo genérico de vecindades geométrica y real.

Punto de extracción	Fecha de apertura	Fecha de cierre
1	1	4
2	1	4
3	1	4
5	2	4
6	2	4
4	3	4
7	3	4

Tabla 38: Puntos de extracción, fecha de apertura y fecha de cierre para ejemplo genérico de vecindades geométrica y real.

Para cada caso de vecindad considerada, surgen distintas posibilidades al calcular IEU y VUI. Los siguientes esquemas muestran estas posibilidades.



Figura 97: Casos posibles al calcular VUI, considerando vecindad real²⁷.

²⁷ PE: punto de extracción.

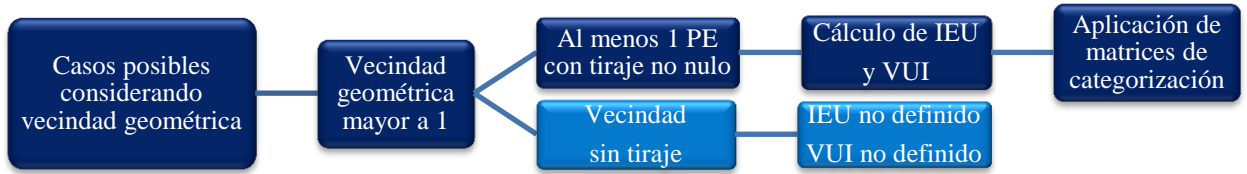


Figura 98: Casos posibles al calcular VUI, considerando vecindad geométrica.

ANEXO C

Desglose de reservas extraíbles por cada estado posible de puntos de extracción

Área		Estado	# PE	Área (m2)	Mineral (Mt)	Finos CuT (kt)	Ley media (%CuT)
ÁREA ABIERTA	ÁREA DISPONIBLE	Colgado	0	0	0	0	-
		Operativo	171	58,136	19.7	168.3	0.86%
		Reabierto	0	0	0	0	-
		Limitado	41	13,922	1.3	10.2	0.79%
		Reabierto para extracción tele comandada	0	0	0	0	-
	ÁREA NO DISPONIBLE	Barrera	17	5,787	0.6	4.4	0.70%
		Cerrado	2	680	0.1	0.9	0.68%
		Razones operacionales	0	0	0	0	-
		Reparación	0	0	0	0	-
		Quedado	4	1,360	0.5	4.3	0.80%
ÁREA CERRADA	Cortado agotado	3	1,021	0	0.2	0.61%	
	Barro/Agua	81	27,458	2.4	16.5	0.68%	
	Cortado por abandono	1	340	0.1	0.5	0.65%	
	Hundido	0	0	0	0	-	
ÁREA FUTURA	Hundir a futuro	1	341	0.1	1.1	0.86%	
	Vacío	0	0	0	0	-	
Sin estado			319	108,683	62.6	520.9	0.83%
Total remanente			640	217,728	87.5	727.5	0.83%
Limitados, barrera y barro/agua			139	47,167	4.4	31.1	0.72%

Tabla 39: Reservas extraíbles por estados posibles de puntos de extracción.

ANEXO D

Índice de Uniformidad Vectorizado para periodos de 5 y 7 turnos, para todos los puntos con aparición de agua-barro

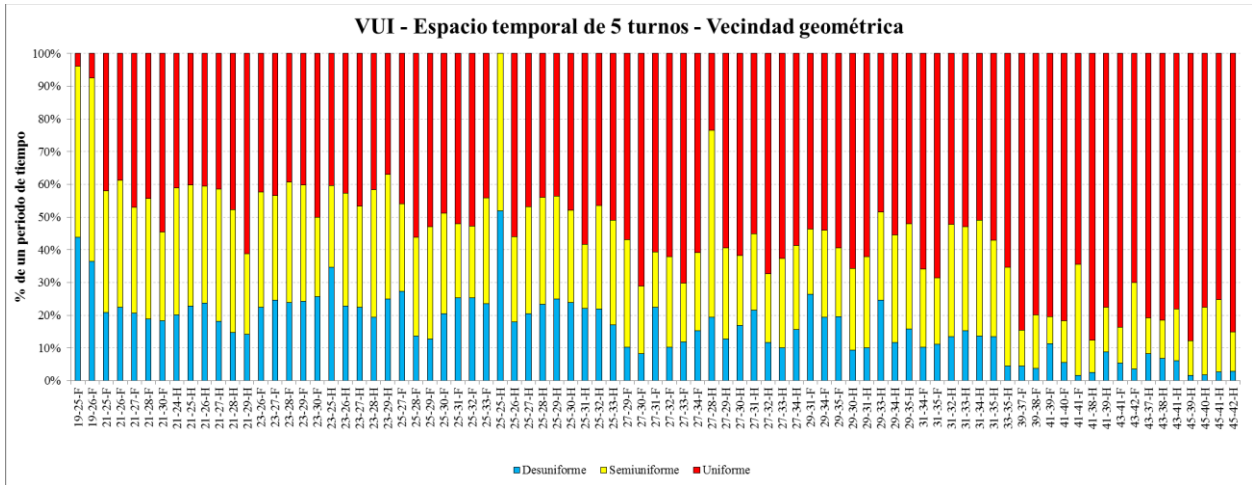


Figura 99: VUI para espacio temporal de 5 turnos; vecindad geométrica.

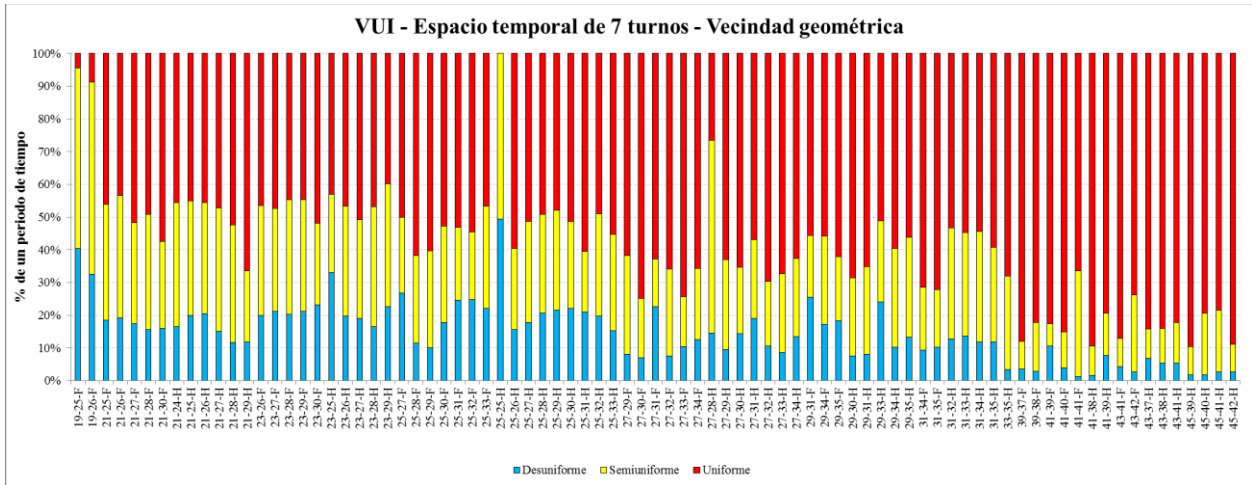


Figura 100: VUI para espacio temporal de 7 turnos; vecindad geométrica.

ANEXO E

Punto de extracción 19-26-F

Según se observa en la Figura 101, el punto 19-26-F fue extraído mayoritariamente desuniforme y semiuniformemente. Sin embargo, cuando ocurre la aparición de agua-barro se observa que durante el último mes el tiraje fue con un casi un 50% de uniformidad y aproximadamente un 12% de desuniformidad. Sin embargo, la entrada de agua-barro ocurrió de todos modos.

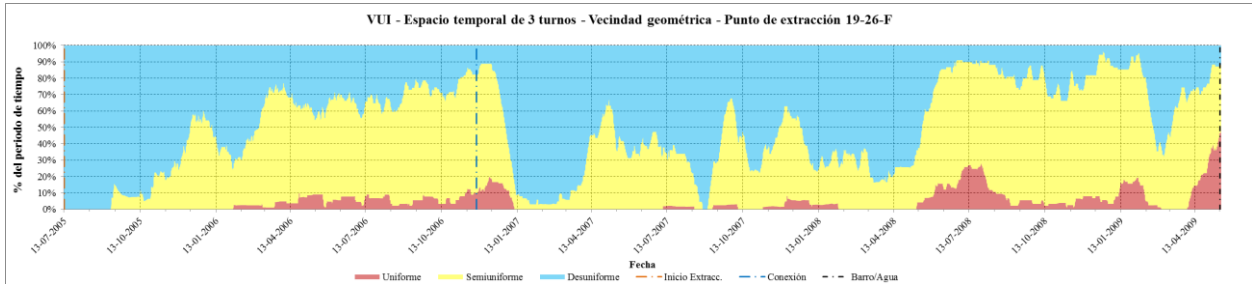


Figura 101: Evolución del VUI para punto 19-26-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.

Al observar los puntos vecinos al cual ocurrió un posterior ingreso de agua-barro, se evidencia que aun cuando uno de ellos fue extraído con mayor uniformidad que el punto precursor (19-26-F), durante los instantes previos al ingreso de agua-barro el tiraje fue mayoritariamente desuniforme (desuniformidad cerca al 70%). En otras palabras, una vez que se detecta agua-barro en un punto precursor, si a sus vecinos se aplica tiraje desuniforme en demasía, probablemente el agua-barro migrará hacia esos puntos.

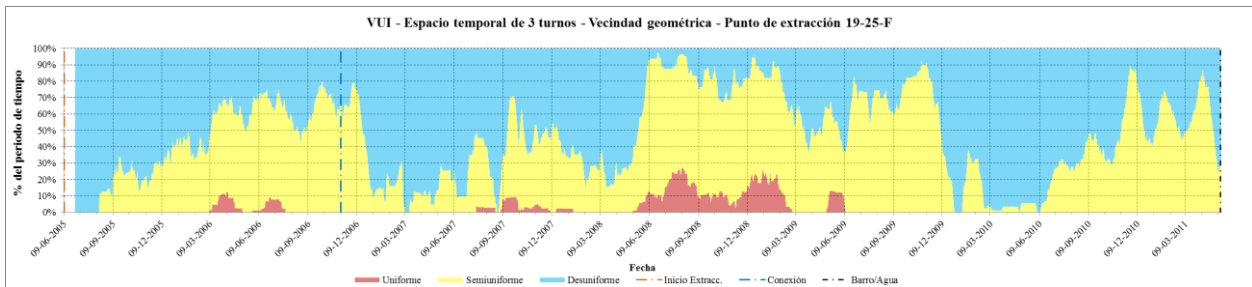


Figura 102: Evolución del VUI para punto 19-25-F, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.

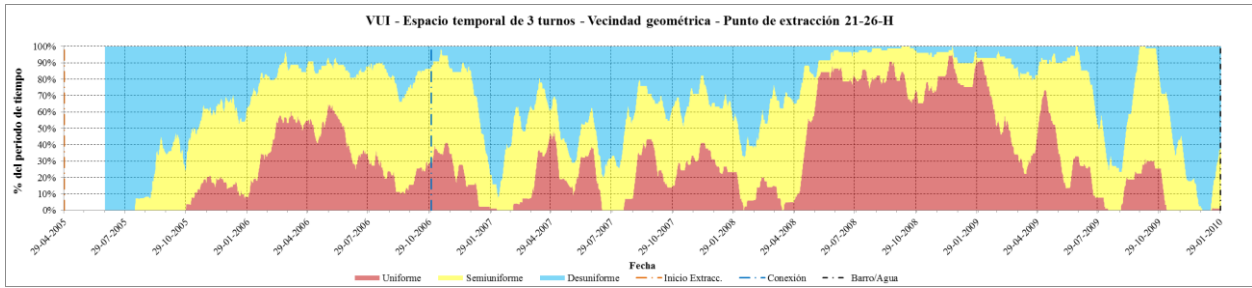


Figura 103: Evolución del VUI para punto 21-26-H, desde inicio de extracción hasta aparición de agua-barro.

Punto de extracción 23-27-H

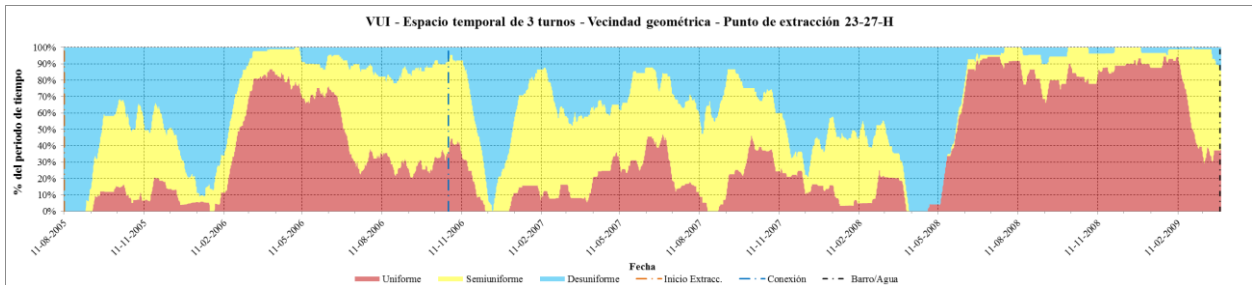


Figura 104: Evolución del VUI para punto 23-27-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

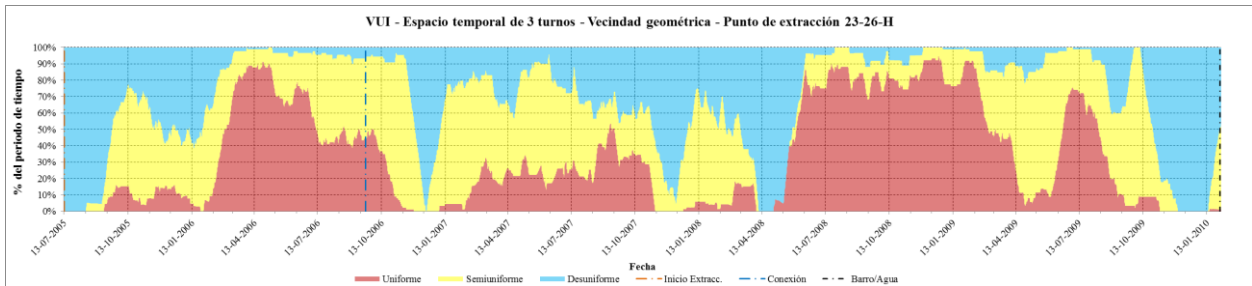


Figura 105: Evolución del VUI para punto 23-26-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

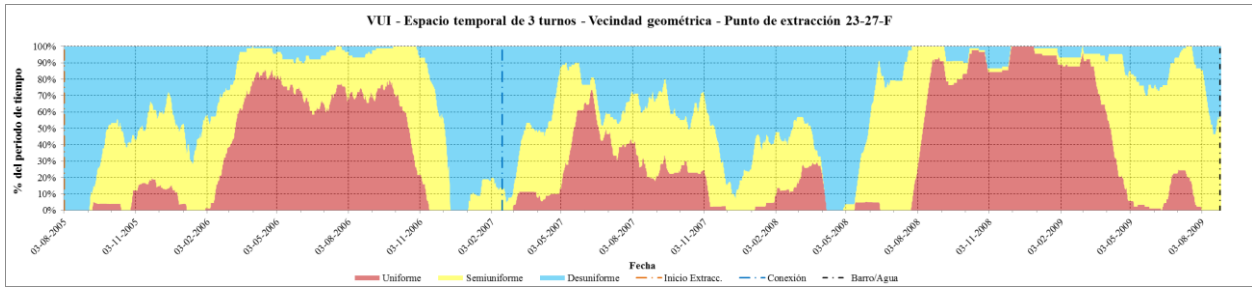


Figura 106: Evolución del VUI para punto 23-27-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

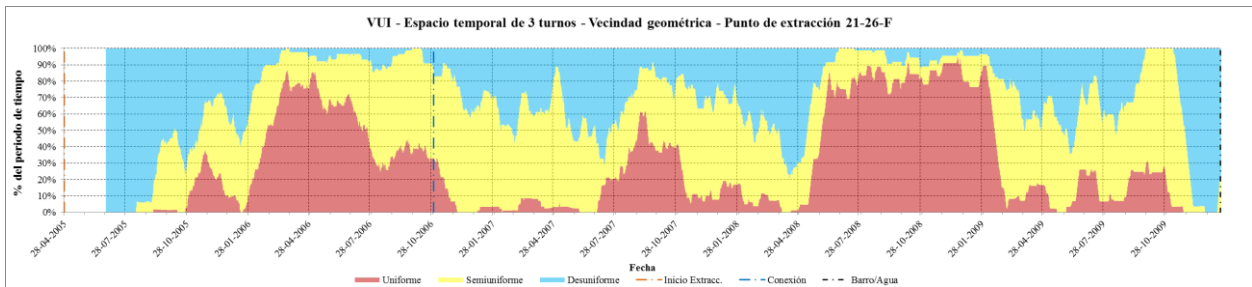


Figura 107: Evolución del VUI para punto 21-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

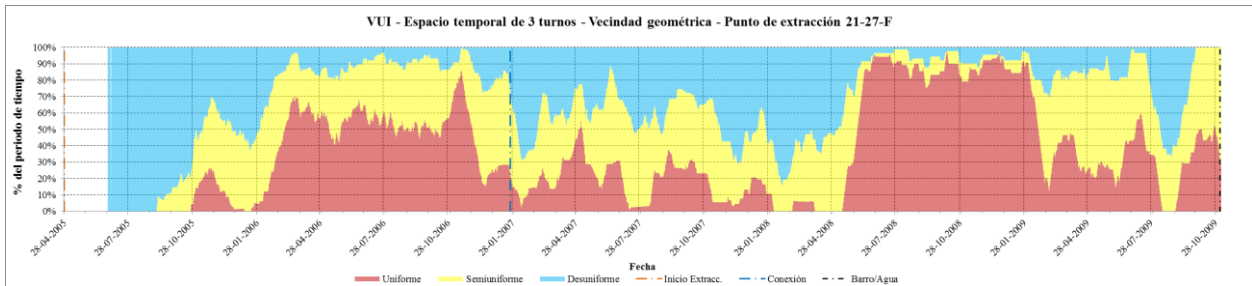


Figura 108: Evolución del VUI para punto 21-27-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

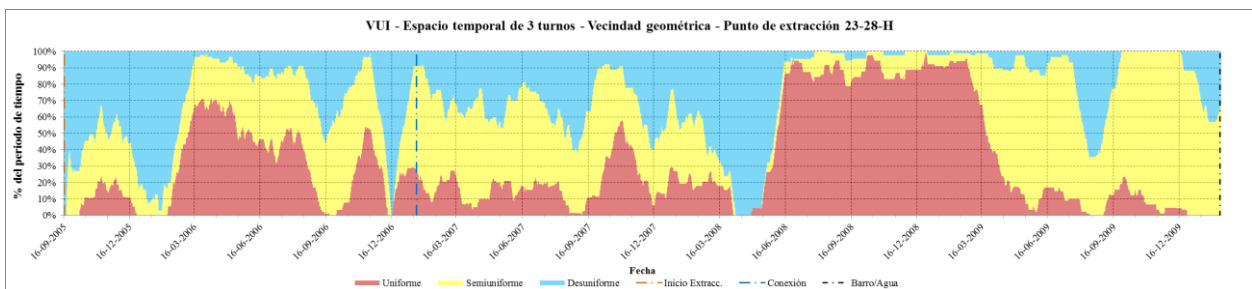


Figura 109: Evolución del VUI para punto 23-28-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

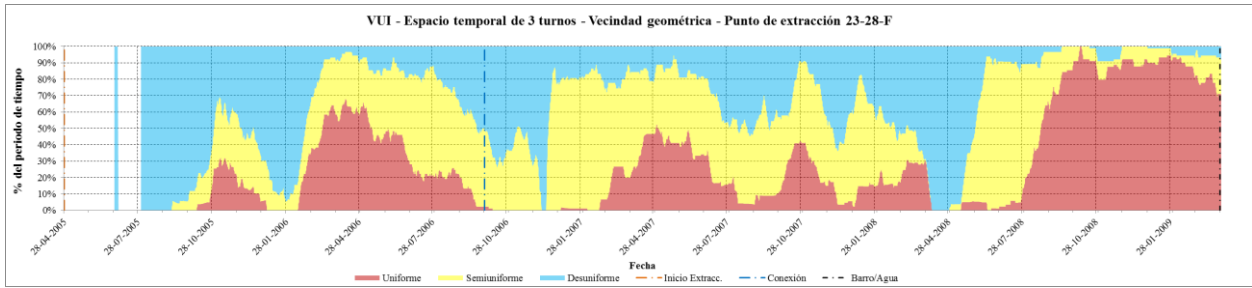


Figura 110: Evolución del VUI para punto 23-28-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

Punto de extracción 27-30-H

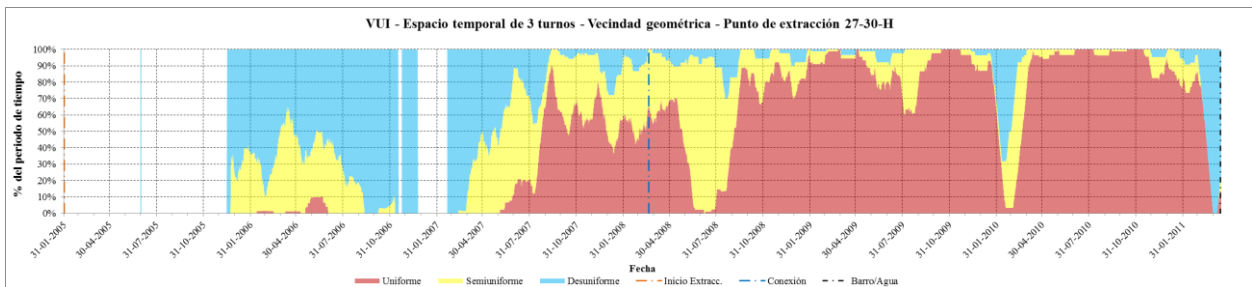


Figura 111: Evolución del VUI para punto 27-30-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

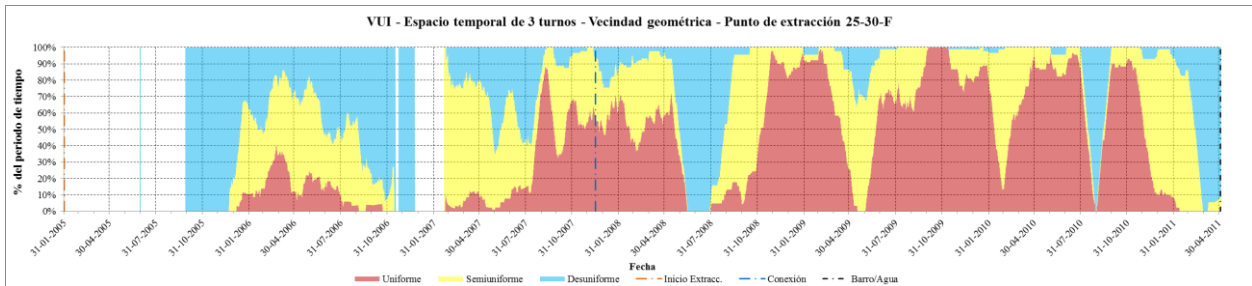


Figura 112: Evolución del VUI para punto 25-30-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

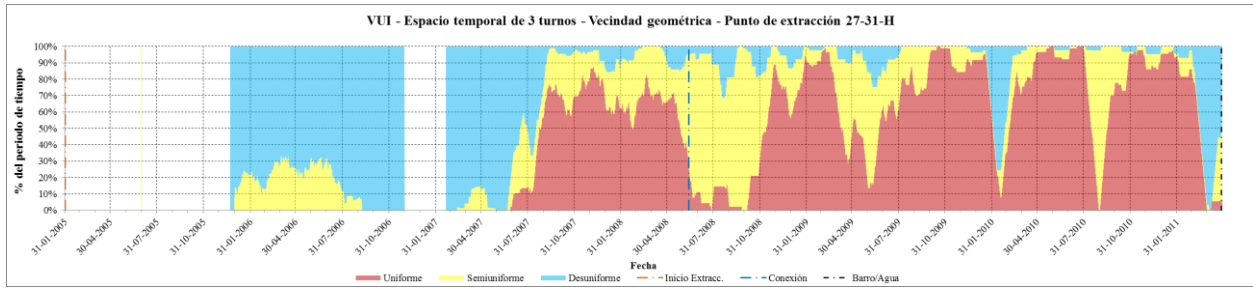


Figura 113: Evolución del VUI para punto 27-31-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

Punto de extracción 29-31-H

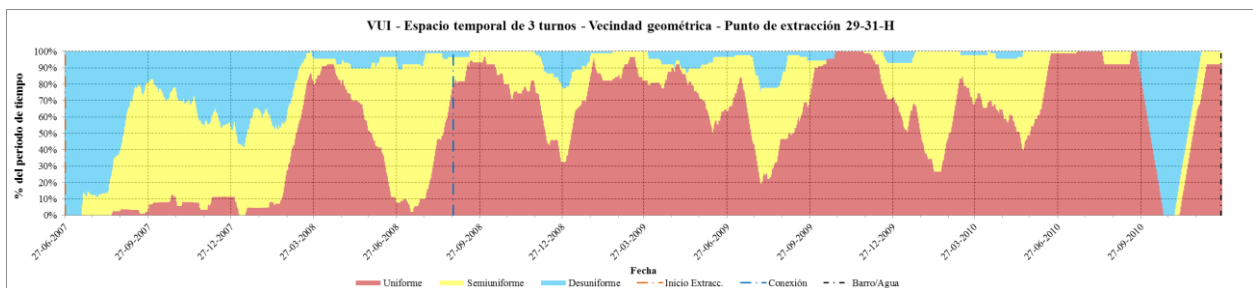


Figura 114: Evolución del VUI para punto 29-31-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

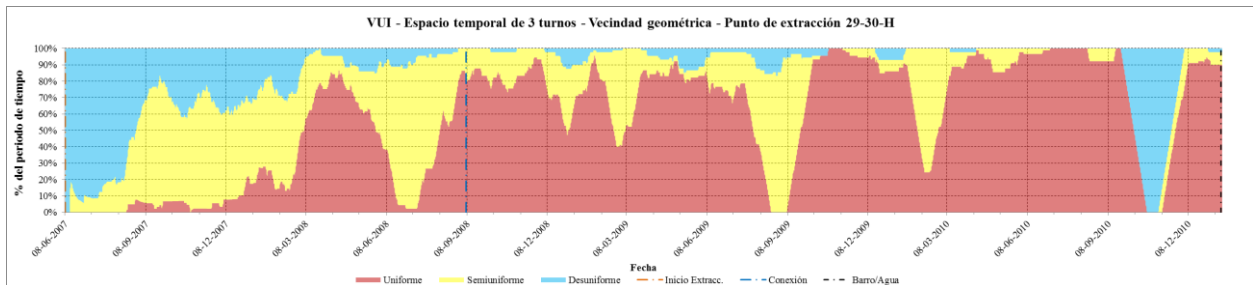


Figura 115: Evolución del VUI para punto 29-30-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

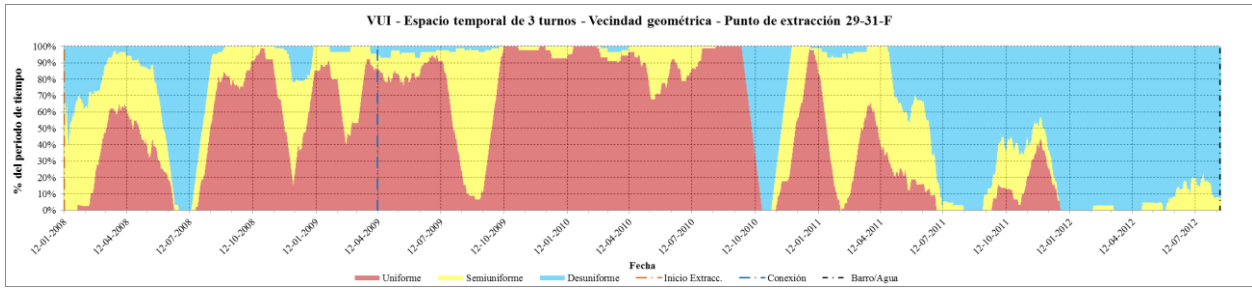


Figura 116: Evolución del VUI para punto 29-31-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

Punto de extracción 31-33-H

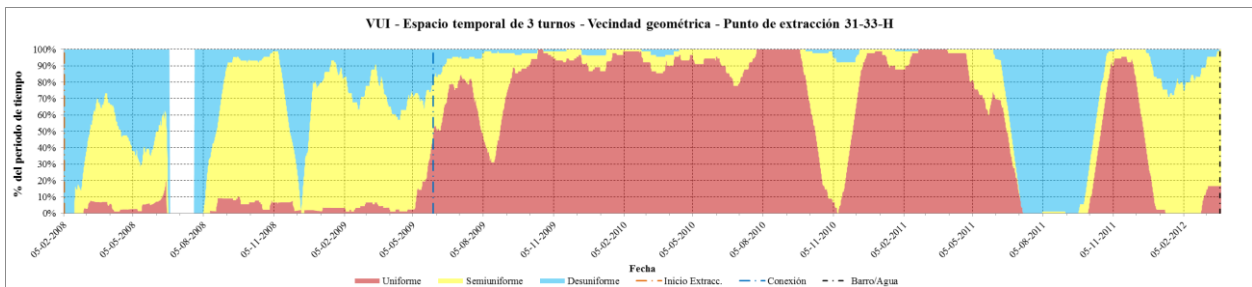


Figura 117: Evolución del VUI para punto 31-33-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

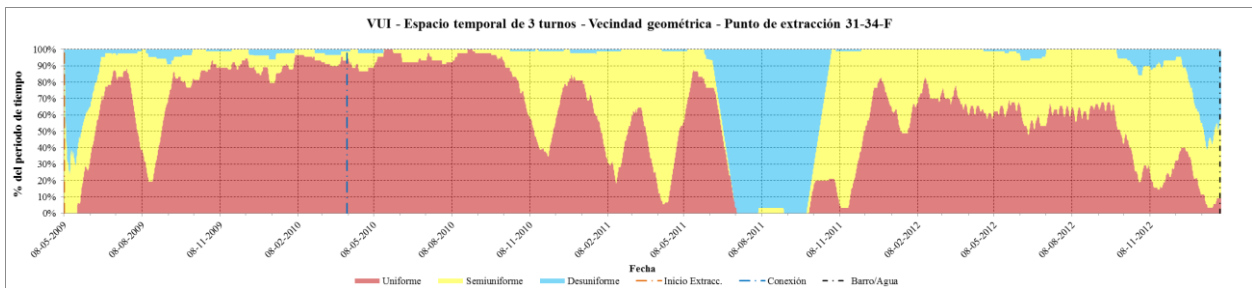


Figura 118: Evolución del VUI para punto 31-34-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

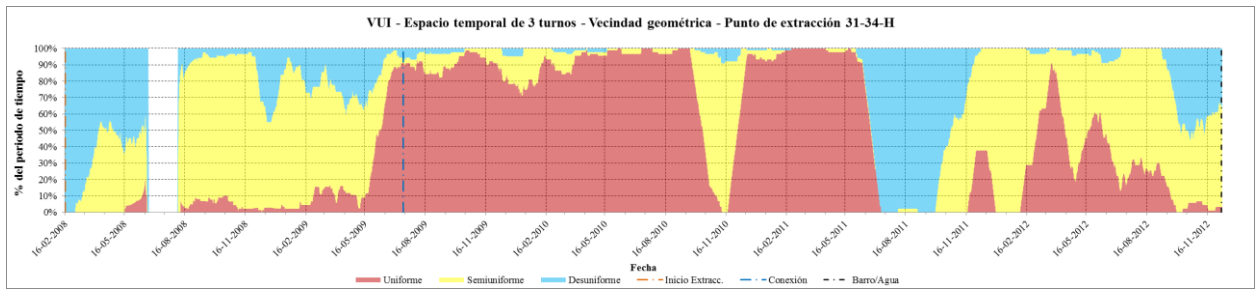


Figura 119: Evolución del VUI para punto 31-34-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

ANEXO F

Índice de Uniformidad Vectorizado (VUI); caso con vecindad real

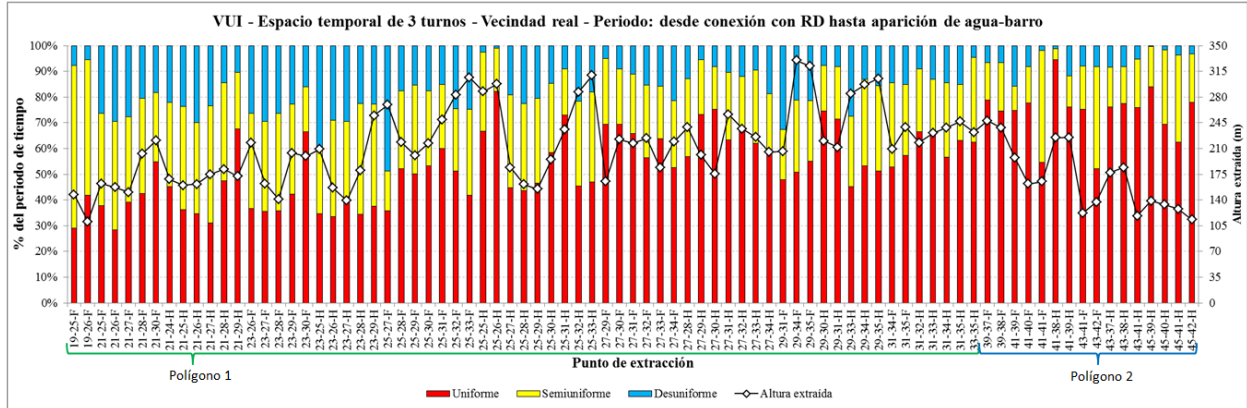


Figura 120: VUI para caso con vecindad geométrica, desde conexión con RD hasta aparición de agua-barro.

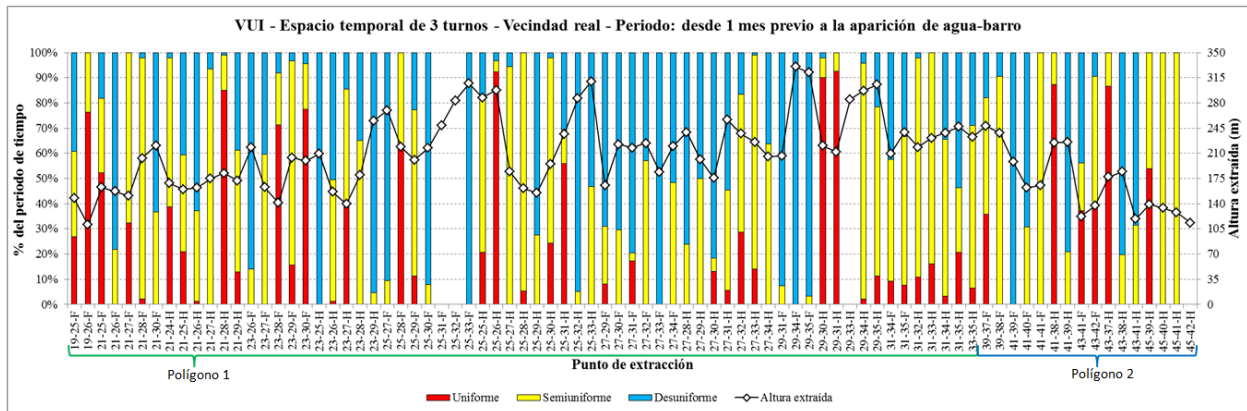


Figura 121: VUI para caso con vecindad real, desde 1 mes previo a aparición de agua-barro.

ANEXO G

Histogramas de puntos de extracción elegidos para análisis de tasas de extracción, en análisis de aparición de agua-barro

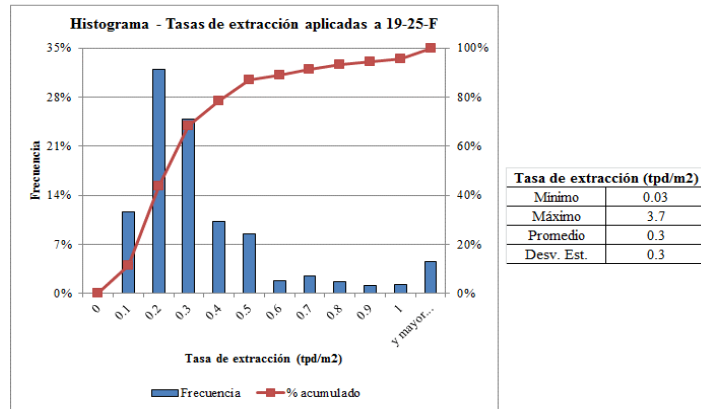


Figura 122: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 19-25-F.

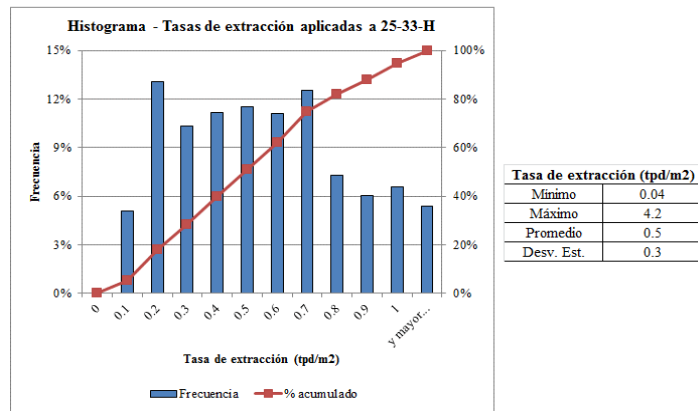


Figura 123: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 25-33-H.

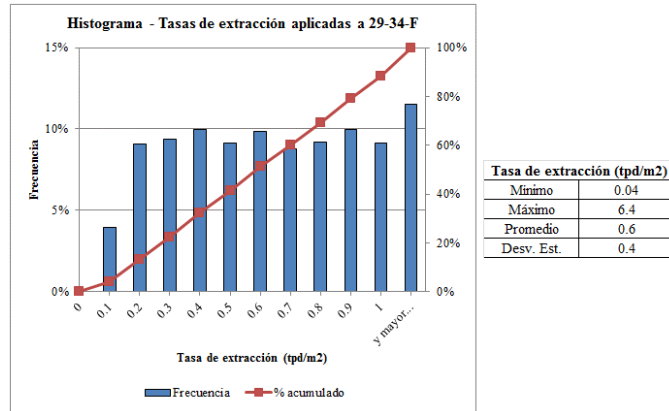


Figura 124: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 29-34-F.

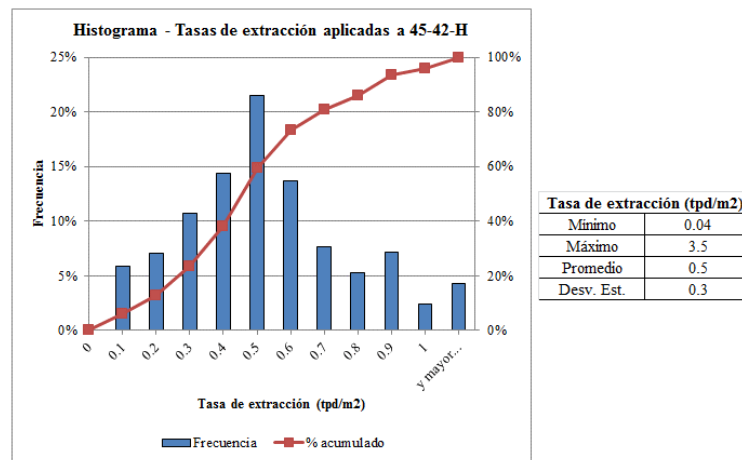


Figura 125: Histograma de tasas de extracción aplicadas al punto 45-42-H.

Punto de extracción	Polígono	Altura extraída ac. (m)	Fecha estado Barro/Agua	Fecha conexión
23-27-H	1	139	31-03-2009	26-10-2006
19-25-F		148	13-05-2011	09-11-2006
25-33-H	1	310	17-06-2013	08-05-2009
29-34-F		330	25-01-2013	07-04-2009
45-42-H	2	113	11-07-2013	06-02-2012
43-41-H		119	30-04-2013	30-01-2012
39-38-F	2	238	19-11-2013	21-04-2011
39-37-F		248	23-08-2013	15-04-2011

Tabla 40: Puntos de extracción elegidos para análisis de tasas de extracción aplicadas.

ANEXO H

Evolución del VUI para vecindad del punto de extracción 25-26-H

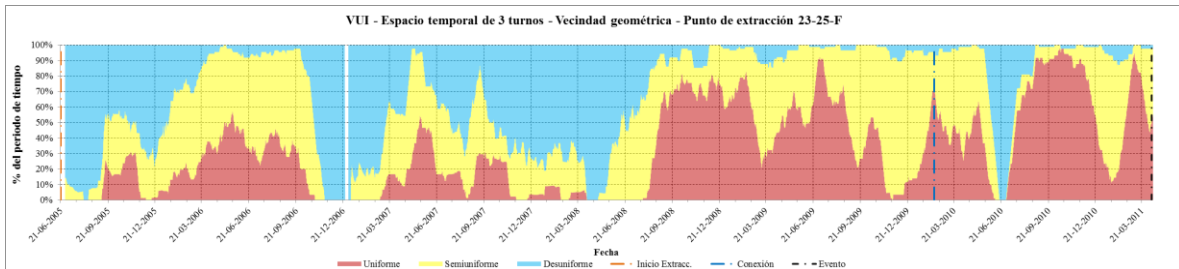
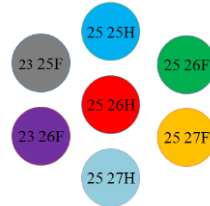


Figura 126: Evolución del VUI para punto 23-25-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

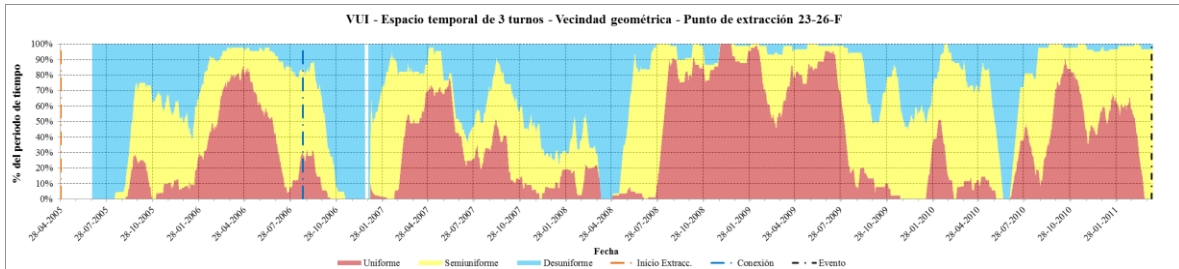


Figura 127: Evolución del VUI para punto 23-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

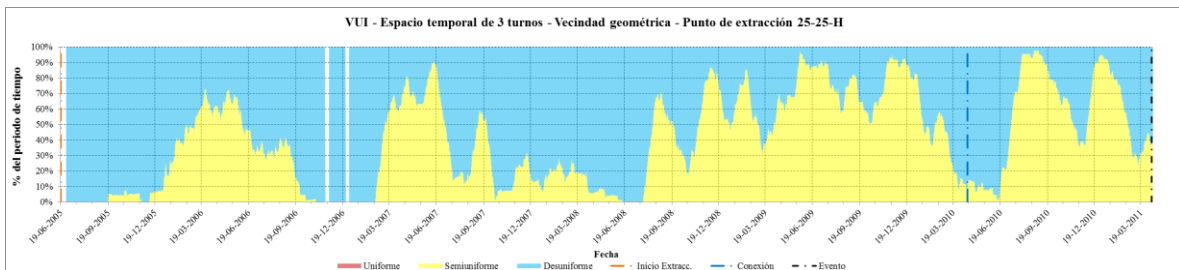


Figura 128: Evolución del VUI para punto 25-25-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

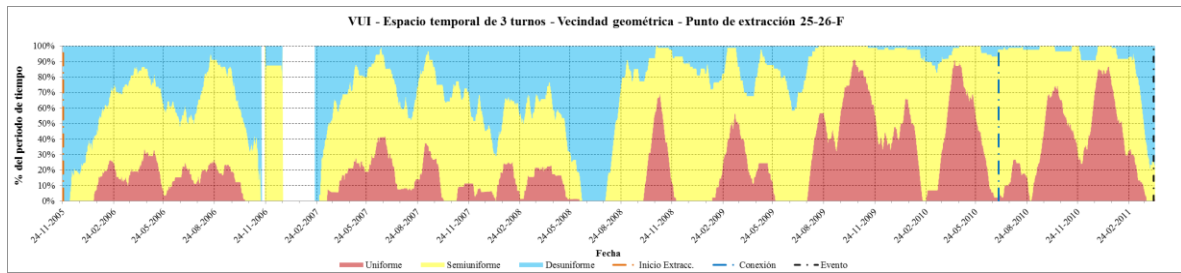


Figura 129: Evolución del VUI para punto 25-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

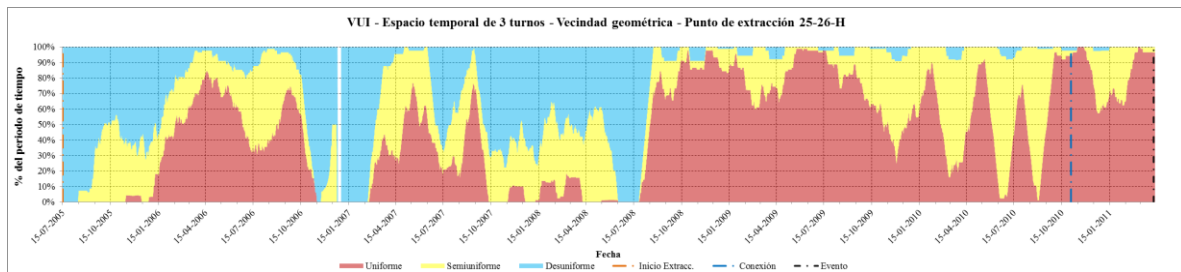


Figura 130: Evolución del VUI para punto 25-26-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

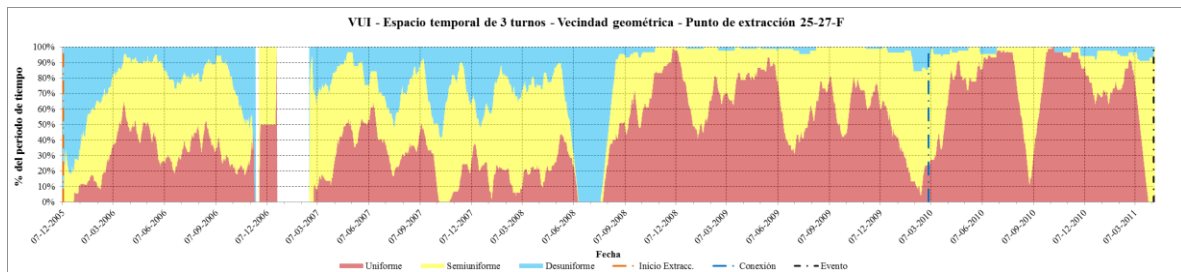


Figura 131: Evolución del VUI para punto 25-27-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

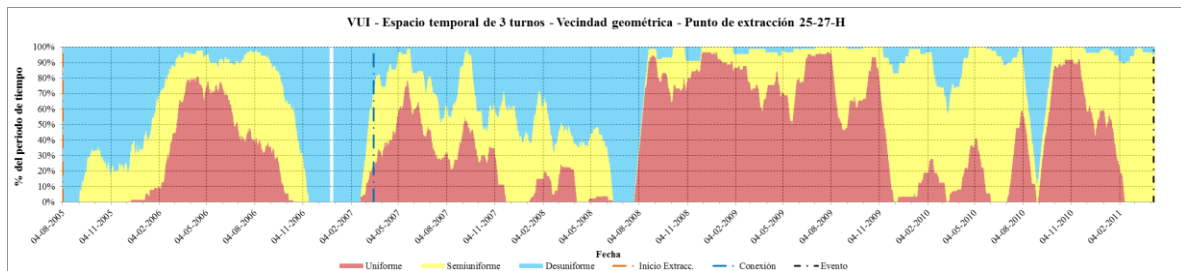


Figura 132: Evolución del VUI para punto 25-27-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

Evolución del VUI para vecindad del punto de extracción 23-26-F

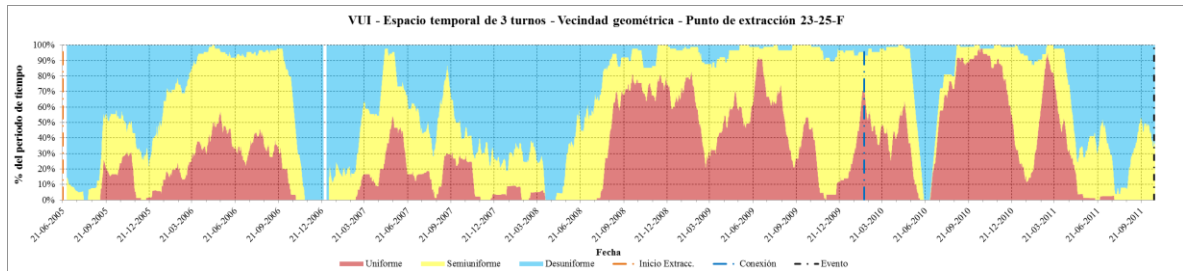
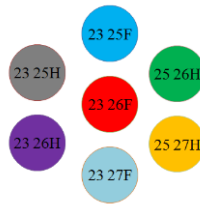


Figura 133: Evolución del VUI para punto 23-25-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

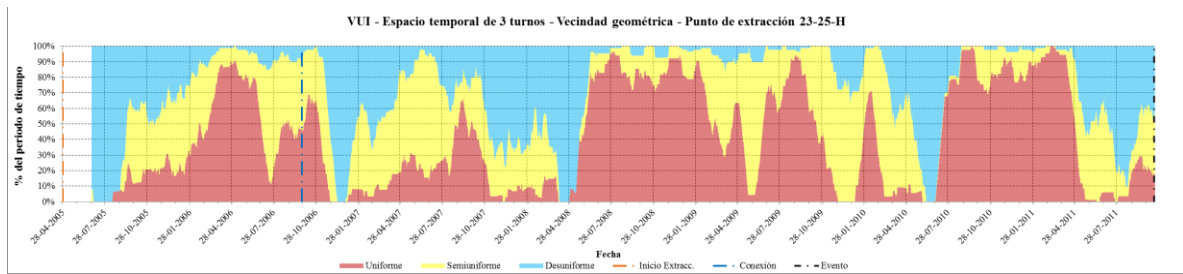


Figura 134: Evolución del VUI para punto 23-25-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

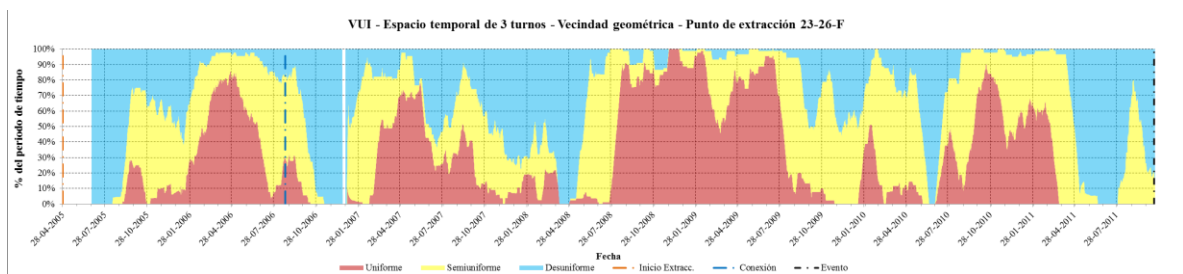


Figura 135: Evolución del VUI para punto 23-26-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

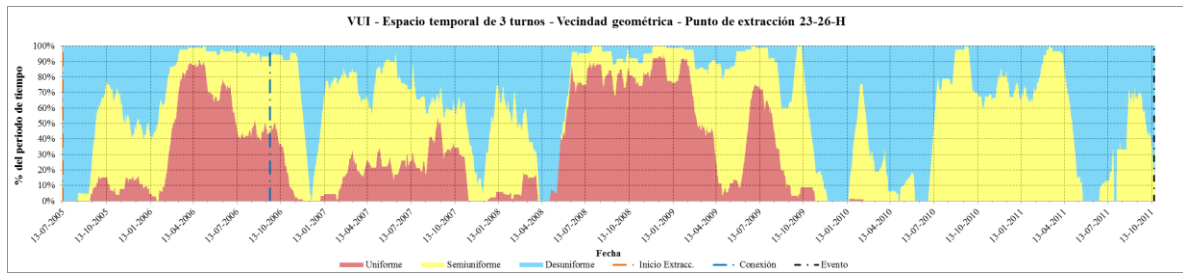


Figura 136: Evolución del VUI para punto 23-26-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

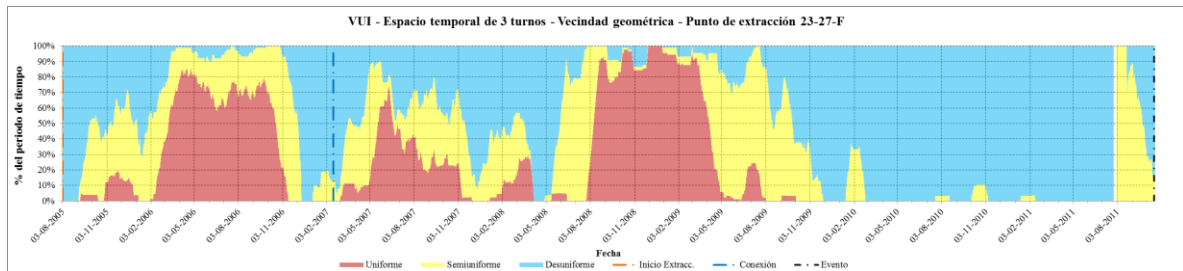


Figura 137: Evolución del VUI para punto 23-27-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

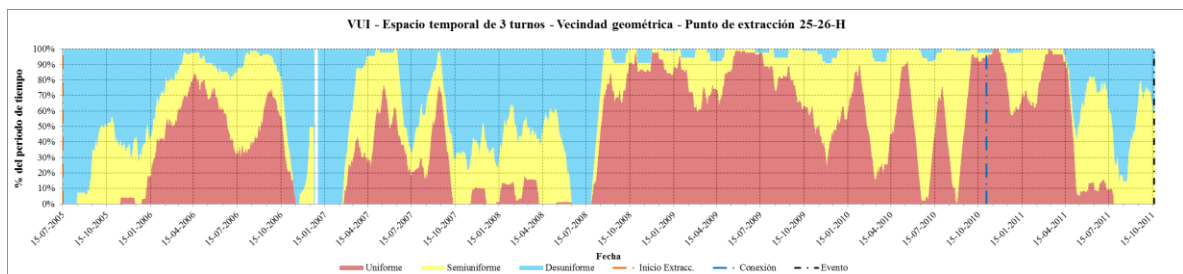


Figura 138: Evolución del VUI para punto 25-26-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

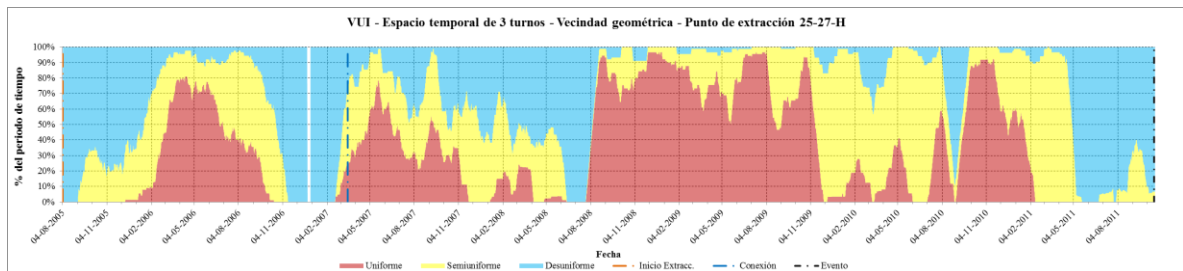


Figura 139: Evolución del VUI para punto 25-27-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

Evolución del VUI para vecindad del punto de extracción 39-37-F

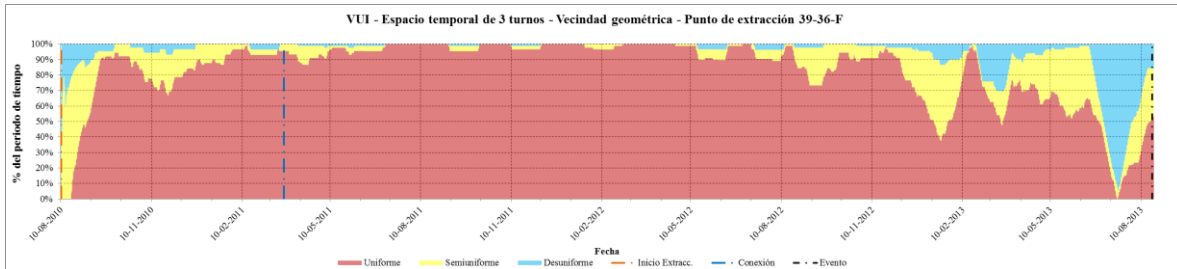
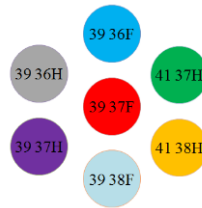


Figura 140: Evolución del VUI para punto 39-36-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

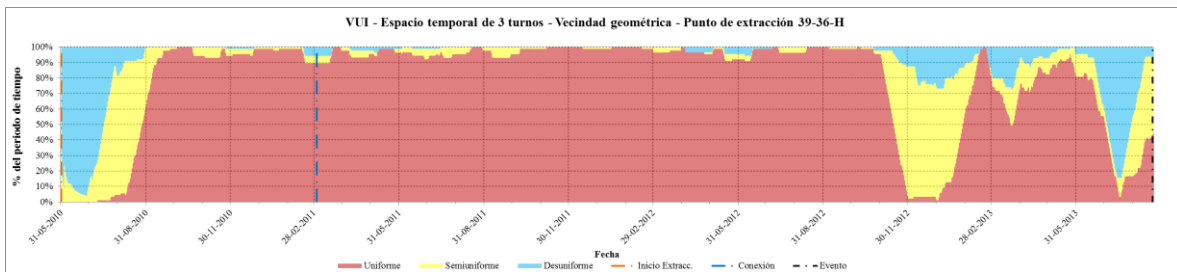


Figura 141: Evolución del VUI para punto 39-36-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

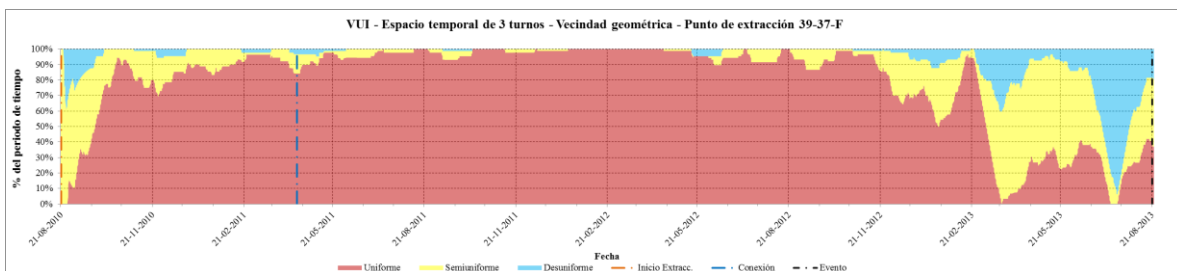


Figura 142: Evolución del VUI para punto 39-37-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

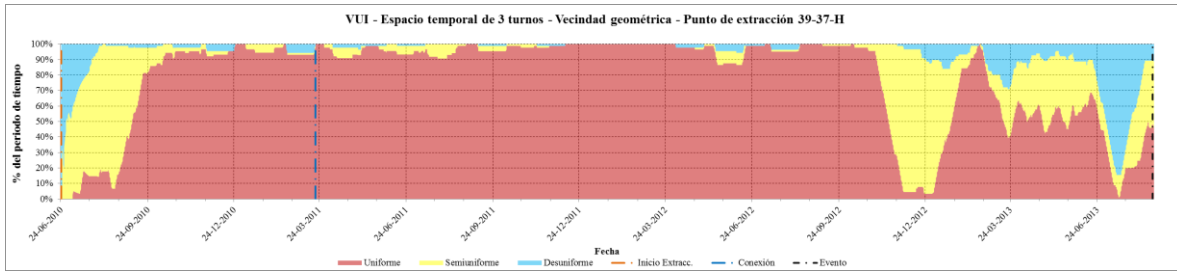


Figura 143: Evolución del VUI para punto 39-37-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

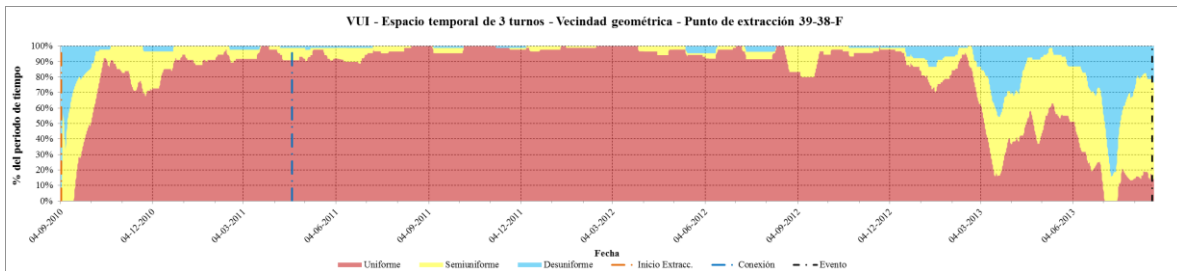


Figura 144: Evolución del VUI para punto 39-38-F, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

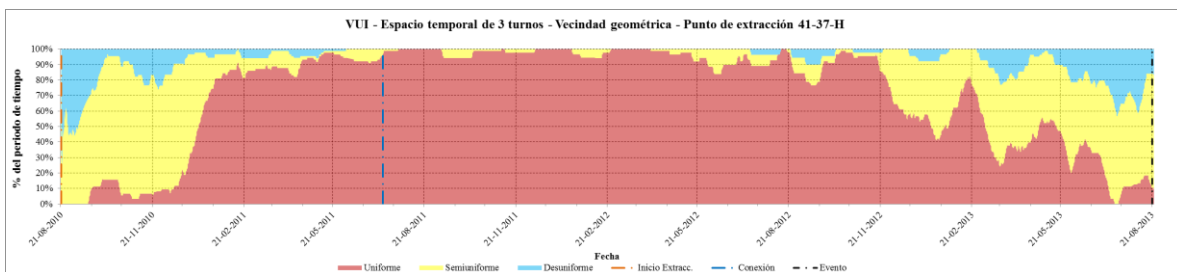


Figura 145: Evolución del VUI para punto 41-37-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

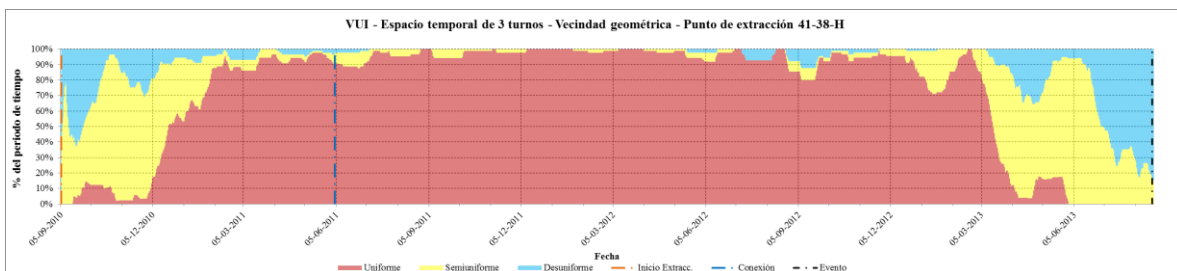


Figura 146: Evolución del VUI para punto 41-38-H, desde inicio de extracción hasta ocurrencia del evento.

ANEXO H

Histogramas de las velocidades de extracción aplicadas a vecinos del punto 25-26-H

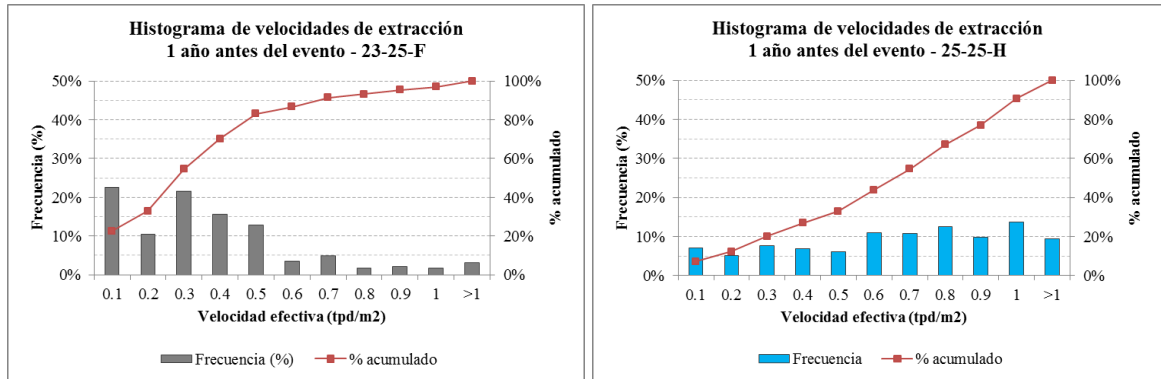


Figura 147: Histogramas de velocidades de extracción de los puntos 23-25-F y 25-26-H.

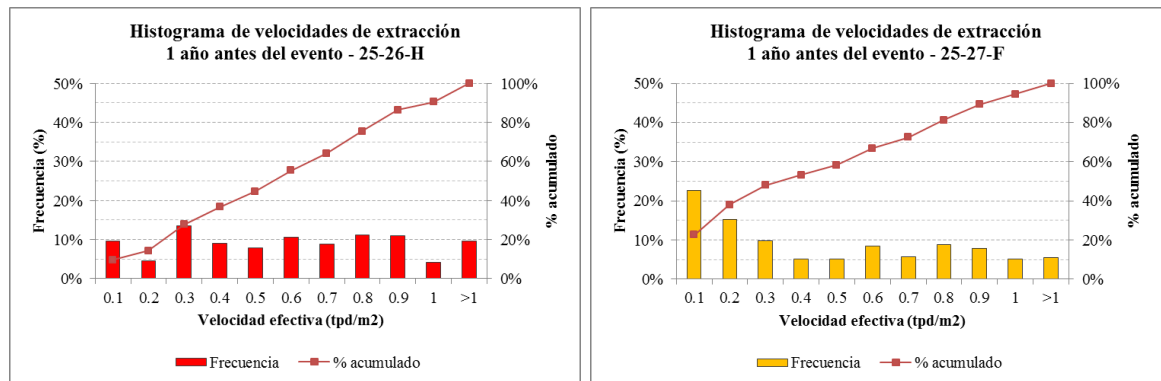


Figura 148: Histogramas de velocidades de extracción de los puntos 25-26-H y 25-27-F.

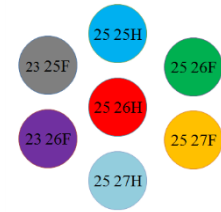
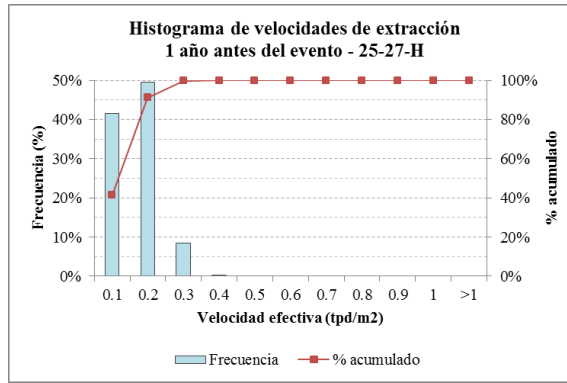


Figura 149: Histogramas de velocidades de extracción del punto 25-27-H.

ANEXO I

Matrices de categorización del Índice de Uniformidad Vectorizado (Castillo 2009).

		Índice específico de uniformidad									
		0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0
NÚMERO DE INACTIVOS	0	U	U	U	U	U	U	SU	SU	SU	SU
	1	U	U	U	U	SU	SU	SU	SU	SU	SU
	2	U	U	SU	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU
	3	SU	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU
	4	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU	DU	DU
	5	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU
	6	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU

Tabla 41: Matriz de categorización del VUI para 7 vecinos.

		Índice específico de uniformidad									
		0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0
NÚMERO DE INACTIVOS	0	U	U	U	U	U	SU	SU	SU	SU	DU
	1	U	U	U	SU	SU	SU	SU	SU	SU	DU
	2	U	SU	SU	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU
	3	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU	DU
	4	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU
	5	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU

Tabla 42: Matriz de categorización del VUI para 6 vecinos.

		Índice específico de uniformidad									
		0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0
NÚMERO DE INACTIVOS	0	U	U	U	U	SU	SU	SU	SU	DU	DU
	1	U	U	SU	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU
	2	U	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU
	3	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU	DU	DU
	4	SU	SU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU

Tabla 43: Matriz de categorización del VUI para 5 vecinos.

		Índice específico de uniformidad									
		0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0
NÚMERO DE INACTIVOS	0	U	U	U	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU
	1	U	U	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU
	2	U	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU	DU
	3	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU	DU	DU	DU

Tabla 44: Matriz de categorización del VUI para 4 vecinos.

		Índice específico de uniformidad									
		0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0
NÚMERO DE INACTIVOS	0	U	U	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU
	1	U	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU
	2	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU	DU	DU

Tabla 45: Matriz de categorización del VUI para 3 vecinos.

		Índice específico de uniformidad									
		0.0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0
NÚMERO DE INACTIVOS	0	U	SU	SU	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU
	1	U	SU	SU	SU	SU	DU	DU	DU	DU	DU

Tabla 46: Matriz de categorización del VUI para 2 vecinos.

ANEXO J

Estados posibles de puntos de extracción:

Estado	Descripción	Áreas	
Colgado	Punto en que el flujo de mineral es interrumpido, formando un arco natural de soporte, ya sea por planchones, colpas de gran tamaño o humedad.	ÁREA DISPONIBLE	ÁREA ABIERTA
Operativo	Punto que se encuentra en condiciones aptas para producir.		
Reabierto	Punto que pasa de un estado cortado a disponible para producción.		
Limitado	Punto con extracción restringida a un tonelaje máximo para un período determinado de tiempo (sistema LHD/día, convencional/semanal).		
Reabierto Extracción Tele Comandada	Punto en que se extrae mediante equipo LHD tele comandado.		
Barrera	Punto que controla el ingreso de la dilución lateral ó barro de puntos adyacentes.	ÁREA NO DISPONIBLE	
Cerrado	Punto en que se detiene temporalmente la extracción por baja ley de Cu o impurezas (2 semanas mínimo).		
Razones Operacionales	Punto que permanece fuera de producción por trabajos especiales y temporales, tales como: sondajes en cruzado de acceso o vías de tráfico, desarrollo de labores cercanas, tránsito temporal de suministros, u otros.		
Reparación	Punto que están fuera de producción por arreglo de su estructura.		
Quedado	Punto cuya voladura de zanja y polvorazo no ha colapsado.		
Cortado Agotado	Punto en que se termina definitivamente la extracción por agotamiento o abandono. En el caso de agotamiento, la extracción del punto es igual o mayor que el 100% y presentan ley inferior a la ley de cierre.	ÁREA CERRADA	
Barro/Agua	Punto que debido a la penetración del agua presenta riesgo de bombeo.		
Cortado por abandono	Punto en que se termina definitivamente la extracción pese a tener razones de impurezas, condiciones de riego y otros.		
Hundido	Punto que ha sufrido quiebre del pilar y hundimiento del cerro.		
Hundir a futuro	Punto en que no se ha realizado la voladura de zanja.	ÁREA FUTURA	
Vacío	Puntos en los cuales sólo se ha efectuado la voladura de zanja y no el polvorazo correspondiente al área del punto.		

Tabla 47: Estados posibles de puntos de extracción, usados en División El Teniente, Codelco.