

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA- FACULTAD DE CIENCIAS
MAGÍSTER EN MEDIO AMBIENTE**



**ANÁLISIS DE RIESGO EN ETAPA DE CIERRE PARA LA GRAN MINERÍA DE CALICHE
Y TIERRAS RARAS**

VIVIANA SOLEDAD ESPINOZA CHÁVEZ

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGÍSTER EN MEDIO AMBIENTE**

Profesor Guía : Felipe Sabando Del Castillo
Profesor Informante Interno : María Teresa Bull Torres
Profesor Informante Externo : Lilian Valdebenito Valenzuela

Concepción, Noviembre 2017

CALIFICACIONES

AGRADECIMIENTOS

... "Queda prohibido no sonreír a los problemas, no luchar por lo que quieres, abandonarlo todo por miedo, no convertir tus sueños en realidad"...

Pablo Neruda

Las palabras que salen de mi corazón , son de agradecimiento y llenas de dicha y bendiciones, pensando en las personas que han creído en mi y que creerán siempre, las que me han brindado su incondicional apoyo y me han motivado a lo largo de mi vida personal y profesional.....

Primeramente doy gracias a Dios, por permitirme llegar hasta este momento y lograr otra meta más...

A mi marido e hijos... que son el motor de mi vida, a quienes amo y protegeré por siempre, que con fe, esfuerzo y optimismo me apoyaron para sacar adelante este proyecto, por su comprensión y amor que me permite sentir que puedo lograr lo que me proponga... gracias por ser parte de mi vida y alegrarme los días...

A mi madre... por su infinito amor, cariño y apoyo sin condiciones, por encomendarme a Dios para que siempre saliera adelante, y por tus oraciones realizadas con mucha fe.... Gracias por tu compañía...

A mi profesor guía ... por todos los conocimientos compartidos y enseñados, por que cada vez que le solicite ayuda me la brindo de buena manera, por revisar cada vez que fue necesario los avances... por su ayuda y disposición...

A todos... por el simple hecho de estar en mi vida la han hecho mas especial y bella.... Gracias.

RESUMEN

Chile avanza hacia una minería responsable, ya que en noviembre del año 2011 promulga la Ley 20.551, que regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras, generando un nuevo escenario el cual incorpora en su diseño y operación una visión o criterios generando una oportunidad de incorporar buenas practicas y optimización de las operaciones.

Un plan de cierre principalmente corresponde a un conjunto de medidas que la empresa minera adopta, con el único fin de lograr el cierre de su faena en forma ordenada, eficiente y oportuna, dentro del marco legal vigente, considerando el control y mitigación de las situaciones que puedan generar impactos sobre la salud y seguridad de las personas o el medio ambiente al cierre y periodo de post cierre de faena.

A raíz de lo antes mencionado, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) pone a disposición de la industria extractiva minera una Guía metodológica para la presentación de planes de cierre sometidos al procedimiento de aplicación general también llamado Guía de Evaluación de Riesgos para cierre de faenas mineras, el cuál se utiliza como orientación para la presentación de los planes de cierre, ya que no tiene carácter de obligatoria. Esta guía fue desarrollada para aquellas empresas mineras de exportación de cobre, hierro, oro y carbón, dejando fuera a la minería llamada no metálica.

De las 150 faenas obligadas a presentar su Plan de Cierre en régimen general (F. Sabando, com.pers.), al menos un 22,9 % se dedican a otras actividades mineras no metálicas como son: caliza, sal, caliche, tierras raras entre otras.

Así, el objetivo general fue revisar la metodología propuesta de Análisis de Riesgos presentada por SERNAGEOMIN para la estabilidad física y química, considerando las diferencias con la industria cuprífera, adaptando los factores y ponderaciones para que respondan a la realidad de operaciones de la extracción de la Gran Minería del Caliche y Tierras Raras, en su etapa de cierre.

Frente a lo expuesto, se justifica revisar la metodología de SERNAGEOMIN, para tener claridad de los pasos a seguir en esta modificación, identificando las faenas mineras de Caliche y Tierras Raras con una extracción o producción mensual sobre las 10.000 toneladas.

De acuerdo a lo último, se revisaron los procesos productivos de cada faena, identificando las instalaciones remanentes tras el cierre, para posteriormente determinar aquellos impactos directos provocados por los procesos productivos y su efecto posterior, en relación a lo contenido en la Guía de SERNAGEOMIN.

Como ejemplo para desarrollar los Factores Técnicos se tomo la empresa SQM, ya que utilizan la extracción por solventes para concentrar las soluciones a demás de la utilización de pozas de evaporación, lo que lo hace que el proceso realizado en la minería de Caliche sea similar al proceso de Tierras Raras.

Se revisaron los Factores Técnicos de cada una de las instalaciones con respecto a la identificación de Riesgos de la Guía de SERNAGEOMIN, al realizar esta acción se determinó que la Guía es de gran ayuda para las Faenas de Caliche y Tierras Raras, por presentar algunas similitudes en los Factores Técnicos, independiente que algunos debieron ser modificados para adecuarlos de mejor forma a lo requerido en este estudio.

ABSTRACT

Chile is moving towards responsible mining. In November of 2011, the Government enacted Law 20.551, which regulates proper mine closure. This sets a new scenario that incorporates in its design and operation an innovative vision or criteria, generating opportunities to incorporate good practices and optimize operations.

A closure plan corresponds mainly to a set of measures adopted by the company with the sole purpose of closing mines orderly, efficiently and timely respecting the current legal framework, taking into account all situations that could have an impact on the environment or on people's health and safety, during the closing and post-closing period.

Thus, SERNAGEOMIN (Chile's National Geology and Mining Service) developed The Methodological Guide for the presentation of closure plans subjected to the general application procedure ("Guía metodológica para la presentación de planes de cierre sometidos al procedimiento de aplicación general"), also called The Risk Assessment Procedure Guide for Closing Mines ("Guía de evaluación de Riesgos para el cierre de faenas mineras"). Although it is not mandatory, the guide is used to orientate closing mines plans. This was developed specially for the Exporting Sector of The Great Mining Industry, not considering the non-metallic mining industry.

There are 150 operations due to present its closing plan (F. Sabando, *com.pers.*), 22.9% of these also engage in limestone, salt, caliche and rare earths mining among others.

The main objective was to review the proposed methodology of the risk analysis proposal given by SERNAGEOMIN in terms of physical and chemical stability, considering the differences with the copper industry, adapting factors and weightings to respond to the reality of extraction operations of the Great Caliche and Rare Earths Mining Industry in their closing phase.

In view of this, it is necessary to review the methodology used by SERNAGEOMIN, in order to have a clear image of the different steps needed to follow this modification. Caliche and Rare Earths operations were identified with a monthly production over 10.000 tons.

According to the latest, each mine site production process was assessed, identifying facilities that will remain after closing, in order to determine direct impacts caused by production processes and the subsequent effects related to SERNAGEOMIN's procedure guide.

SQM Company serves as an example in the development of technical factors, because this company uses solvent extraction for the concentration of solutions and evaporation ponds, which is comparable to the process carried out by Rare Earths Mining.

We assessed technical factors for each facility, regarding the identification of risks included in the SERNAGEOMIN guide, concluding that this guide is a real contribution to the caliche and Rare Earths Mining operations, due to the similarities presented on technical factors, even though some had to be modified for this study.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3 ALCANCE	5
1.4. OBJETIVOS	5
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2. ANTECEDENTES	6
2.1 CONTEXTO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN.	6
2.2 METODOLOGÍA SERNAGEOMIN	7
2.3 ESTADO DEL ARTE	8
3. METODOLOGÍA	9
3.1 INSTALACIÓN DE OPERACIONES MINERAS DE CALICHE Y TIERRAS RARAS.	9
3.2 IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS.	10
3.3 MODIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE SERNAGEOMIN.	10
4. RESULTADOS	13
4.1 DETERMINAR LAS INSTALACIONES EN LA GRAN MINERÍA DE CALICHE Y TIERRAS RARAS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO EN ETAPA DE CIERRE.	13
4.2 IDENTIFICAR LOS PELIGROS EN LAS INSTALACIONES DE LA GRAN MINERÍA DE CALICHE Y TIERRAS RARAS. .	15
4.2.1 DESCRIPCIÓN PROCESO PRODUCTIVO DE LA MINERÍA DEL CALICHE	15
4.2.2 DESCRIPCIÓN PROCESO PRODUCTIVO DE LA MINERÍA TIERRAS RARAS	20
4.3 MODIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SERNAGEOMIN CON LOS NUEVOS FACTORES TÉCNICOS, CON EL PROPÓSITO DE OBTENER LOS NIVELES DE RIESGOS PARA CADA UNA DE LAS INSTALACIONES EN ETAPA DE CIERRE DE LA GRAN MINERÍA DE CALICHE Y TIERRAS RARAS.	22
4.3.1 EVALUACIÓN DE RIESGOS GRAN MINERÍA DEL CALICHE Y TIERRAS RARAS	22
4.3.2 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES TÉCNICOS DE CADA UNA DE LAS INSTALACIONES CON SUS RESPECTIVOS RIESGOS IDENTIFICADOS.	25
5. DISCUSIÓN	34
6. CONCLUSIÓN	35

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
---	-----------

7. ANEXOS	40
------------------------	-----------

ÍNDICE DE ANEXOS

7.1 POSICIÓN DE CHILE EN RANKING DE PRODUCCIÓN MUNDIAL DE MINERALES METÁLICOS Y ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES (SERNAGEOMIN, 2013)	40
7.2 PRODUCCIÓN DE ROCAS Y MINERALES INDUSTRIALES 2004-2013 (T) (SERNAGEOMIN, 2013).....	40
7.3 EJEMPLO DE ESTRUCTURA DE LA ESTRUCTURA DE LA TABLA PARA LA EVALUACIÓN DE FACTORES TÉCNICOS (SERNAGEOMIN, 2014).....	41
7.4 LOS RECURSOS DE TIERRAS RARAS EN EL MUNDO (FERNÁNDEZ, 2013).....	42
7.5 A INSTALACIONES PRINCIPALES (SERNAGEOMIN, 2014).....	42
7.5 B INSTALACIONES COMPLEMENTARIAS (SERNAGEOMIN, 2014).....	43
7.5C INSTALACIONES AUXILIARES (SERNAGEOMIN, 2014)	44
7.6 EJEMPLO ESQUEMÁTICO DE LA IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS. (SERNAGEOMIN, 2014)	45
7.7 ANEXO D. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE LAS FORMULAS DE LOS FACTORES TÉCNICOS (SERNAGEOMIN, 2014).....	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA I PRODUCCIÓN DE NITRATOS POR REGIONES (TON) AÑOS 2007 – 2015 (SERNAGEOMIN, 2015) ...	3
TABLA II PRODUCCIÓN DE YODOS POR REGIONES (TON) AÑOS 2007 – 2015 (SERNAGEOMIN, 2015)	3
EN LA TABLA III SE PRESENTA INFORMACIÓN RESPECTO A LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE TIERRAS RARAS.....	4
TABLA III ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN MUNDIAL DE TIERRAS RARAS. TONELADAS MÉTRICAS EQUIVALENTES DE ÓXIDO DE TIERRAS RARAS ^{1,2} (USGS, 2016).....	4
TABLA IV TABLA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS (SERNAGEOMIN, 2014)	8
TABLA V INSTALACIONES MINERAS DE NITRATOS Y YODO	14
TABLA VI RIESGOS IDENTIFICADOS PARA MINA RAJO ABIERTO (SERNAGEOMIN, 2014)	22
TABLA VII RIESGOS IDENTIFICADOS PARA MINA RAJO ABIERTO MODIFICADA.....	22
TABLA VIII RIESGOS IDENTIFICADOS PARA POZAS DE EVAPORACIÓN	23
TABLA IX RIESGOS IDENTIFICADOS PARA RIPIOS DE LIXIVIACIÓN (SERNAGEOMIN, 2014)	23
TABLA X RIESGOS IDENTIFICADOS PARA LAS PILAS DE LIXIVIACIÓN	23
TABLA XI RIESGOS IDENTIFICADOS PARA DEPÓSITOS DE ESTÉRILES (SERNAGEOMIN, 2014).....	24
TABLA XII RIESGOS IDENTIFICADOS PARA ACOPIO DE SALES DE DESCARTE	24
TABLA XIII DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS EN MINA RAJO	25
TABLA XIV DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS EN POZAS DE EVAPORACIÓN	25
TABLA XV DE IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS EN PILAS DE LIXIVIACIÓN	25
TABLA XVI DE LA IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS EN ACOPIO DE SALES DE DESCARTE.....	25
TABLA XVII VALORIZACIÓN DE LOS FACTORES TÉCNICOS MINA RAJO, SISMO (VFT) (SERNAGEOMIN, 2014)	26
TABLA XVIII VALORIZACIÓN FACTORES TÉCNICOS RIPIOS DE LIXIVIACIÓN, SISMO (SERNAGEOMIN, 2014)	27
TABLA XIX VALORIZACIÓN FACTORES TÉCNICOS RIPIOS DE LIXIVIACIÓN, EROSIÓN HÍDRICA (SERNAGEOMIN, 2014)	28
TABLA XX VALORIZACIÓN FACTORES TÉCNICOS RIPIOS DE LIXIVIACIÓN, INUNDACIÓN (SERNAGEOMIN, 2014)	28
TABLA XXI VALORIZACIÓN FACTORES TÉCNICOS DEPOSITO DE ESTÉRILES, PRECIPITACIÓN (SERNAGEOMIN, 2014)	29
TABLA XXII VALORIZACIÓN FACTORES TÉCNICOS ACOPIO SALES DE DESCARTE, PRECIPITACIÓN.....	30
TABLA XXIII VALORIZACIÓN FACTORES TÉCNICOS DEPOSITO DE ESTÉRILES, INUNDACIÓN (SERNAGEOMIN, 2014)	31
TABLA XXIV VALORACIÓN FACTORES TÉCNICOS ACOPIO DE SALES DE DESCARTE, INUNDACIÓN.	31
TABLA XXV VALORIZACIÓN FACTORES TÉCNICOS DEPÓSITOS DE ESTÉRILES, VIENTO (SERNAGEOMIN, 2014)	32
TABLA XXVI VALORIZACIÓN FACTORES TÉCNICOS DEPÓSITO DE ESTÉRILES, SISMO (SERNAGEOMIN, 2014)	32

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ESQUEMA DE LA DEFINICIÓN DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE UN HECHO (SERNAGEOMIN, 2014)	7
FIGURA 2 ESQUEMA DE LA DEFINICIÓN DE LA SEVERIDAD DE CONSECUENCIAS (SERNAGEOMIN, 2014)	8
FIGURA 3 ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS EN CIERRE DE FAENA MINERA (SERNAGEOMIN, 2014).....	11
FIGURA 4 DIAGRAMA DE FLUJO NUEVA VICTORIA PARA PROCESAR 15.000.000 TON/AÑO DE CALICHE (DECLARACIÓN IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO “ZONA DE MINA NUEVA VICTORIA”, RCA Nº 94/2007)	16
FIGURA 5 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PRODUCTIVO PAMPA BLANCA (DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO “ZONA DE MINA PAMPA BLANCA”, RCA Nº0278/2010)	17
FIGURA 6 ESQUEMA GENERAL DE PROCESO PRODUCCIÓN FAENA CALA CALA (DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO “ZONA DE MINA CALA CALA”, RCA Nº091/2013).....	18
FIGURA 7 ESQUEMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN FAENA ELOISA (DECLARACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO “ZONA DE MINA ELOISA”, RCA Nº0112/2012).....	19
FIGURA 8 DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DE LA PLANTA YAO LUNG CHINA (PROCESO DE SEPARACIÓN DE TIERRAS RARAS, ALGUACIL ET AL, 2007).....	21

1. INTRODUCCIÓN

Por minería no metálica se entiende la extracción de minerales de los cuales no se obtienen metales, y que comprende una amplia gama de productos. En Chile, dentro de los productos no metálicos hay algunos que mueven cantidades enormes de toneladas al año, tales como cementos, arcillas, yeso y sal.

Estos mismos productos, sin embargo, tienen escaso valor en el mercado y una distribución limitada a la economía nacional. En oposición a aquéllos, hay otros que no se producen a la misma escala, mas son altamente requeridos en el mercado mundial como lo son el litio, el yodo y los nitratos.

En la actualidad, Chile es el primer productor de yodo (ver anexo 7.1), con una participación cercana al 70% mundial. Además, las reservas de estos son las más grandes a nivel global, llegando al 100% en el caso de los nitratos naturales.

En nuestro país, la extracción de Tierras Raras aún no es un hecho, ya que sólo existe una empresa interesada en realizar este tipo de operaciones, Minera Biolantánidos, la cual hasta la fecha se encuentra paralizada. Según los comentarios de empresas chinas, Chile podría ser el próximo competidor de China en este mercado (Albornoz, 2016).

Desde que entró en vigencia la Ley 20.551 en noviembre del 2012, que regula “el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras” y su respectivo Decreto Nº 41 Aprueba Reglamento de la Ley de Cierre de Faena e Instalaciones Mineras, toda empresa minera que desee iniciar, continuar o reiniciar operaciones mineras, deberá contar con un plan de cierre de faenas debidamente aprobado por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

Esta Ley 20.551 establece que la “fase de cierre es parte del ciclo de vida de una faena” en su artículo Nº 2 y, por lo tanto, debe ser diseñada y planificada desde el principio del proyecto.

Así, se avanza hacia una minería responsable, pues la ley genera un nuevo escenario incorporando en su diseño y operación una visión o criterios orientados al cierre de las instalaciones, generando una oportunidad de incorporar buenas prácticas en la faena, optimizando sus operaciones.

Considerando lo anterior, uno de las principales factores que establece la normativa de cierre es la protección de la vida, salud y seguridad de las personas y la protección del medio ambiente, mitigando los efectos adversos que se derivan del desarrollo de la industria extractiva minera, en los lugares que esta se realice, de forma de asegurar la estabilidad física y química de las instalaciones o infraestructura remanente al cierre de las operaciones mineras.

Como apoyo a la empresa minera, en marzo del año 2014, SERNAGEOMIN desarrolla una Guía metodológica para la presentación de planes de cierre sometidos al procedimiento de

aplicación general, donde se establece la Evaluación de Riesgos para cierres de faenas mineras, centrándose principalmente en la Gran Minería del Cobre por la producción a nivel país y sus posibles impactos ambientales, dejando de lado otro tipo de minería.

Por ello, el enfoque de este trabajo se orientará a la minería superficial (shallow mining), centrándose en la Minería del Caliche y Tierras Raras con una producción mensual sobre las 10.000 toneladas, puesto que la Ley 20.551 establece que debe tener un Plan de Cierre utilizando el Procedimiento de Aplicación General, el cual debe ser presentado por “aquellas empresas mineras cuyo fin sea la extracción o beneficio de uno o más yacimientos mineros, y cuya capacidad de extracción de mineral sea superior a diez mil toneladas brutas (10.000 t) mensuales por faena minera”.

Es importante mencionar que las faenas con capacidad de extracción superior a 5.000 toneladas y menor a 10.000 toneladas mensuales de igual forma debe presentar su plan de cierre pero con el Procedimiento Simplificado, la diferencia está en que estas últimas mencionadas no presentan garantías financieras. Las de extracción inferior a 5.000 toneladas mensuales cumplen con presentar el Plan de cierre simplificado al entregar la declaración indicada en la Ley, pero no están exentas de las obligaciones.

La guía antes mencionada deja entonces sin una propuesta metodológica a una cantidad importante de industrias mineras que se dedican a otros tipos de operaciones (ver en el anexo 7.2), como son; las de caliza, sal, caliche, tierras raras entre otras, abarcando un total de 33 faenas.

Hoy en día existen 150 faenas que deben presentar su Plan de Cierre (F. Sabando, com.pers.), al menos un 22,9% corresponden a las operaciones antes mencionadas, por lo que resulta de gran importancia adaptar la metodología existente.

Se elige para la realización de este trabajo la minería superficial (shallow mining) con aplicación en la industria calichera y de tierras raras, por su presencia nacional, producción y exportaciones, siendo Chile el mayor productor y exportador de yodo en mundo y abriéndose las puertas a la minería de tierras raras con la firma de un acuerdo de exportación con Estados Unidos, que abarcaría el 2% de la producción mundial.

Se estima que el mercado mundial de tierras raras podría crecer a un ritmo medio de 13,67% al año, entre los 2017 y 2021, ya que la producción de electricidad procedente de aerogeneradores es rentable, debido a la disminución de los costes, lo que considera para un aerogeneradores de 5 MW cuenta con 1 tonelada de metales de tierras raras en su góndola (800 kg de neodimio y 200 kg de disprosio).

Para lograr establecer un análisis de riesgo que se ajuste a la industria del caliche y tierras raras, se hace necesario conocer el proceso productivo, con esta información se identificarán los Factores Técnicos (son las condiciones de operación de la instalación minera con implicancias en el post cierre), correspondientes al riesgo analizado, jerarquizando los

factores en orden de prioridad, y estimar su posible comportamiento en el caso que se presente un evento natural durante ese período de tiempo (ver anexo 7.3).

En este trabajo se identifican los factores técnicos para cada uno de los peligros y para cada instalación principal, considerando aquellos aspectos que pueden ser medidos durante la operación y que incidirán en el comportamiento de la instalación durante la etapa de post cierre.

La raíz fundamental de realizar este trabajo es poder realizar una propuesta alternativa de evaluación de riesgos, que se ajuste y se pueda aplicar a las faenas mineras de estudio.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El fin de realizar una modificación a la Guía del SERNAGEOMIN es orientar a las empresas dedicadas a la extracción de Caliche y Tierras Raras en los aspectos técnicos más importantes, como es la evaluación de riesgos para el cierre de faenas mineras.

Por esta razón, es relevante entender que la minería de Caliche tiene relevancia a nivel nacional por la cantidad de producción en toneladas que genera. La minería de Tierras Raras, como se dijo anteriormente es nueva en el país, por lo que solo hay información a nivel mundial.

En las tablas I y II que se encuentran a continuación, se presenta la información respecto al nivel de producción de Caliche (yodo y nitratos) según su ubicación geográfica.

TABLA I Producción de Nitratos por Regiones (ton) años 2007 – 2015 (SERNAGEOMIN, 2015)

AÑO/REGIÓN	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
TOTAL	1.160.684	1.157.852	1.048.706	1.058.712	927.922	822.584	759.384	722.131	795.330
Arica y Antofagasta	167.176	193.078	65.364	76.537	78.679	15.363	31.363	30.266	27.541
Tarapacá	993.508	964.504	983.342	982.175	849.243	807.221	728.021	691.865	767.789

Si bien es cierto, entre los años 2011 y 2014 la producción de nitratos tuvo una baja, pero el año 2015 se aprecia un crecimiento de la producción nacional.

TABLA II Producción de Yodos por Regiones (ton) años 2007 – 2015 (SERNAGEOMIN, 2015)

AÑO/REGIÓN	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
TOTAL	15.473	15.503	17.399	15.793	16.000	17.494	20.656	18.989	21.179
Tarapacá	9.975	10.340	11.343	10.469	11.005	11.397	11.927	11.615	13.548
Antofagasta	5.498	5.163	6.056	5.324	4.995	6.097	8.729	7.374	7.631

Desde el año 2007 se muestra una crecida en la producción, con una leve baja en el año 2014, pero en el año siguiente una subida considerable.

En la tabla III se presenta información respecto a la producción mundial de Tierras Raras.

TABLA III Estimación de Producción Mundial de Tierras Raras. Toneladas métricas equivalentes de óxido de Tierras Raras^{1,2} (USGS, 2016)

País ³	2010	2011	2012	2013	2014
Australia	--	2,188 ⁴	3,222 ⁴	3,000 ^r	8,000
Brasil	140 ⁴	140	110	330	--
China ⁵	89,200 ^r	93,800 ^r	93,800 ^r	93,800 ^r	105,000
India ⁶	1,700 ^r	1,700 ^r	1,700 ^r	1,700 ^r	1,700
Kazajstán	--	--	--	--	140
Malasia	380	410	100	180	240
Rusia	2,300	2,500	2,400	2,500	2,600
Tailandia ⁷	5,600	3,100	120 ^r	130 ^r	1,900
Estados Unidos	--	--	3,000	5,500	5,400
Vietnam	170	200	200	100	--
Total	99,500 ^r	104,000 ^r	105,000 ^r	107,000 ^r	125,000

^r Revisado. – Cero.

¹ Los totales mundiales y los datos estimados se redondean a no más de tres dígitos significativos; pueden no agregarse a los totales mostrados.

² Incluye los datos disponibles hasta el 26 de agosto de 2016.

³ Además de los países enumerados, se cree que los minerales de tierras raras se producen en Indonesia, Nigeria, Corea del Norte y algunos países de Estados Independientes, pero la información es insuficiente para formular estimaciones fiables de los niveles de producción.

⁴ Figura reportada.

⁵ Cuota oficial de producción. No se pudo cuantificar la producción ilegal.

⁶ El Departamento de Energía Atómica de la India no revelará los datos de producción de monazita.

⁷ Contenido de óxido de tierras raras en las exportaciones.

Por lo que se puede apreciar en la tabla III, información contemplada hasta el 2014, China se sitúa como el mayor productor de tierras raras en el mundo, comenzando con la explotación en el año 1957 y en la actualidad generan más del 80% de la producción mundial. Estados Unidos es el tercer consumidor, iniciando sus actividades en el año 1960 siendo cerrada temporalmente el año 2002 por restricciones ambientales y una década mas tarde reabierta, generando el 9% de la producción.

A pesar que India no supera el 2% del total mundial se sitúa en tercer lugar de los mayores productores. Rusia partió el año 2013, representa un 2% de la producción mundial, es un país que el consumo de tierras raras está en aumento.

Australia representa el 7% de la producción mundial incluyendo la producción de Malasia, iniciando su explotación en el año 2011. El resto de los países que producen tierras raras no alcanzan a superar el 1% de la producción total (ver anexo 7.4).

1.3 ALCANCE

El alcance de este estudio contempla realizar un ajuste al análisis de riesgo elaborado por el SERNAGEOMIN, que pueda ser de utilidad en operaciones mineras de Caliche y Tierras Raras, ayudando en la etapa de cierre a la prevención, minimización y control de los riesgos y efectos negativos que se puedan generar al cese de las operaciones o posterior a éste, sobre la salud y seguridad de las personas o el medio ambiente.

1.4. OBJETIVOS

Objetivo General

Ajustar la propuesta de análisis de riesgo de SERNAGEOMIN para la estabilidad física y química, adaptándose a la realidad de operaciones de la extracción de la Minería de Caliche y Tierras Raras en su etapa de cierre.

Objetivos Específicos

Para cumplir con el objetivo general, se consideraran los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar las instalaciones en la Gran Minería de Caliche y Tierras Raras para el análisis de riesgo en la etapa de cierre.
2. Identificar los peligros en las instalaciones de la Gran Minería de Caliche y Tierras Raras al cierre.
3. Adecuar la metodología de SERNAGEOMIN con los nuevos Factores Técnicos, para obtener los niveles de riesgo para cada una de las instalaciones en etapa de cierre de la Gran Minería de Caliche y Tierras Raras.

2. ANTECEDENTES

2.1 Contexto general de la investigación.

Si bien es cierto, el Caliche es parte de la Minería no metálica, unos de sus minerales se comercializa como metálico, como es el caso del Yodo.

El Caliche se puede definir como un conglomerado de origen sedimentario (rocas unidas por otro material que hace la función de cemento). La palabra deriva del vocablo quechua, que inicialmente denominaba "cachi" a este mineral. En su lengua, significa sal. El término fue derivando en "calchi", hasta que llegó a "caliche", que es como se conoce hoy en día. Contiene 43 elementos y compuestos, siendo los más importantes los nitratos y el yodo.

La explotación de nitratos comenzó en el norte de Chile en 1830, aunque algunas labores menores ya se habían desarrollado en 1820 e incluso en 1810. El principal uso de los nitratos, en aquellos tiempos, era para producción de explosivos (pólvora negra) y, en menor medida, para fertilizantes.

Chile es el mayor productor y exportador de yodo del mundo, es utilizado principalmente en medicina como desinfectante, en agricultura como complemento alimenticio, en productos farmacéuticos como medio de contraste para rayos X, en producción de fibras sintéticas y moléculas orgánicas, etc.

Por otra parte, "Tierras raras" es el nombre común que reciben un grupo de 18 elementos que tiene propiedades particulares dentro de la tabla periódica. En la carta geoquímica se incluyen 16 de estos elementos del grupo de los lantánidos: itrio, escandio, lantano, cerio, praseodimio, neodimio, samario, europio, gadolinio, terbio, disprosio, holmio, erbio, tulio, iterbio y lutecio.

Los principales usos de las tierras raras se relacionan actualmente con tecnologías modernas muy variadas, como por ejemplo imanes para computadores, lámparas halógenas, equipos de resonancia magnética, pantallas para televisores, aleaciones de acero, componente de fibras ópticas, fuente de radiación para dispositivos de rayos-x portátiles, encendedores (el metal que da la chispa), catalizador en el refinamiento del petróleo y para fabricar aleaciones metálicas, entre otros usos.

La minería de Tierras Raras corresponde a una iniciativa única, no sólo en la región y el país, sino que pretende convertirse en el primer actor en Chile en desarrollar el mercado de tipo de operación, a través de un proceso de innovación específicamente concebido para la explotación de Lantánidos.

El proceso productivo en la minería del caliche y tierras raras son similares en sus operaciones unitarias ya en ambas existe un intercambio de energía del tipo físico que parten desde su gran mina a rajo, extracción de sus minerales, plantas de tratamiento, lixiviación en pilas, pozas de evaporación y acopio de sales de descarte.

Ambas operaciones presentan varias zonas de mina, se extraen una gran cantidad de toneladas de material para poder procesar y obtener lo que requiere cada minería.

2.2 Metodología SERNAGEOMIN

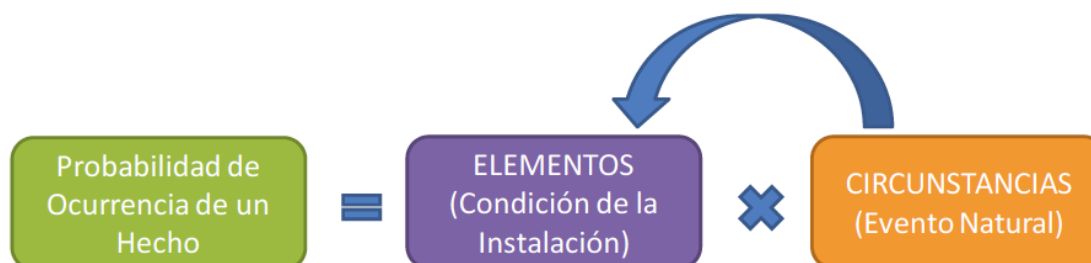
La metodología sugerida por SERNAGEOMIN “permite obtener los niveles de riesgo para cada una de las instalaciones de la faena, mediante la combinación de dos elementos esenciales en el análisis: la Probabilidad de ocurrencia de un hecho y la Severidad de sus consecuencias. Conforme a ello, se han establecido procedimientos de análisis para cada uno de estos elementos, bajo el criterio de la singularidad que cada instalación minera” (SERNAGEOMIN, 2014).

Esta metodología de evaluación de riesgos de SERNAGEOMIN está enfocada en las instalaciones principales remanentes de las faenas mineras, como son los depósitos de relaves, depósitos de estériles, pilas de lixiviación, mina rajo y mina subterránea.

La evaluación de riesgos para el cierre de faenas mineras es una tarea compleja que abarca desde el análisis del evento que podría desencadenar el riesgo, su probabilidad de ocurrencia en un período determinado y la severidad de sus consecuencias entre otros aspectos.

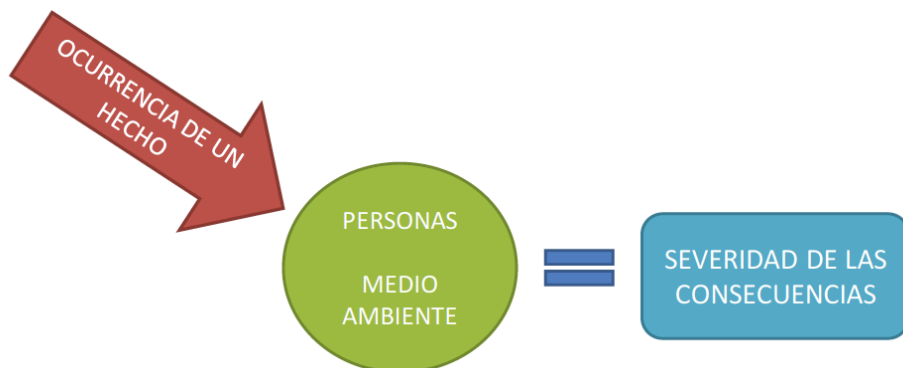
Se puede definir el término Probabilidad como, Probabilidad de Ocurrencia de un hecho, a la combinación de circunstancias y elementos que provocan un evento no deseado que trae consigo consecuencias para las personas y el medioambiente.

FIGURA 1 Esquema de la definición de Probabilidad de Ocurrencia de un Hecho (SERNAGEOMIN, 2014)



Se entiende como Severidad de las Consecuencias al grado de impacto o daño que pueda generarse como resultado de la ocurrencia del hecho sobre las personas y el Medio Ambiente existentes en el área de estudio.

FIGURA 2 Esquema de la definición de la Severidad de Consecuencias (SERNAGEOMIN, 2014)



Con estos dos valores, probabilidad y severidad de consecuencias, aplicando una tabla de doble entrada se puede determinar el valor del riesgo, para el escenario de peligros en cuestión, pudiendo determinarse si se trata de un riesgo significativo o no, como se aprecia en la tabla IV.

TABLA IV Tabla de Evaluación de Riesgos (SERNAGEOMIN, 2014)

		Severidad de las Consecuencias				
		Muy alta	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
Probabilidad de Ocurrencia del Hecho	Muy alta	Muy Alto	Muy Alto	Alto	Alto	Medio
	Alta	Muy Alto	Alto	Alto	Medio	Medio
	Moderada	Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo
	Baja	Alto	Medio	Medio	Bajo	Bajo
	Muy baja	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Bajo

Esta metodología se basa principalmente en la Gran Minería del cobre, ya sea por la producción a nivel país o por sus posibles impactos ambientales, pero independiente que se realizara con esa finalidad, se debe determinar si algunos de los parámetros podrían ser utilizados en otro tipo de minería.

También es importante destacar la importancia de determinar los Factores Técnicos incluidos en la metodología, ya que estos son las condiciones de operación de la instalación minera con implicancias en el post cierre.

2.3 Estado del Arte

En Chile, la minería es una industria clave en el desarrollo del país. Nuestra historia minera se remonta a periodos anteriores a la llegada de los españoles, existiendo testimonios que las culturas autóctonas extrajeron cobre, oro y plata. Trabajos arqueológicos han encontrado piezas de cobre datadas hasta en 2.500 años de antigüedad (Casa de la Paz, 2011).

Dentro de la minería no metálica se encuentra el Caliche, uno de sus minerales es el yodo, siendo el más pesado de los elementos, actualmente este mineral se vende como metálico. En la naturaleza no se encuentra en su estado libre, sino en sus formas de yoduro, yodatos y en combinaciones orgánicas. En 1830, se informó públicamente que migas de pan se tornaban azules en las aguas madres de las paradas, lo que delataba la existencia de yodo, pero no identificó al descubridor (Blake, 1830).

El salitre, fue otro mineral altamente explotado en la década del 1880, su demanda estaba relacionada a su uso como fertilizante y se exportaban grandes cantidades a Europa. Con la entrada al mercado del salitre sintético la producción nacional de este mineral cayó abruptamente, lo que coincide con la crisis económica de 1923 (Casa de la Paz, 2011).

Antiguamente no era de gran importancia cerrar una faena minera y hacerse cargo de los impactos generados por la actividad extractiva. Esta falta de preocupación se debía básicamente a la falta de regulación en la materia y al desconocimiento de los impactos que se generan. Es así como hoy en día podemos encontrar un sin número de lugares con evidencias de que en esos sectores se desarrolló algún tipo de minería (Leturia, 2003).

A nivel mundial se ha desarrollado un trabajo considerable para minimizar el impacto de la minería en las comunidades, reconociendo que la gestión de riesgos como una de las herramientas mas poderosas disponibles. Esto también considera la utilización de estimaciones cualitativas y cuantitativas para producir el factor de riesgo de cierre (CRF), contemplando diversos componentes de riesgo significativo del cierre de la mina, como son los riesgos ambientales, riesgos de seguridad y salud, riesgos sociales y comunitarios, riesgos técnicos, entre otros. (Laurence, 2005)

3. METODOLOGÍA

El fin del presente estudio es determinar las instalaciones de Caliche y Tierras Raras, identificar los peligros en las instalaciones y evaluar los riesgos según la metodología de SERNAGEOMIN con los nuevos Factores Técnicos.

En los siguientes apartados se detalla cada una de las etapas desarrolladas para este estudio.

3.1 Instalación de operaciones mineras de Caliche y Tierras Raras.

La metodología utilizada para la recolección de datos que permiten identificar faenas mineras de Caliche y Tierras Raras será la revisión bibliográfica contenida casi en su totalidad por la información que entrega SERNAGEOMIN, en sus diferentes informes o estadísticas, como son: el Anuario de Minería de Chile del año 2015, el Atlas de Faenas Mineras Arica y Parinacota y de Tarapacá del año 2012, el Atlas de Faenas Mineras Antofagasta y Atacama del año 2012 y Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO).

3.2 Identificación de los Peligros.

Para la identificación de los peligros, se hace necesario conocer cuales son las características de las instalaciones de las faenas de Caliche y Tierras Raras, por lo que se realizara un levantamiento de procesos productivos de éstas, a través de las diferentes Resoluciones de Calificación Ambiental ingresadas al Servicio de Evaluación Ambiental, así poder determinar las instalaciones principales remanentes que cada una de las faenas mineras deja después del cierre.

La Guía de Evaluación de Riesgos del SERNAGEOMIN, ha considerado 14 instalaciones típicas, que agrupa en tres tipos: Principales (6), Complementarias (5) y Auxiliares (3) (ver anexo 7.5).

Para efecto de esta tesis se revisará cada uno de ellos y se estimará si es pertinente dejar los mismos peligros, o bien, reducir o cambiar alguno de ellos, para adecuarlos a la operación de las faenas mineras de Caliche y Tierras Raras.

Las instalaciones que se consideraran son las principales, ya que normalmente son las remanentes al cierre de la faena minera, mientras que las complementarias y auxiliares se espera sean desmanteladas y sus residuos manejados.

3.3 Modificación de la metodología de SERNAGEOMIN

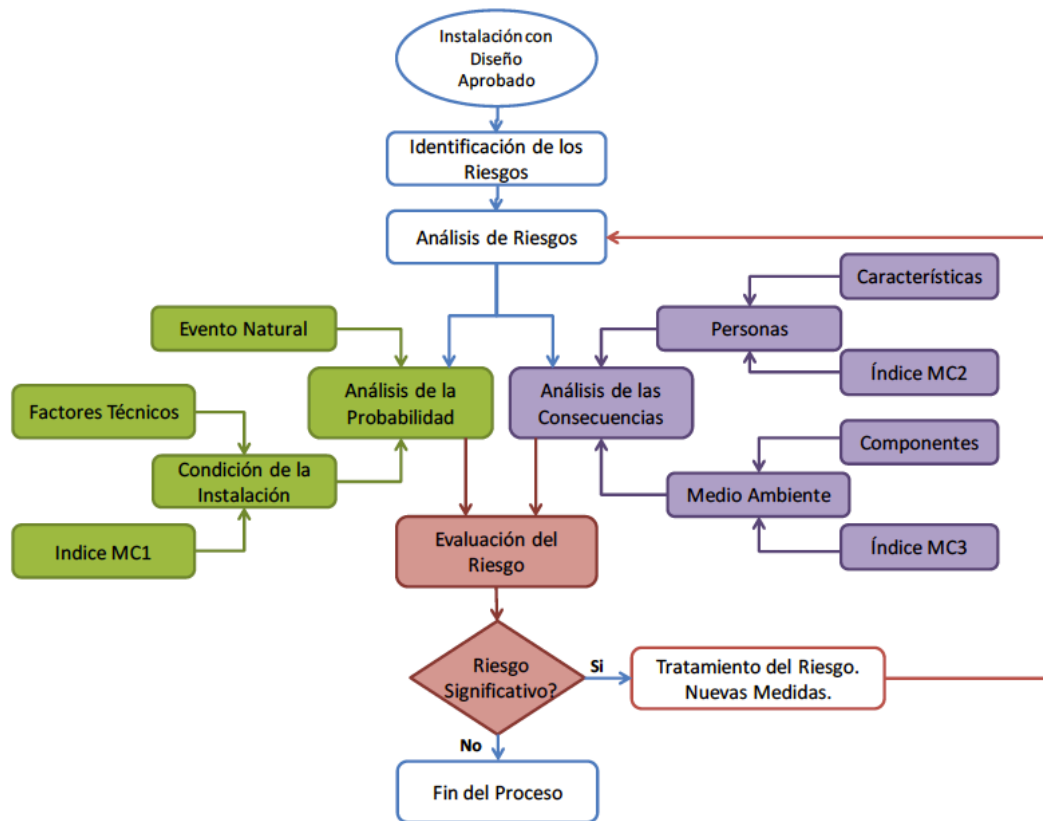
Al tener identificadas las instalaciones principales de cada minería, se debe establecer si los Factores Técnicos que incluye la Guía se pueden adecuar a lo que se requiere, o bien, se deben modificar.

Para modificar la metodología se deberán establecer los nuevos Factores Técnicos para cada una de las instalaciones, realizando un análisis por cada riesgo encontrado a cada una de las instalaciones remanentes.

Es de suma importancia establecer los Factores Técnicos, ya que estos son las condiciones de operación de la instalación minera, con implicancias en el post cierre, que permitirá estimar su posible comportamiento en el caso que se presente un evento natural durante ese período de tiempo (SERNAGEOMIN).

Para desarrollar la evaluación de riesgos de cada una de las instalaciones, la Guía propone que se debe desarrollar una serie de pasos, ya que cada instalación es distinta una de otra y por lo tanto la evaluación de riesgos es única y particular. Los pasos se muestran en la Figura 5.

FIGURA 3 Esquema de la Metodología propuesta para la Evaluación de Riesgos en Cierre de Faena Minera (SERNAGEOMIN, 2014)



Como se aprecia en la figura 5, la evaluación de riesgos se debe realizar considerando los compromisos que hayan sido aprobados en el diseño. Para efectos de esta tesis el ajuste al Análisis de Riesgo de SERNAGEOMIN se realizara de la siguiente forma:

- Identificación de instalaciones mineras: se revisara en detalle las instalaciones principales que contempla la Guía, y se establecerá si estas son asimilables a la minería de Caliche y Tierras Raras, de no ser se deberán establecer las nuevas.
- Identificación de los peligros: en cada una de las instalaciones principales se identificará los peligros más relevantes, determinando cual es el hecho que puede provocar un determinado riesgo y basándose en ello se analiza cual es la causa que puede desencadenarlo, por ejemplo la falla en la talud del rajo a causa de un sismo. Para ellos se deberá evaluar quiénes serían los afectados por el hecho. (Ver anexo 7.6).
- Evaluación de los riesgos: este paso es determinar la probabilidad de ocurrencia de un hecho y la severidad de sus consecuencias tanto para las personas como para el medio ambiente.

La primera esta relacionada con los factores técnicos propios de la operación minera y efectividad de las medidas de cierre propuestas, como ejemplo un sismo de determinada magnitud. La severidad va de acuerdo al resguardo de la salud y seguridad de las personas y el medio ambiente. Considerándose en la evaluación el evento natural y la condición de la instalación minera.

Es aquí donde se revisan los factores técnicos de la Guía para cada uno de los riesgos identificados y para cada instalación principal, lo que contempla los rangos de valorización y los criterios de valorización.

También en este punto se revisa el Índice de medidas de cierre que inciden en la probabilidad de ocurrencia de un hecho, el cual contempla las medidas de cierre y el nivel de efectividad de las medidas de cierre.

Otro punto es la determinación de la condición de la instalación minera, que esta determinada por la relación de los factores técnicos de operación que inciden en el post cierre y la efectividad que se le asigna a las medidas.

- Análisis de la severidad de las consecuencias: se determina por el grado de impacto o daño que pueda producirse como resultado de la ocurrencia de un hecho sobre las personas y el medio ambiente existentes en el área de influencia.

4. RESULTADOS

4.1 Determinar las instalaciones en la Gran Minería de Caliche y Tierras Raras para el análisis de Riesgo en etapa de cierre.

Para continuar con este estudio, se determinarían cuáles son las faenas que cumplen con los requisitos antes mencionados (cantidad de producción), también se hace necesario conocer su localización, número de instalaciones, producción e información relativa a la condición de cada una de ellas, ya sea si se encuentra activa o paralizada.

Como bien se ha señalado, el Caliche se encuentra compuesto por una gama variada de minerales, de estos los más relevantes son Yodo y Nitratos. Los recursos y reservas de Caliche estimados por SERNAGEOMIN (2007), ascendían a 2.459 millones de toneladas con una ley media de 6,3% de nitratos.

Con respecto a faenas de Tierras, Minera Biolantánidos es la única empresa que ha presentado un proyecto de extracción de Tierras raras, con el nombre Proyecto Minero El Cabrito, que consiste en la construcción y operación de una faena minera junto con una planta para la producción de óxidos de Lantánidos, más conocidos como Tierras Raras, con una capacidad de hasta 210 ton/hora de mineral para obtener entre 500 y 700 ton/año. La empresa presentó su Declaración de Impacto Ambiental (DIA) al Servicio de Evaluación Ambiental, la cual al 28 de mayo de 2017 se encuentra como No Calificado.

Como se expresó en el párrafo anterior, en nuestro país no cuenta con faenas de extracción de Tierras Raras, por lo que no se presentaría información de ello.

En la tabla que se encuentra a continuación se presentan las instalaciones que tienen operaciones de extracción de yodo y nitratos, indicando la cantidad de producción en toneladas por año, su ubicación, nombre y estado de la faena.

TABLA V Instalaciones Mineras de Nitratos y Yodo

Nombre Empresa	Nombre Faena	Ubicación	Estado	Producción Nitratos ton/año	Producción Yodo ton/año	Fuente /año
SQM	Pedro de Valdivia	Antofagasta	Cerrada Temporal	1.500.000	2.752	RCA N°0072/2002
	María Elena	Antofagasta	Cerrada Temporal		95	RCA N°076/2000
	Pampa Blanca	Antofagasta	Activa	1.293.000	10.000	RCA N°0278/2010
	Nueva Victoria (Iris)	Tarapacá	Activa	700.000	9.000	RCA N°094/2007
	Pampa Hermosa	Tarapacá	Activa	1.200.000	6.500	RCA N°890/2010
	Coya Sur	Antofagasta	Activa	1.000.000		RCA N°194/2011
	Orcoma	Tarapacá	En Calificación	320.325	2.500	RA N°088/2015
ACF	Algorta	Antofagasta	Activa		4.000	RCA N°0224/2010
	Laguna	Tarapacá	Activa		3.000	DIA / 2013
ATACAMA MINERALS	Aguas Blancas	Antofagasta	Activa	100.000	1.300	RCA N°54/2007
BULLMINE	Planta Bullmine Huara	Tarapacá	Cerrada Temporal		1.000	RCA N°010/2010
ELOISA SPA	Eloísa	Tarapacá	Activa	200.000	2.000	RCA N°0112/2012
COSAYACH	Negreiros	Tarapacá	Activa (Disminuida)	30.000	770	RCA N°090/2014
	Soledad	Tarapacá	Activa (Disminuida)		770	RCA N°001/2013
	Cala Cala	Tarapacá	Activa (Disminuida)	40.000	1.800	RCA N°091/2013

4.2 Identificar los Peligros en las instalaciones de la Gran Minería de Caliche y Tierras Raras.

En este objetivo específico, se hace necesario conocer a fondo como se desarrolla el proceso productivo de estas minerías, por lo que ha continuación se describirán por separado cada una de ellas.

También se presentaras algunos diagramas de flujo de faenas de Caliche y Tierras Raras, para hacer explícito las modificaciones que se le realizarán a los Factores Técnicos de la Guía de SERNAGEOMIN.

4.2.1 Descripción proceso productivo de la Minería del Caliche

La mayoría de estas faenas tiene un proceso productivo muy parecido, el proceso generalmente comienza con bulldozers que rompen y remueven la sobrecarga de la mancha en explotación. Posteriormente se ejecutan sondajes de producción para luego dar paso a la etapa de tronadura que rompe el manto Caliche.

La extracción del mineral Caliche se realiza desde la zona de Mina con camiones tolva, el mineral en bruto es cargado en pilas y lixiviado para producir soluciones concentradas que contienen nitrato, yodo y potasio, estas se construyen sobre carpetas impermeables, sometiéndolas a un riego controlado con una mezcla de agua industrial y solución de descarte de la Planta Química para lixiviar las sales de yodo contenidas.

Dichas soluciones se envían luego a plantas en las que se extrae el yodo y nitrato posteriormente, las soluciones restantes se envían a pozas de evaporación solar en las que se evaporan las soluciones y se producen sales ricas en nitrato y potasio. Existen algunas faenas que la extracción de los minerales la realiza con solventes lo cual se utiliza para concentrar antes del ingreso a planta.

Con el proceso antes descrito en forma resumida, y según la información entregada por cada una de las empresas antes mencionadas en sus Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA), se pueden identificar cuatro instalaciones principales: Mina Rajo, Lixiviación en Pilas, Pozas de Evaporación y Acopio de Sales de descarte.

A continuación se presentan algunos procesos productivos de faenas Mineras de Caliche.

FIGURA 4 Diagrama de Flujo Nueva Victoria para procesar 15.000.000 ton/año de Caliche (Declaración Impacto Ambiental Proyecto “Zona de Mina Nueva Victoria”, RCA Nº 94/2007)

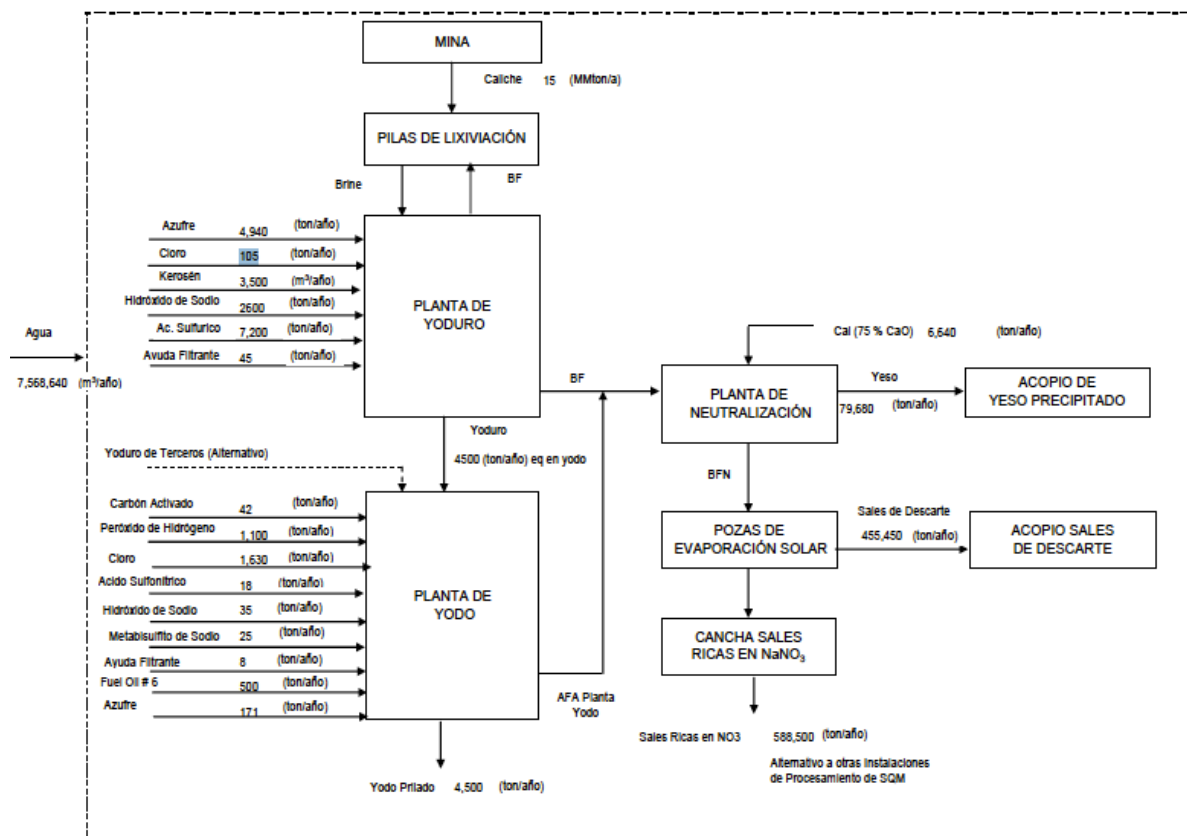


FIGURA 5 Diagrama de Flujo del Proceso Productivo Pampa Blanca (Declaración de Impacto Ambiental Proyecto “Zona de Mina Pampa Blanca”, RCA N°0278/2010)

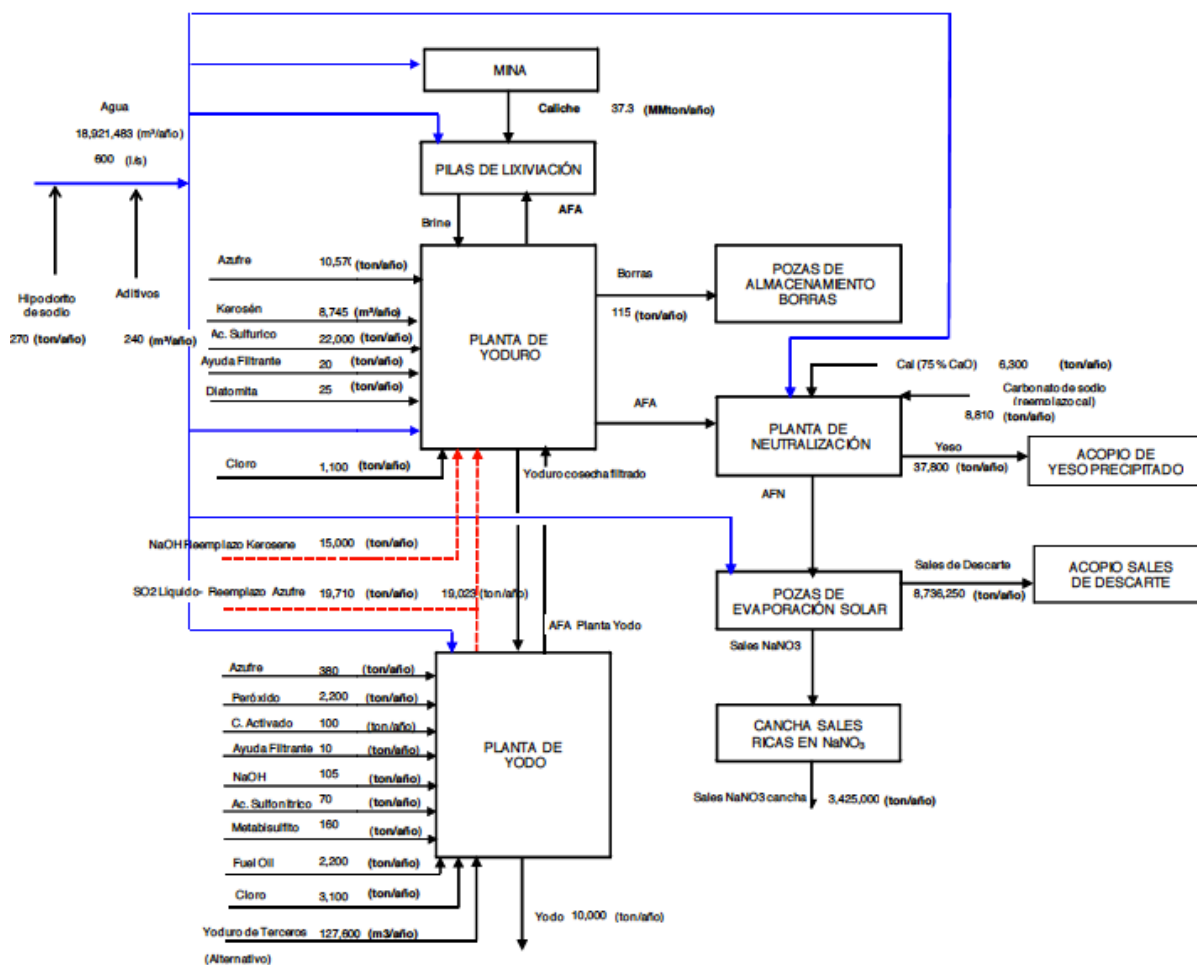


FIGURA 6 Esquema General de Proceso Producción Faena Cala Cala (Declaración de Impacto Ambiental Proyecto “Zona de Mina Cala Cala”, RCA Nº091/2013)

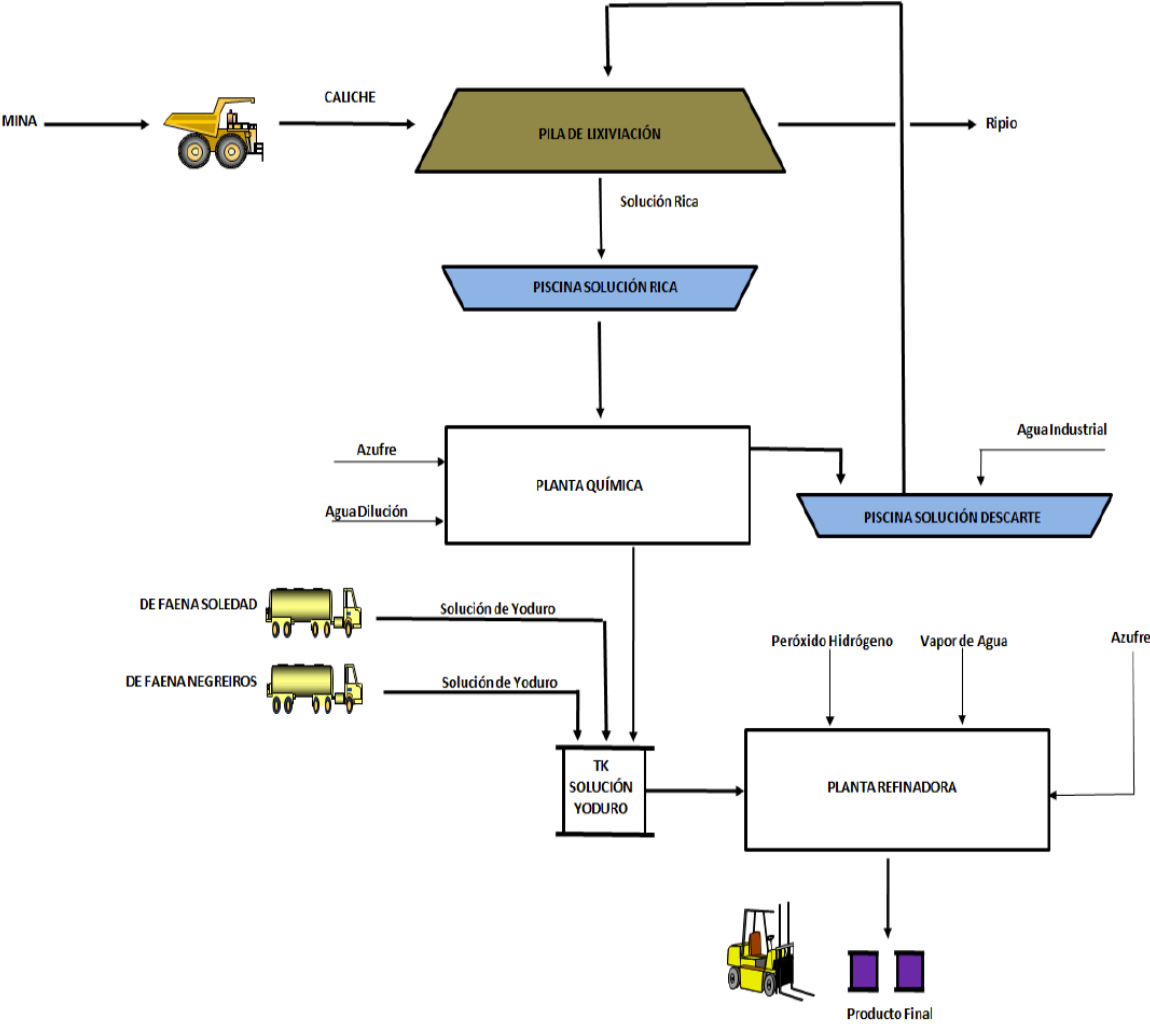
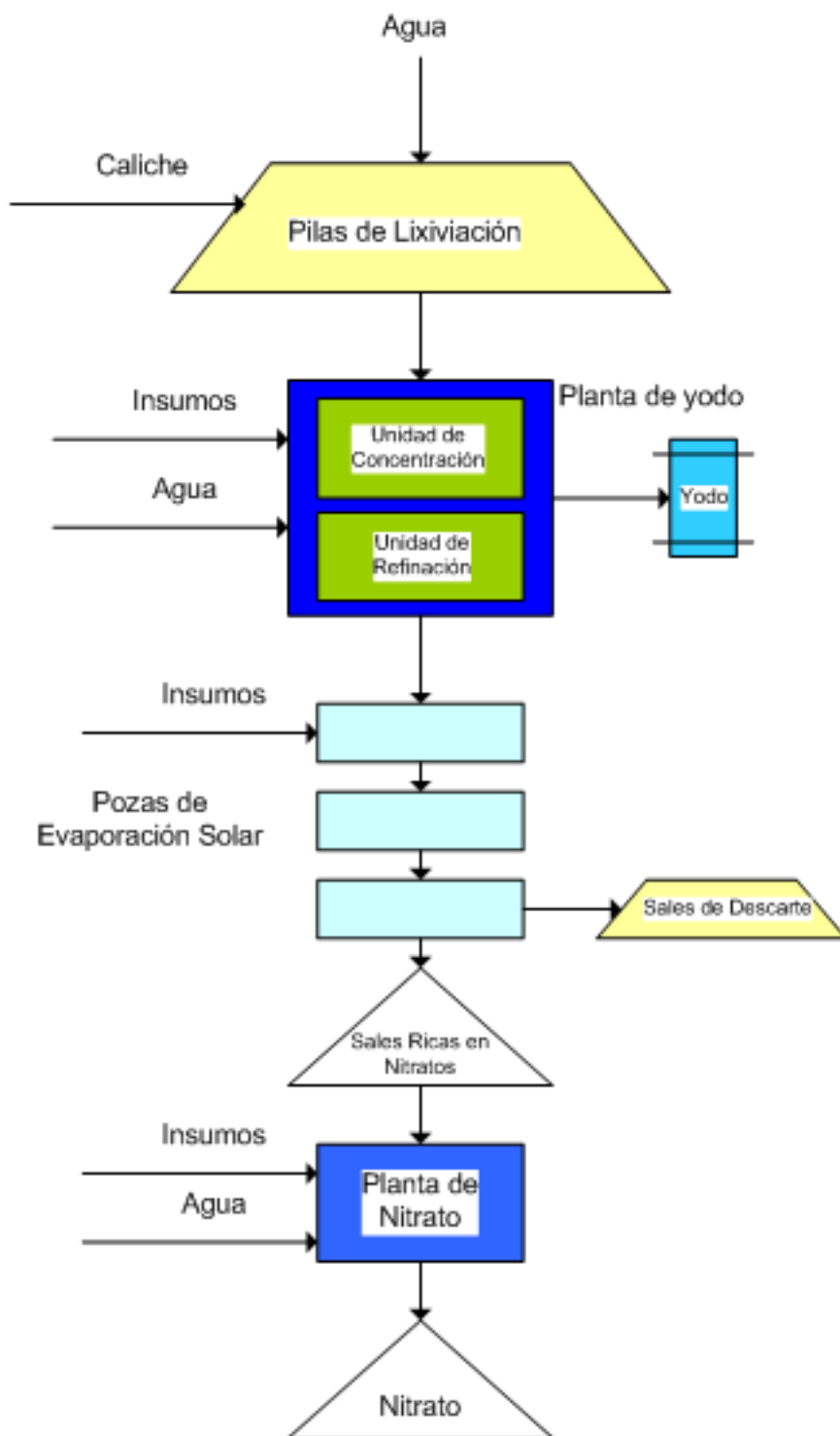


FIGURA 7 Esquema del Proceso de Producción Faena Eloísa (Declaración de Impacto Ambiental Proyecto “Zona de Mina Eloísa”, RCA N°0112/2012)



Se han presentado algunos diagramas de flujo de los procesos productivos del Caliche, donde se puede ver que son muy similares entre sí, a excepción de la extracción por solventes que utiliza la empresa SQM para concentrar las soluciones antes de ingresar a planta y la utilización de pozas de evaporación para obtener nitratos.

Las operaciones de extracción de mineral son las mismas, siendo la única diferencia el beneficio que da la utilización de solventes antes del ingreso a planta para la obtención de yodo.

4.2.2 Descripción proceso productivo de la Minería Tierras Raras

Actualmente, el principal productor de tierras raras es China, concentrando cerca del 95% de la producción mundial. Dado que estos elementos se ocupan en implementos tecnológicos, se estima que su demanda irá en aumento, lo que ha llevado a países industrializados (USA, Alemania) a buscar nuevas fuentes para estos recursos.

Las instalaciones de la planta piloto ubicada en Penco, incluyen dos pilas de arcillas, piscinas, filtros y bombas para la impulsión de la solución rica en Tierras Raras durante el proceso; y un horno para el secado del producto final. Las piscinas, correspondientes al proceso de lixiviación en pilas, fueron excavadas en terreno e impermeabilizadas por medio de membrana de HDPE.

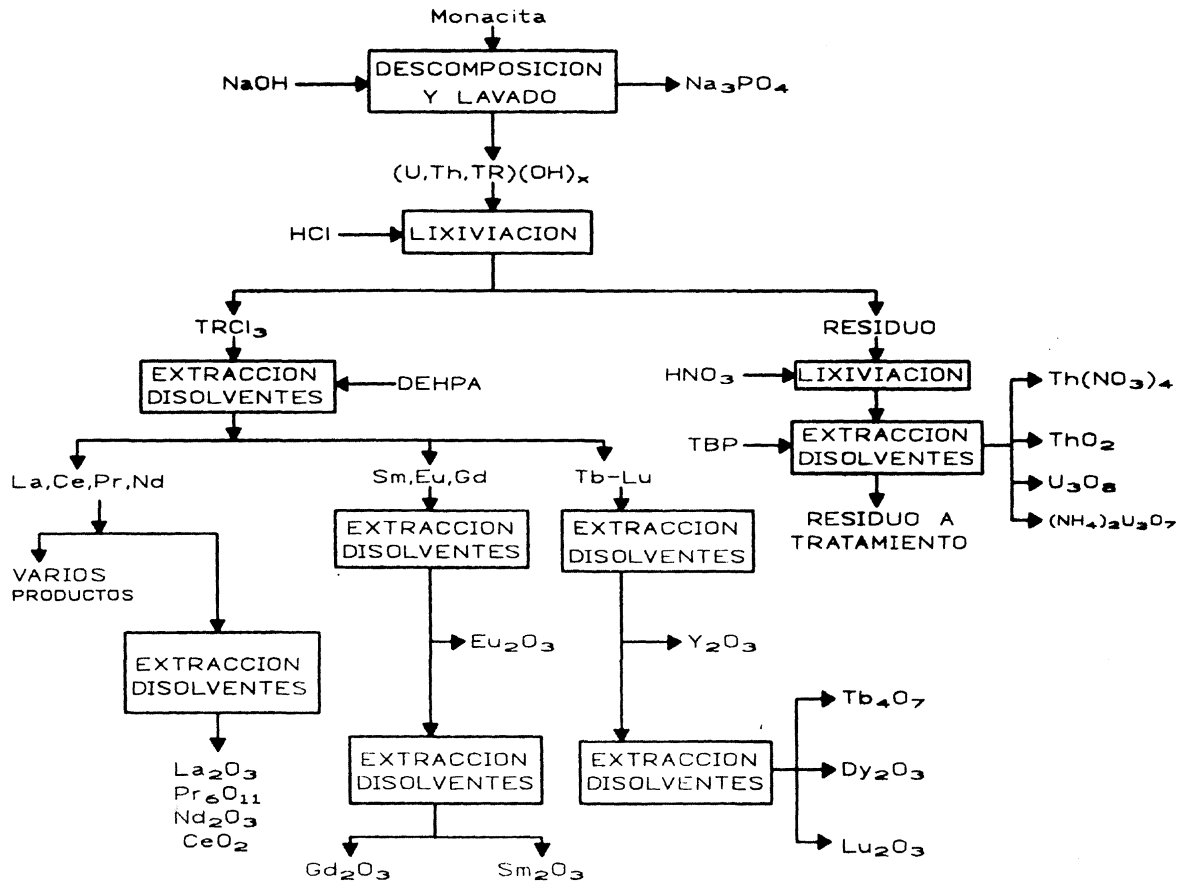
El proceso creado por la empresa consiste en un circuito continuo, por el cual se separa el material valioso de la arcilla, mediante la mezcla de estas en una solución con disolventes, de manera que se separen los elementos que constituyen el objetivo del proyecto. Posteriormente, se decantan, se precipitan y se filtran los elementos no deseados para después extraer los carbonatos de Tierras Raras por sedimentación y filtración.

Finalmente, se recupera la solución con disolventes, se regula su pH y se devuelve a la etapa inicial del proceso. Por otro lado, los carbonatos pasan a un horno de secado para obtener los Óxidos de Tierras Raras. El proceso generado en esta empresa es parecido al que se realiza en otros lugares del mundo como en la planta Yao Lung de China, que se puede apreciar en la Figura 10.

En este proceso se pueden identificar tres instalaciones principales: Mina rajo, Lixiviación en pilas y Acopio de residuos.

A continuación se presenta el diagrama de flujo de la planta Yao Lung de China.

FIGURA 8 Diagrama de flujo simplificado de la planta Yao Lung China (Proceso de separación de Tierras Raras, Alguacil et al, 2007)



La finalidad de presentar los diagrama de flujo, es expresar que estas minerías tienen mucho en común con respecto a la construcción y operación de las plantas.

Tal como se ha planteado en los objetivos específicos, se determinó en su totalidad las instalaciones que se encuentran hoy en día operando faenas dedicadas al Caliche y Tierras Raras, identificando sus instalaciones principales, por lo que en esta etapa se llevará a cabo la Metodología SERNAGEOMIN para definir los factores técnicos para las instalaciones.

Esto se llevará a cabo de acuerdo con los anexo D y E de la Guía de Evaluación de Riesgos para el Cierre de Faenas Mineras, con el fin de focalizar la metodología en aquellas que permanecerán luego de que la faena cierre (etapa de post cierre).

4.3 Adecuación de la metodología SERNAGEOMIN con los nuevos Factores Técnicos, con el propósito de obtener los niveles de riesgos para cada una de las instalaciones en etapa de cierre de la Gran Minería de Caliche y Tierras Raras.

En este objetivo específico, se revisaran los peligros identificados por la Guía, comparándolos con los obtenidos de los procesos productivos antes mencionados, para ello se revisara cada uno de forma ordenada, con tal de especificar el porque de los ajustes realizados.

El propósito de esto es relevante para poder establecer si la Guía antes mencionada puede ser de ayuda para otro tipo de faenas como la de este estudio, definir cuales serian los cambios mas significativos y que se dejara o cambiara de la Guía.

4.3.1 Evaluación de Riesgos Gran Minería del Caliche y Tierras Raras

Como ya se conocen las instalaciones principales, este proceso se debe realizar tanto para los resultados de severidad obtenida para las personas y para el medio ambiente, de modo que se tendrán dos niveles de riesgos para cada una. Las instalaciones Principales serian Mina Rajo, Lixiviación en Pilas, Pozas de Evaporación y Acopio de Sales de descarte.

Se realizará la evaluación de Lixiviación en Pilas y Acopio de Sales de descarte. Las Pozas de Evaporación se tomaran de la misma forma que la Mina Rajo, ya que sus características son muy similares en alturas, números de banco, etc.

TABLA VI Riesgos Identificados para Mina Rajo Abierto (SERNAGEOMIN, 2014)

Instalación Minera	Codificación	Riesgos	Receptores
Mina Rajo Abierto (MR)	MR 1	MR 1. P	Personas
		MR 1. MA	Medio Ambiente
	MR 2	MR 2. P	Personas
		MR 2. MA	Medio Ambiente

La Mina Rajo ya se encuentran incluida en la Guía del SERNAGEOMIN, pero de igual forma se modifica, ya que para este caso no se encuentran Drenaje Ácido de Roca como se aprecia en siguiente tabla.

TABLA VII Riesgos Identificados para Mina Rajo Abierto Modificada

Instalación Minera	Codificación	Riesgos	Receptores
Mina Rajo Abierto (MR)	MR 1	MR 1. P	Personas
		MR 1. MA	Medio Ambiente

TABLA VIII Riesgos Identificados para Pozas de Evaporación

Instalación Minera	Codificación	Riesgos	Receptores
Pozas de Evaporación (PE)	PE 1	PE 1. P	Falla en la talud del rajo (que sobrepase la zona de exclusión) a causa de un sismo
		PE 1. MA	
			Personas
			Medio Ambiente

TABLA IX Riesgos Identificados para Rípios de Lixiviación (SERNAGEOMIN, 2014)

Instalación Minera	Codificación	Riesgos	Receptores	
Rípios de Lixiviación (RL)	RL 1	RL 1.P	Falla de talud a causa de un sismo.	
		RL 1.MA		
				Personas
				Medio Ambiente
	RL 2	RL 2.P	Falla de talud a causa de erosión hídrica.	
		RL 2.MA		
				Personas
				Medio Ambiente
	RL 3	RL 3.1.P	Contaminación de agua subterránea a causa de infiltración DAR (pilas estáticas)	
		RL 3.1.MA		
		RL 3.2.P	Contaminación de agua subterránea a causa de infiltración DAR (Botaderos de Rípios de Lixiviación)	
		RL 3.2.MA		
			Personas	
			Medio Ambiente	
RL 4	RL 4.P	Contaminación de agua superficial a causa de crecida/inundación.		
	RL 4.MA			
			Personas	
			Medio Ambiente	
RL 5	RL 5.P	Contaminación atmosférica por material paticulado suspendido a causa del viento.		
	RL 5.MA			
			Personas	
			Medio Ambiente	

Con la información de la tabla anterior, se procedió a elaborar la identificación de riesgos para las Pilas de Lixiviación, como se muestra a continuación.

TABLA X Riesgos Identificados para las Pilas de Lixiviación

Instalación Minera	Codificación	Riesgos	Receptores	
Pila de Lixiviación (PL)	PL 1	PL 1. P	Falla de talud a causa de un sismo.	
		PL 1. MA		
				Personas
				Medio Ambiente
	PL 2	PL 2. P	Falla de talud a causa de erosión hídrica.	
		PL 2. MA		
			Personas	
			Medio Ambiente	
PL 3	PL 3. P	Contaminación de agua superficial a causa de crecida / inundación.		
	PL 3. MA			
			Personas	
			Medio Ambiente	

Los Acopios de Sales de Descarte son las sales pobres provenientes de las Pilas de Lixiviación, las cuales se acumulan, muchas veces quedando en la faena una vez cerrada, por tratarse de residuos mineros masivos. La modificación que se realiza es con respecto al Drenaje Ácido de Roca, el cual no se encuentra presente en la minería de estudio.

TABLA XI Riesgos Identificados para Depósitos de Estériles (SERNAGEOMIN, 2014)

Instalación Minera	Codificación	Riesgos	Receptores
Deposito de Estériles (DE)	DE 1 DE 1.P DE 1.MA	Contaminación de aguas subterráneas a causa de lluvia. (infiltración de soluciones)	Personas Medio Ambiente
	DE 2 DE 2.P DE 2.MA	Contaminación de aguas subterráneas a causa de crecidas.	Personas Medio Ambiente
	DE 3 DE 3.P DE 3.MA	Contaminación atmosférica por material particulado suspendido a causa del viento.	Personas Medio Ambiente
	DE 4 DE 4.P DE 4.MA	Contaminación de aguas superficiales a causa de lluvia intensa.	Personas Medio Ambiente
	DE 5 DE 5.P DE 5.MA	Por contaminación de aguas superficiales a causa de crecidas.	Personas Medio Ambiente
	DE 6 DE 6.P DE 6.MA	Por erosión hídrica a causa de lluvia o deshielo diferido intenso.	Personas Medio Ambiente
	DE 7 DE 7.P DE 7.MA	Por deslizamiento a causa de un sismo.	Personas Medio Ambiente

TABLA XII Riesgos Identificados para Acopio de Sales de Descarte

Instalación Minera	Codificación	Riesgos	Receptores
Acopio Sales de Descarte (ASD)	ASD 1 ASD 1.P ASD 1.MA	Contaminación de aguas superficiales a causa de crecida / inundación.	Personas Medio Ambiente
	ASD 2 ASD 2.P ASD 2.MA	Contaminación de aguas superficiales a causa precipitación.	Personas Medio Ambiente
	ASD 3 ASD 3.P ASD 3.MA	Contaminación atmosférica por material particulado suspendido a causa del viento.	Personas Medio Ambiente
	ASD 4 ASD 4.P ASD 4.MA	Por deslizamiento a causa de un sismo.	Personas Medio Ambiente

Las modificaciones realizadas a la tabla XII se hacen considerando las instalaciones y en lo posible lo mas cercano a la realidad de la minería que se esta estudiando, lo que amerita modificar ya sea incluyendo o dejando los riesgos identificados expresados en la guía de SERNAGEOMIN.

4.3.2 Determinación de los Factores Técnicos de cada una de las Instalaciones con sus respectivos Riesgos Identificados.

En este apartado se llevara a cabo la modificación o ajuste de los factores técnicos antes mencionados para la minería de Caliche y Tierras Raras, se presentan 10 tablas a continuación, que tienen relación con los riesgos identificados en el punto anterior.

Antes de comenzar con las tablas de Factores Técnicos, veremos las tablas de identificación de los Riesgos para cada una de las instalaciones mineras (4). Las tablas son las siguientes:

TABLA XIII De Identificación de Riesgos en Mina Rajo

Instalación Minera (Peligro)	Causas	Riesgos
Mina rajo	Sismo	Falla de talud

TABLA XIV De Identificación de Riesgos en Pozas de Evaporación

Instalación Minera (Peligro)	Causas	Riesgos
Pozas de Evaporación	Sismo	Falla de Talud

TABLA XV De Identificación de Riesgos en Pilas de Lixiviación

Instalación Minera (Peligro)	Causas	Riesgos
Pilas de Lixiviación	Sismo	Falla de talud
	Erosión Hídrica	Falla de talud
	Inundación	Contaminación de aguas superficiales

TABLA XVI De la Identificación de Riesgos en Acopio de Sales de Descarte

Instalación Minera (Peligro)	Causas	Riesgos
Acopio de Sales de Descarte	Precipitación	Contaminación de aguas superficiales
	Inundación	Contaminación de aguas superficiales
	Viento	Contaminación atmosférica
	Sismo	Deslizamiento del acopio

En algunos casos se presentan modificaciones a lo dispuesto en la guía del SERNAGEOMIN, lo cual se explica en cada tabla.

- **Mina Rajo y Pozas de Evaporación: Sismo**

La siguiente tabla es la que establece la Guía de SERNAGEOMIN, sin realizar modificaciones, ya que los Factores Técnicos utilizados se acomodan a las características de mina rajo de la minería de estudio.

TABLA XVII Valorización de los Factores Técnicos Mina Rajo, Sismo (VFT) (SERNAGEOMIN, 2014)

Valorización / Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a	Registro de Sismo con aceleración mayor al máximo probable	Ningún evento registrado	-	-	-	Se registra
b	Reconocimiento de cambios litológicos, nuevas discontinuidades de gran longitud, o cambios de calidad de macizo rocoso	Ningún evento registrado	1 evento en período de evaluación	Entre 2 y 3 eventos en período de evaluación	Entre 4 y 5 eventos en período de evaluación	Más de 5 eventos en período de evaluación
c	Grandes deslizamientos	Ningún evento registrado	1 evento en período de evaluación	Entre 2 y 3 eventos en período de evaluación	Entre 4 y 5 eventos en período de evaluación	Más de 5 eventos en período de evaluación
d	Aparición de grietas más allá del límite de seguridad originalmente establecido	Ningún evento registrado	1 evento en período de evaluación	Entre 2 y 3 eventos en período de evaluación	Entre 4 y 5 eventos en período de evaluación	Más de 5 eventos en período de evaluación

$$\text{Valorización de los Factores Técnicos : } \mathbf{VFT = 52a + 20b + 20c + 8d}$$

- **Pilas de Lixiviación : Sismo**

En la tabla XVIII, establecida por SERNAGEOMIN para Rípios de Lixiviación, se utilizará por el parecido a las Pilas de Lixiviación, ya que la primera se refiere al botadero de rípios de una pila dinámica donde se termina de lixiviar y se construye una nueva en el sitio, retirando el material lixiviado, mientras que en las Pilas de lixiviación son pilas estáticas, las que normalmente se quedan en el sitio donde fueron construidas, o bien, se construye una nueva pila sobre la misma.

Por lo anterior no se realizan modificaciones a los Factores Técnicos de la tabla XVIII del SERNAGEOMIN.

TABLA XVIII Valorización Factores Técnicos Ripios de Lixiviación, Sismo (SERNAGEOMIN, 2014)

Valorización/ Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a Identificación de ángulos de taludes	Según diseño de ingeniería o menor	-	Desviaciones ocasionales	-	Sin monitoreo o con un ángulo superior al de diseño	
b Identificación del Grado saturación de colocación del material	De acuerdo a diseño o con menor valor	-	Ocasionalmente	-	En forma sistemática	
c Diseño de bermas	Bermas de acuerdo a diseño de ingeniería o mayor	-	Bermas ocasionalmente menor al diseño de ingeniería	-	Construcción sistemática de bermas menores a lo indicado en el diseño o bien, sin monitoreo	
d Determinación del nivel freático piezómetros en la base de la pila	De acuerdo a diseño o con menor valor	Desviaciones ocasionales 1-2 por año	Registro esporádico sin desviaciones	Desviaciones constantes por más de un año	Desviaciones constantes en todo el período y no existe control o monitoreo	
e Identificación de presencia de grietas, asentamientos, desplazamiento o deslizamientos en la base de la pila	Ningún evento registrado	Eventos ocasionales sin deslizamiento	Eventos ocasionales con deslizamiento de material (1 capa)	Eventos que involucran más de una capa y con deslizamientos	Deslizamiento de material que requiere reparación	
f Identificación de falla en el sistema de drenaje durante operación (indicador de posible vulnerabilidad en el cierre)	Ningún evento registrado	Evento puntual, 1 vez al año	Eventos ocasionales, mayores a 1 vez por año	Desviaciones frecuentes durante el año que además requieren reparación	Desviaciones sistemáticas en todo el período que requieren reparación o bien, no existe control o monitoreo geotécnico	
g Especificación de las características del material de diseño en zona de bordes o prisma resistente	Materiales utilizados de acuerdo a diseño o más competentes (Bajo contenido de finos)	-	Desviaciones ocasionales	-	Desviaciones sistemáticas. Todo el talud resistente construido con materiales poco competente	
h Control de inclusión de hielo en el prisma resistente en el caso de botadero de ripios	Ningún evento registrado	-	Ocasionalmente y sin presencia de nieve atrapada	-	En forma sistemática con hielo atrapado en el interior	

Valorización de los Factores Técnicos: **VFT = 21,5a + 21,5b + 10c + 10d + 10e + 9f + 9g + 9h**

- **Pilas de Lixiviación: Erosión Hídrica**

Al igual que en el casos anterior no se realizaron modificaciones a los Factores Técnicos, esto a raíz que las características son muy similares a la minería de estudio.

TABLA XIX Valorización Factores Técnicos Ripios de Lixiviación, Erosión Hídrica (SERNAGEOMIN, 2014)

	Valorización/ Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a	Identificación de ángulos de taludes	Según diseño de ingeniería o menor	-	Desviaciones ocasionales	-	Sin monitoreo o con un ángulo superior al de diseño	
b	Identificación del Grado de saturación de colocación del material	De acuerdo a diseño o con menor valor	-	Ocasionalmente	-	En forma sistemática	

Valorización de los Factores Técnicos: **VFT = 60a + 40b**

- **Pilas de Lixiviación: Inundación**

Al igual que en los casos anteriores no se realizaron modificaciones a los Factores Técnicos.

TABLA XX Valorización Factores Técnicos Ripios de Lixiviación, Inundación (SERNAGEOMIN, 2014)

	Valorización / Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a	Existencia y sobre carga en capacidad de piscina de emergencia	Ningún evento registrado o bien, no existencia	-	-	-	Evento registrado o no monitoreo	

Valorización de los Factores Técnicos: **VFT = 100*a**

A continuación se presenta la tabla XXI, establecida por la Guía del SERNAGEOMIN para Depósito de Estériles y en la tabla siguiente se presentan las modificaciones realizadas para Acopio de Sales de Descarte. Se utiliza esta valorización por tener características similares en su función, ya que ambas son depósitos de material.

Independiente de lo anterior, se agregaron Factores Técnicos y se eliminaron otros, como por ejemplo; se agrego Aparición de drenajes en el botadero por posibles precipitaciones las cuales puedan desarrollar drenes y Sistema de saneamiento proyectado, esto corresponde a la crecida máxima probable, ya que como es un acopio puede generarse un anegamiento en el deposito.

Los Factores Técnicos que se eliminaron corresponden a que material depositado tiene Drenaje Ácido de Roca (DAR) y depósitos de agua contaminada. esto no se contempla en el proceso de Caliche y Tierras Raras.

- **Acopio de Sales de Descarte: Precipitación**

TABLA XXI Valorización Factores Técnicos Deposito de Estériles, Precipitación (SERNAGEOMIN, 2014)

Valorización/ Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a	Resultado de pruebas de generación de Drenaje Acido en Roca (DAR) para el material almacenado.	Material de botadero con bajo potencial de generación de drenaje ácido (PNN > 20 kg equivalentes de CaCO3/t)	-	Material de botadero con potencial de generación de drenaje ácido no claramente definido (-20 kg < PNN < 20 kg equivalentes de CaCO3/t)	-	Material de botadero con alto potencial de generación de drenaje ácido (PNN < -20 kg equivalentes de CaCO3/t)
b	Evidencia de DAR en drenajes en la base del botadero.	Ninguna evidencia de DAR, pH neutro, sulfatos inferiores a 200 ppm metales bajo 0,5 mg/L	-	-	-	Evidencias de DAR en drenajes del botadero, pH <4 ó sulfatos que superan 200 ppm ó metales sobrepasen 0,5 mg/L
c	Aparición de drenajes en el botadero (en la base)	Inexistentes	Esporádicos	Ocasionales	Estacionales	Permanentes
d	Existencia del registro de valores anómalos de concentración de sustancias contaminantes en pozos de observación aguas a bajo del botadero.	No se registran	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año
e	Se observa aparición de agua en base del botadero durante períodos de lluvia intensa.	Ningún evento registrado	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año
f	Rebose de depósito de retención de aguas contaminadas, si existe. Registro de concentraciones fuera de norma que permite vertido a cauces naturales.	Ningún evento registrado	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año

g	Fallas en modelamiento hidrogeológico del botadero y en las medidas de mitigación proyectadas.	Observaciones de terreno son concordante con las del modelo hidrogeológico.	-	Se observan desviaciones respecto a	-	Existen amplias desviaciones respecto al comportamiento del modelo, las medidas de mitigación son inefectivas. No existe modelo hidrogeológico. No existen registros de monitoreo.
	Calibración con menor cantidad de pozos que los actualmente en existencia.	Operan las medidas de mitigación		modelamiento hidrogeológico predictivo		

Valorización de los Factores Técnicos: $VFT = (7,5a \times 4,8c) + 36b + 7(d + e + f + g)$

A continuación se presenta la Tabla XXII con las modificaciones antes señalizadas.

TABLA XXII Valorización Factores Técnicos Acopio Sales de Descarte, Precipitación.

	Valorización / Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a	Evidencia de Contaminación en drenajes del botadero	Ninguna evidencia de Contaminación	-	-	-	Evidencias de Contaminación en drenajes del botadero	
b	Sistema de saneamiento proyectado/verificado con valor de la crecida máxima probable (CMP)	Sistema proyectado/verificado con la CMP	-	-	-	Sistema de saneamiento no ha sido proyectado o verificado con valor de crecida máxima probable CMP	
c	Rebose de depósito de retención de aguas contactadas, si existe.	Ningún evento registrado	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año	
d	Aparición de drenajes en el botadero	Inexistentes	Esporádicos	Ocasionales	Estacionales	Permanentes	

Valorización de los Factores Técnicos: $VFT = (8,2a \times 5,5c) + 45,1b + 9,8d$

- **Acopio de Sales de Descarte: Inundación**

A continuación se presenta la tabla XXIII, establecida por SERNAGEOMIN para Deposito de Estériles y a continuación las modificaciones realizadas en Acopio de Sales de Descarte, al igual que en el caso anterior se utiliza esta valorización por tener características similares entre ellas.

Se agregaron Factores Técnicos como por ejemplo; se agrego cuales puedan desarrollar drenes, se elimino lo referente a DAR.

TABLA XXIII Valorización Factores Técnicos Deposito de Estériles, Inundación (SERNAGEOMIN, 2014)

Valorización/ Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a	Resultado de pruebas de generación de Drenaje Acido en Roca (DAR) para el material almacenado	Material de botadero con bajo potencial de generación de drenaje ácido (PNN > 20 kg equivalentes de CaCO3/t)	-	Material de botadero con potencial de generación de drenaje ácido no claramente definido (-20 kg < PNN < 20 kg equivalentes de CaCO3/t)	-	Material de botadero con alto potencial de generación de drenaje ácido (PNN < -20 kg equivalentes de CaCO3/t)
b	Evidencia de DAR en drenajes del botadero	Ninguna evidencia de DAR, pH neutro, sulfatos inferiores a 200 ppm metales bajo 0,5 mg/L	-	-	-	Evidencias de DAR en drenajes del botadero, pH <4 ó sulfatos que superan 200 ppm ó metales sobrepasen 0,5 mg/L
c	Sistema de saneamiento proyectado con valor de la crecida máxima probable (CMP)	Sistema proyectado/verificado con la CMP	-	-	-	Sistema de saneamiento no ha sido proyectado o verificado con valor de crecida máxima probable CMP
d	Registro de valores alterados en pozos de observación aguas abajo del botadero	Ningún evento registrado	1 vez en la vida útil de la mina	1 vez cada 10 años	1 vez cada 5 años	1 vez al año

Valorización de los Factores Técnicos: **VFT = 40a + 40b + 11c + 9d**

En la tabla XXIV se presentan las modificaciones antes señaladas.

TABLA XXIV Valoración Factores Técnicos Acopio de Sales de Descarte, Inundación.

Valorización / Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a	Resultados de pruebas de contaminación del material.	Material de acopio con bajo potencial de contaminantes	-	Material de acopio con medio potencial de contaminantes	-	Material de acopio con alto potencial de contaminantes
b	Sistema de saneamiento proyectado/verificado con valor de la crecida máxima probable (CMP)	Sistema proyectado/verificado con la CMP	-	-	-	Sistema de saneamiento no ha sido proyectado o verificado con valor de crecida máxima probable CMP
c	Aparición de drenajes en el botadero.	Inexistentes	Esporádicos	Ocasionales	Estacionales	Permanentes

Valorización de los Factores Técnicos: **VFT = 40a + 40b + 20c**

- **Acopio de Sales de Descarte: Viento**

No se realizaron cambios en los Factores Técnicos de la guía de SERNAGEOMIN, ya que las condiciones son muy similares en la minería de estudio.

TABLA XXV Valorización Factores Técnicos Depósitos de Estériles, Viento (SERNAGEOMIN, 2014)

Valorización / Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a Caracterización del material particulado que forma parte de la capa superior del botadero en términos de contenido de material bajo #200 (72um)	Contenido de material < #200 despreciable	-	-	-	Existe material <#200 en capas superficiales del botadero. Alta probabilidad de erosión y suspensión eólica	

Valorización de los Factores Técnicos: **VFT =100a**

- **Acopio de Sales de Descarte: Sismo**

No se realizaron cambios a los factores Técnicos de la guía de SERNAGEOMIN, ya que las condiciones son muy similares a la minería de estudio.

TABLA XXVI Valorización Factores Técnicos Depósito de Estériles, Sismo (SERNAGEOMIN, 2014)

Valorización / Factores	0	0,25	0,5	0,75	1	VALOR DE SELECCIÓN
a Aparición de materiales poco competentes en la fundación, no considerados en proyecto	Ningún aparición registrado	Extensión de material poco competent e menor a 0.3H (H: Altura del depósito)	Extensión de material competente entre 0.3H y 0.7H	Extensión de material poco competente mayor a 0.7H, pendientes moderadas (15° a 25°), nivel freático cercano al de diseño	No existe reconocimiento geotécnico del suelo de fundación. Extensión de material poco competente comparable con la altura. Zonas de pendientes fuertes (>25°). Nivel freático en el suelo de fundación supera al de diseño y escorrentías generalizadas.	

b	Dispersión de materiales poco competentes (con contenido de finos y de humedad superior al de proyecto) en zona de bordes o prisma resistente	No existen materiales poco competentes, o si existen hay un claro procedimiento para su disposición y se respeta.	Extensión de material poco competente e menor a 0.3H	Extensión de material poco competente entre 0.3H y 0.7H, y al menos un punto no controlado de depositación de material poco competente	Extensión de material poco competente mayor a 0.7H. Al menos un punto no controlado de depositación de material poco competente	Extensión de material poco competente comparable con la altura. No se controla material depositado. No se controla ubicación de materiales poco competentes. Contenido de finos mayor a 25%
c	Inclusión de nieve/ hielo en el prisma resistente	Ningún evento registrado	Espesores de nieve < 10 cm	Espesores de nieve entre 10 cm y 30 cm	Espesores de nieve entre 30 cm y 50 cm	Espesores de nieve > 50 cm
d	Registro de sismo mayor al sismo considerado en el diseño	Ningún evento registrado	-	-	-	Evento registrado
e	Registro de agrietamientos, asentamientos, desplazamiento o deslizamientos	Ningún evento registrado	Presencia de agrietamientos al borde del talud	Presencia de agrietamientos y/o asentamientos al borde del talud	Presencia de inestabilidades locales (a nivel de banco)	Inestabilidad comprometiendo 2 o más bancos
f	Nivel freático superior al valor de diseño	Ningún evento registrado	Desviaciones ocasionales 1/2 por año	Registro esporádico sin desviaciones	Desviaciones constantes por más de un año	Desviaciones constantes en todo el período y no existe control o monitoreo
g	Incumplimiento de altura máxima de diseño de capa	Cumple con la altura máxima de capa	-	Aumento espesor de capa menor a un 10% el espesor de diseño	-	Aumento espesor de capa sobre un 10% el espesor de diseño
h	Falla en el sistema de drenaje	Ningún evento registrado	Eventos ocasionales 1 por año	Eventos mayores a 1 por año	Desviaciones constantes por más de un año	Desviaciones constantes en todo el período y no existe control o monitoreo
i	Colocación de material con grado de saturación superior a la de diseño	Cumple con la colocación de material acorde al diseño	Extensión de material poco competente e menor a 0.3H	Saturación del material 10 < %S < 40. Extensión de material poco competente entre 0.3H y 0.7H.	Saturación del material 40 < %S < 85. Extensión de material poco competente mayor a 0.7H.	% S > 85%. Extensión de material en todas las capas y en aglomeraciones a nivel de sello de fundación.
j	Identificación de bermas (más angostas) y taludes (más empinados) que las consideradas en el diseño	Cumple con lo considerado en el diseño	-	Reducción de ancho de bermas en un 3% en toda la altura	-	Reducción de ancho de bermas en un 10% en toda la altura

Valorización de los Factores Técnicos : $VFT = 14a + 14b + 14c + 14d + 14e + 14f + 5g + 5h + 5i + 1j$

La información de cómo se realizó la modificación de los Factores Técnicos se encuentra detallada paso a paso en el anexo 7.7.

5. DISCUSIÓN

La información disponible sobre las faenas mineras de Caliche (ubicación, características) se encuentra disponible para su lectura, pero desactualizada y con mucha variación de información entre los distintos actores, ya sea de sectores públicos o privados. Con respecto a minería de Tierras Raras, la información encontrada es muy poca ya que es una minería nueva en Chile, sin indicadores formales, solo referencias de otros países.

Por esta razón se hace necesario tener información de calidad para poder realizar estudios de mejor forma, ya que por la falta de actualización los datos obtenidos pueden no ser tan representativos al momento de utilizarlos, y crear una brecha de información.

Dentro de la información rescatada, se destaca los datos obtenidos a través de la página del Servicio de Evaluación Ambiental, ya que con ella se pudo determinar y corroborar la cantidad de toneladas de producción, entre otra información relevante.

Independiente que la normativa legal vigente no exige utilizar la guía de SERNAGEOMIN, esta es una herramienta muy útil para poder generar los planes de cierre y así, evitar que las mineras dejen abandonadas las faenas y que produzcan daños ambientales y a las personas.

Se puede decir que la Ley que regula que las empresas tengan un plan de cierre, ayuda a la comunidad aledaña y al medio ambiente, ya que contribuye la realización de buenas prácticas entre la empresa y la zona de influencia de la faena.

6. CONCLUSIÓN

Al comenzar la investigación de la presente tesis, la principal finalidad era analizar si los Factores Técnicos entregados en la Guía de SERNAGEOMIN podrían servir para un tipo de minería diferente al de Cobre.

El punto de partida de esta investigación era determinar si la Guía realizada por SERNAGEOMIN podría utilizarse para otro tipo de faena que no fuera el de cobre, es por ello que se determinaron realizar este estudio a través de tres objetivos específicos.

Para ello la primera etapa era determinar las instalaciones de faenas mineras de Caliche y Tierras Raras, lo cual se logró a través de la investigación bibliográfica realizada a desde diferentes entidades públicas y privadas, identificando sus características, procesos productivos, localización, etc.

Existen 7 grandes empresas dedicadas a la extracción del Caliche, con 14 faenas mineras en total, que se dedican a la extracción de yodo, nitratos o ambos, por el contrario se encuentra la extracción de Tierras Raras solo con 1 faena, que aún no se encuentra autorizada.

Posteriormente se debían identificar los peligros con sus riesgos, lo cual se logró a través de la revisión de los procesos productivos de las faenas identificadas, con la ayuda de las Resoluciones de Calificación Ambiental, obtenidas a través del Servicio de Evaluación Ambiental.

En ellas se pudo revisar información relevante con respecto a los diagramas de flujo de las faenas mineras, corroborando las instalaciones que quedarán después del cierre. Con esta información se obtiene lo requerido para realizar la identificación de peligros, llegando a los resultados obtenidos que son mina rajo, pozas de evaporación, pilas de lixiviación y acopio de sales de descarte.

A cada uno de los peligros identificados se les realizó una identificación de riesgos determinando las posibles consecuencias que podrían tener a las personas y el medio ambiente.

Como última etapa se realizó una revisión detallada de la Guía, donde se estudiaron los Factores Técnicos detallados en ésta, dejando lo que establece la guía, modificando o incorporando nuevos. Los factores que se dejaron son los que aplican directamente a la minería de estudio con algunas modificaciones que se explican en su totalidad en el punto 4.4.

Para llegar a realizar el ajuste del análisis de riesgo, se tuvo que determinar todo lo descrito anteriormente como las faenas, identificación de los peligros con sus respectivos riesgos para los siguientes eventos: Precipitación, Inundación, Viento, Erosión Hídrica y Sismo, y por último realizar las modificaciones necesarias a los factores técnicos.

Con esto se logra la estabilidad física y química adaptada a la realidad de las operaciones mineras de Caliche y Tierras Raras, la base de esta investigación, y así poder entregar una ayuda a este tipo de minería que hoy en día se encuentra sin una metodología para realizar los Planes de Cierre que establece la Ley.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALGUACIL. F.J et al (2007). Proceso de Separación de Tierras Raras, <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/862/875>, recuperado jueves 8 de septiembre de 2016.
- CASAS DE LA PAZ y EMBAJADA DE CANADÁ, 2011. Manual informativo sobre la minería en Chile. Una guía para las comunidades y la industrial.
- COMISIÓN CHILENA DEL COBRE, 2013. Monitoreo de los minerales industriales en Chile, Análisis de los recursos salinos. (2013) 7–15.
- CONCEJO INTERNACIONAL DE MINERÍA Y METALES, 2008. Planificación del Cierre Integrado de Minas: Equipo de herramientas.
- CROZIER, RONALD D., 1993. Historia. Industrial del Yodo 27 (1993) 141-212.
- DEL CANTO RODRIGO, 2011. Metodologías y diseño conceptual Plan de Cierre y/o Abandono. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- DIRECCIÓN GENERAL DE ASUNTOS AMBIENTALES MINEROS DE PERÚ, 2006. Guía para la elaboración de planes de cierre de minas.
- LAURENCE DAVID, 2005. Optimisation of the mine closure process. Journal of Cleaner Production 14 (2006) 285-298.
- LEUTERIA FRANCISCO JAVIER, 2003. Tributación y Minería en Chile. Antecedentes para un debate informado 95 (2004) 193 – 235.
- MINISTERIO DE MINERÍA, 2011. Ley 20.551. Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.
- MINISTERIO DE MINERÍA, 2012. Decreto 41. Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.
- SERNAGEOMIN, 2011. Atlas de faenas mineras 7 (2011).
- SERNAGEOMIN, 2014. Guía metodológica de evaluación de riegos para el cierre de faenas mineras.
- SERNAGEOMIN, 2015. Anuario de la minería 24 (2016).

- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Pampa Blanca, <http://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=be/98/b695f2da47cf6dcfe30355377775bd72d51a>, recuperado martes 1 de noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Nueva Victoria, http://seia.sea.gob.cl/elementosFisicos/enviados.php?id_documento=2377805&mod_o=iframe, recuperado martes 1 de noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Cala Cala, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=7053401>, recuperado jueves 24 de noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Eloísa, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=5189027>, recuperado jueves 24 de noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto María Elena, http://seia.sea.gob.cl/elementosFisicos/enviados.php?id_documento=2128722700, recuperado martes 1 de noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto El Cabrito, <http://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=c4/a3/42705941252a3dc1d148b03613154f30ccf2>, recuperado miércoles, 24 de mayo de 2017.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Pedro de Valdivia, <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/viewFile/862/875>, recuperado jueves 24 de noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Pampa Hermosa, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=3083864>, recuperado martes 1 noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Coya Sur, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=4827284>, recuperado martes 1 noviembre de 2016.

- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Orcoma, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2130977149>, recuperado 25 noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Soledad, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=6185669>, recuperado 25 noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Negreiros, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2128969935>, recuperado 25 noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Planta Bullmine Huara, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=5943004>, recuperado 26 noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Aguas Blancas, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2351361>, recuperado 26 de noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Laguna, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2128573403>, recuperado 26 de noviembre de 2016.
- SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, Resolución de Calificación Ambiental proyecto Laguna, <http://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=4470833>, recuperado 26 de noviembre de 2016.
- SERVICIO GEOLÓGICO DE ESTADOS UNIDOS, Minerals Information, Rare earths, https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earth/myb1-2014-raree.pdf, recuperado 11 de julio de 2017.

7. ANEXOS

7.1 Posición de Chile en Ranking de Producción Mundial de Minerales Metálicos y Rocas y Minerales Industriales (SERNAGEOMIN, 2013)

Minerales Metálicos	
Recurso	Posición
Cobre	1º
Molibdeno	1º
Plata	8º
Oro	14º

Rocas y Minerales Industriales	
Recurso	Posición
Yodo	1º
Compuestos de Litio	1º
Compuestos de Boro	4º
Pumicita	5º
Compuestos de Potasio	8º
Compuestos de Sodio	9º
Compuestos de Azufre	11º
Arena Silíceas	20º

7.2 Producción de Rocas y Minerales Industriales 2004-2013 (t) (SERNAGEOMIN, 2013)

Recursos	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Nitratos	1.157.585	1.048.706	1.058.712	927.922	822.584	759.384
Yodo	15.503	17.399	15.793	16.000	17.494	20.656
Cloruro de Sodio	6.431.029	8.382.215	7.694.879	9.966.038	8.057.130	6.576.960
Compuestos de Litio	56.881	30.538	52.851	69.597	71.594	60.646
Compuestos de Potasio	917.091	1.130.952	1.525.996	1.371.689	1.686.408	1.901.215
Compuestos de Boro	590.999	613.135	503.609	491.421	449.572	582.074
Arcillas	145.175	124.064	100.030	108.536	68.238	61.503
Arena Silíceas	864.995	803.177	824.759	814.375	907.784	997.855
Pumicita	1.063.176	919.249	824.049	816.565	826.779	800.031
Yeso	773.794	723.928	758.011	917.759	799.064	1.015.158
Caliza	6.841.441	5.669.537	6.141.136	5.833.738	6.238.486	6.245.995
Cuarzo	535.771	601.344	501.534	422.468	359.692	360.293
Caolín	63.526	48.354	62.226	59.912	60.429	60.000
Feldespato	17.834	9.079	7.723	7.563	6.399	3.874
Diatomita	25.497	23.027	30.925	22.938	23.021	27.092
Fosfatos	41.186	13.292	50.528	15.929	15.601	14.956
Compuestos de Azufre	4.722.996	4.895.207	4.879.450	4.913.000	4.681.966	4.508.772

Nota: La producción de arcillas no corresponde al total producido, debido a que parte importante de arcillas explotadas no son concesibles y no se declaran a SERNAGEOMIN.

7.3 Ejemplo de estructura de la estructura de la tabla para la evaluación de Factores Técnicos (SERNAGEOMIN, 2014)

Valorización/ Factores	0	0,25	0,5	0,75	1
a Valor mínimo medido inferior al valor de diseño de revaneta Hidráulica a 100% (cola corrompimiento cada nivel de aguas claras)	Ningún evento registrado	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (1 a 4 por año)	muy frecuentes (> a 4 por año)	extensivas (> a 4 por año).	Registro solamente constantes por mas de un año. No existe control o monitoreo
b	Ningún evento registrado	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (1 a 4 por año)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (> a 4 por año)	Registro esporádico Desviaciones extensivas (> a 4 por año).	Desviaciones constantes por mas de un año. Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo
c Contenido de fines en arena del muro del tranque sea > 20% (bajo #300)	Ningún evento registrado	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (1 a 4 por año)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (> a 4 por año)	Registro esporádico Desviaciones extensivas (> a 4 por año).	Desviaciones constantes por mas de un año. Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control o monitoreo
d Niveles piezométricos en el muro valores de registro años sistemáticos en el	Cumple con niveles máximo permitidos. Distribución	Registro continuo. Desviaciones frecuentes (1 a 4 por año)	Registro continuo. Desviaciones muy frecuentes (> a 4 por año)	Registro esporádico Desviaciones extensivas (> a 4 por año) y afectan todo el	Desviaciones constantes por mas de un año y afectan a todo el muro y Registro solamente esporádico con desviaciones. No existe control

Para evaluar cada factor técnico se ha establecido un rango de valorización entre 0 y 1, donde el valor 1 significa que la operación de la instalación ha sido inadecuado y por lo tanto se encuentra en estado crítico y el valor 0 es indicativo de una operación dentro de los parámetros de diseño y las buenas prácticas operacionales.

En esta tabla también se podrán analizar los factores técnicos para cada riesgo, jerarquizándolos, y relacionándolos con la instalación respectiva.

7.4 Los recursos de Tierras Raras en el mundo (Fernández, 2013).



7.5 a Instalaciones Principales (SERNAGEOMIN, 2014)

Codificación	Nº	Nombre de la Instalación Minera	Instalaciones Consideradas
MS	1	Mina Subterránea	Mina de labores subterráneas.
MR	2	Mina Rajo Abierto	Mina de labores a rajo abierto.
DR	3	Depósitos de Relaves	Incluye tranques, embalses, relaves espesados, en pasta, filtrados y toda otra forma de depósitos de relaves en tierra.
DL	4	Ripios de Lixiviación	Botaderos de ripios de lixiviación.
DE	5	Depósito de Estériles	Botaderos de desmonte, estéril, lastre, marinas.
DL	6	Depósitos de Escorias	Acopios de escoria de fundición.

7.5 b Instalaciones Complementarias (SERNAGEOMIN, 2014)

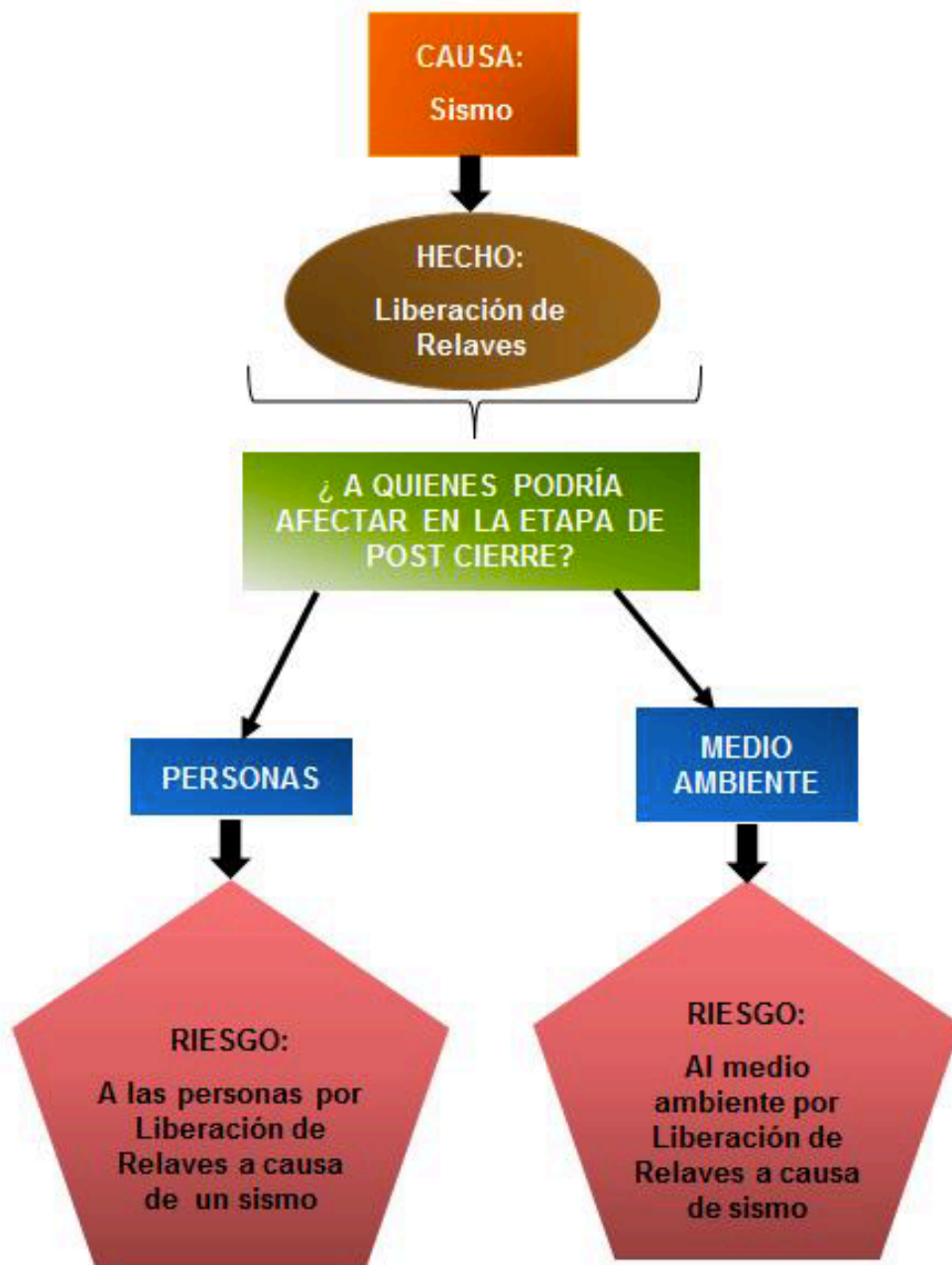
Nº	Nombre de la Instalación	Instalaciones Consideradas
7	Planta proceso	<p>Planta de chancado (primario- secundario- terciario- cuaternario, correas transportadoras), chancado de pebbles, silo de mineral (Ustock pile).</p> <p>Planta concentradora (molienda- flotación- estaciones de ciclones- remolienda), planta de molibdeno.</p> <p>Concentración magnética, prensa de rodillo, hidroseparadores, discos peletizadores, colectores húmedos, hornos giratorios.</p> <p>Instalaciones propias de la lixiviación (no incluye las pilas de lixiviación), Planta SX – EW, piscina de captación de soluciones (PLS, ILS, Refino, traspaso), tambores aglomeradores.</p> <p>Planta de columnas de adsorción (carbón activado: proceso CIP y CIL), torres de elusión, celdas electrolíticas, lixiviación por agitación (cianuración por agitación), filtros de colas.</p>
8	Instalaciones de suministros	Bodegas de almacenamiento de productos químicos, laboratorios químicos, metalúrgicos, muestreras, redes y estanques de suministros de reactivos (cal, ácidos, diesel, combustibles, otros similares), planta de hormigón, cal, otros reactivos. Canteras de material granular (empréstitos).
9	Infraestructura de servicios	<p>Oficinas, campamentos, talleres, nave de mantención de equipos mayores, bodegas de materiales, casinos, policlínicos, casa de cambio y polvorines.</p> <p>Caminos, puentes, aeródromos.</p> <p>Puerto de Embarque (muelle, sistema e instalaciones de acopio de material e infraestructura de carga y descarga de material), túneles mineros.</p> <p>Obras hidráulicas (canaletas de recolección de aguas, vertederos de seguridad, emergencia, de abandono), embalse de agua, piscinas de emergencias, campos de pozos de agua. Planta de tratamiento de aguas servidas, de agua potable, de osmosis, desaladora, redes de distribución de insumos básicos (aguas, gas), estanques de agua y gas, estaciones de bombeo.</p>
10	Obras lineales	Acueductos, concentraductos, mineraductos, relaveducto, canaletas de relaves, oleoductos, gaseoductos, tendidos eléctricos, y subestaciones eléctricas.
11	Fundición	Fundición (fundición, refinación, planta de oxígeno, planta de ácido, ductos asociados), moldeo de ánodos, planta de tratamiento de escorias, Planta de metales nobles. Calcinación, horno de fusión, secador rotatorio.

7.5c Instalaciones Auxiliares (SERNAGEOMIN, 2014)

Nº	Nombre de la Instalación	Instalaciones Consideradas	Competencia MINSAL*
12	Almacenamiento de Residuos Peligrosos	Sectores de acopio, almacenamiento y/o disposición final de residuos peligrosos.	Regulados por el DS Nº 148 (Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos).
13	Almacenamiento de Residuos Industriales No Peligrosos	Sectores de almacenamiento o disposición final de residuos industriales no peligrosos (patio de chatarra, vertederos de residuos industriales, etc.).	Regulados por el DS Nº594 Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo. D.F.L. Nº1 y Código Sanitario
14	Residuos Domésticos	Rellenos Sanitarios y/o Vertederos de residuos domésticos.	Regulados por el DS Nº 189 Reglamento sobre condiciones sanitarias y de seguridad básica en los rellenos sanitarios

*Podría considerar otra normativa que la Autoridad Sanitaria disponga.

7.6 Ejemplo esquemático de la Identificación de Riesgos. (SERNAGEOMIN, 2014)



7.7 Anexo D. Metodología para la obtención de las formulas de los factores Técnicos (SERNAGEOMIN, 2014)

En el presente anexo se detallará la metodología empleada para la obtención de los coeficientes de las fórmulas (Anexo D) que se emplean en la obtención del Nivel de Valorización de los Factores Técnicos (VFT).

Se considera como criterio inicial que los factores técnicos en cada tabla son independientes entre sí, por tanto la fórmula que los vincula es una suma directa, sin embargo cada factor presenta una determinada importancia o incidencia en la generación del escenario de potencial ocurrencia del hecho por tanto se ha procedido a determinar su grado de importancia de acuerdo al juicio de expertos.

La determinación de los coeficientes de cada fórmula que vincula los factores técnicos se ha basado en la metodología utilizada en el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) del Análisis Multicriterio (Thomas Saaty).

El procedimiento realizado para cada Tabla de Valorización de los Factores Técnicos se describe a continuación en un ejemplo correspondiente a la Planilla MR.1:

Una vez identificados los Factores Técnicos correspondientes al riesgo analizado se procedió a la Jerarquización de los mismos de acuerdo (orden de prioridad) al juicio de expertos:

		Factores / Valorización	0	0,25	0,5	0,75	1	
ORDEN DE PRIORIDAD	1°	a	Registro de Sismo con aceleración mayor al máximo probable	Ningún evento registrado	-	-	-	Se registra
	2°	b	Reconocimiento de cambios litológicos, nuevas discontinuidades de gran longitud, o cambios de calidad de macizo rocoso	Ningún evento registrado	1 evento en período de evaluación	Entre 2 y 3 eventos en período de evaluación	Entre 4 y 5 eventos en período de evaluación	Más de 5 eventos en período de evaluación
	2°	c	Grandes deslizamientos	Ningún evento registrado	1 evento en período de evaluación	Entre 2 y 3 eventos en período de evaluación	Entre 4 y 5 eventos en período de evaluación	Más de 5 eventos en período de evaluación
	3°	d	Aparición de grietas más allá del límite de seguridad originalmente	Ningún evento registrado	1 evento en período de evaluación	Entre 2 y 3 eventos en período de evaluación	Entre 4 y 5 eventos en período de evaluación	Más de 5 eventos en período de evaluación

Posteriormente se realizó la Matriz de Comparación de Pares (MCP) estableciendo el rating de importancia relativa entre los factores técnicos en base al juicio de expertos formulado. Dicho rating se estableció en base a la siguiente escala:

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9	
extremadamente	muy fuertemente	fuertemente	moderadamente	igualmente	moderadamente	fuertemente	muy fuertemente	extremadamente	
menos importante				←—————→					más importante

En el ejemplo dado, por la jerarquización dada el factor “a” es moderadamente más importante que el factor “b” (3), y fuertemente más importante que el factor “c” (5), y en sentido contrario lo propio es decir el factor “c” es fuertemente menos importante que el factor “a” (1/5) y moderadamente menos importante que el factor “b” (1/3):

a: Registro de Sismo con aceleración mayor al máximo probable

b: Reconocimiento de cambios litológicos, nuevas discontinuidades de gran longitud, o cambios de calidad de macizo rocoso

c: Grandes deslizamientos

d: Aparición de grietas más allá del límite de seguridad originalmente establecido

a	Registro de Sismo con aceleración mayor al máximo probable	1	3	3	5
b	Reconocimiento de cambios litológicos, nuevas discontinuidades de gran longitud, o cambios de calidad de macizo rocoso	1/3	1	1	3
c	Grandes deslizamientos	1/3	1	1	3
d	Aparición de grietas más allá del límite de seguridad originalmente establecido	1/5	1/3	1/3	1
	Suma	1,87	5,33	5,33	12,00

Como siguiente paso se tiene el desarrollo de la Matriz Normalizada (MCN) dividiendo cada valor de la Matriz de Comparación por pares entre la suma total de la columna:

	a: Registro de Sismo con aceleración mayor al máximo probable	b: Reconocimiento de cambios litológicos, nuevas discontinuidades de gran longitud, o cambios de calidad de macizo rocoso	c: Grandes deslizamientos	d: Aparición de grietas más allá del límite de seguridad originalmente establecido	
a	Registro de Sismo con aceleración mayor al máximo probable	0,536	0,0563	0,0563	0,417
b	Reconocimiento de cambios litológicos, nuevas discontinuidades de gran longitud, o cambios de calidad de macizo rocoso	0,179	0,188	0,188	0,250
c	Grandes deslizamientos	0,179	0,188	0,188	0,250
d	Aparición de grietas más allá del límite de seguridad originalmente establecido	0,107	0,063	0,063	0,083

Una vez normalizados los valores se determina el Vector Principal que resulta de la suma de cada fila de la matriz normalizada. Posteriormente, se procede a obtener el peso y la ponderación, mediante la división del valor del Vector principal entre el número de factores y multiplicándolo por 100 para obtener la ponderación en porcentaje. Dicha ponderación nos da el resultado esperado, es decir los coeficientes para la fórmula que determina la valorización del nivel de los factores técnicos: VFT.

	a	b	c	d				
	Registro de Sismo con aceleración mayor al máximo probable	Reconocimiento de cambios litológicos, nuevas discontinuidades de gran longitud, o cambios de calidad de macizo rocoso	Grandes deslizamientos	Aparición de grietas más allá del límite de seguridad originalmente establecido	Vector principal	Pesos	Ponderación %	
a	Registro de Sismo con aceleración mayor al máximo probable	0,536	0,0563	0,0563	0,417	2,08	0,52	51,95
b	Reconocimiento de cambios litológicos, nuevas discontinuidades de gran longitud, o cambios de calidad de macizo rocoso	0,179	0,188	0,188	0,250	0,80	0,2	20,09
c	Grandes deslizamientos	0,179	0,188	0,188	0,250	0,80	0,20	20,09
d	Aparición de grietas más allá del límite de seguridad originalmente establecido	0,107	0,063	0,063	0,083	0,32	0,08	7,89

Por tanto la fórmula generada será:

$$VTF = 52a + 20b + 20c + 8d$$

Finalmente como parte del proceso AHP se determina el Coeficiente de Consistencia (RC), a fin de como el nombre lo indica identificar si la comparación de pares realizada es consistente, considerando aceptable los valores inferiores a 0.10, en los casos donde $CR > 0.10$ la jerarquización realizada por el juicio de expertos deberá ser revisada.

El Coeficiente de consistencia es calculado mediante la relación entre el Índice de consistencia (CI) y el Radio de Consistencia (RI):

$$CR = CI / RI$$

Donde el CI se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} = 0$$

Donde:

n = número de factores comparados.

□Max = promedio del resultado de la multiplicación matricial de la fila de la Matriz de comparación de pares con la columna "Pesos" de la matriz normalizada:

$$\lambda_i = 1/\text{Peso}_i * \left(\begin{array}{c} \text{fila matriz} \\ \text{comparación} \\ \text{de pares} \end{array} \right) * \left(\begin{array}{c} \text{Columna "Pesos" Matriz} \\ \text{Normalizada} \end{array} \right)$$

$$\lambda_1 = 1/0,52 * \left(\begin{array}{cccc} 1 & 3 & 3 & 5 \end{array} \right) * \left(\begin{array}{c} 0,52 \\ 0,20 \\ 0,20 \\ 0,08 \end{array} \right)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum \lambda_i}{n}$$

En el ejemplo: $\lambda_{\max} = 4.04$

$$CI = \frac{4.04 - 4}{4 - 1} = 0.01$$

El valor del Radio de Consistencia se lo obtiene de manera directa en la siguiente tabla introduciendo el valor de n:

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI (índice aleatorio)	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

(Saaty, 1980)

Para el ejemplo RI = 0,9

$$\text{Finalmente: } CI = \frac{0,01}{0,9}$$

CR = 0,02 < 0,10 por lo tanto el Análisis es Consistente.

Casos especiales

Existen casos especiales donde los factores técnicos formulados no se relacionan en forma independiente entre ellos, es decir, al ser interdependientes la fórmula planteada no resulta ser una sumatoria directa sino se incluye la multiplicación de algunos de los factores técnicos. En esos casos, se realizó un análisis independiente de cada componente manteniendo los criterios de jerarquización de los factores y de mantener el resultado final en un rango de 0 a 100.

En el anexo aparece un ejemplo el cual se describe a continuación:

A las Personas y el Medio Ambiente por subsidencia a causa de colapso pilares y puentes de roca. (MS1):

$$\begin{array}{rcl} (a * b * c) & + & d \\ (a') & + & d \\ (1^{\circ}) & & 2^{\circ} \end{array}$$

considerando relación de "a" y "d" de 60% y 40% (1º y 2º lugar):

$$(a * b * c) = 60$$

$$a' = 3,91 * 3,91 * 3,91 = 60$$

Quedando de la siguiente forma la ecuación: $(3,91^a * 3,91^b * 3,91^c) + 40d$

A continuación se presenta el desarrollo de la obtención de los coeficientes para los casos desarrollados en esta investigación, de tal forma de plantear los criterios que se siguieron paso a paso donde se incorporaron o eliminaron algún factor técnico.

A las Personas y el Medio Ambiente por contaminación de aguas superficiales a causa de inundación. (ASD1):

$$\begin{array}{rcl} a & + & b & + & c \\ 1^{\circ} & & 1^{\circ} & & 2^{\circ} \end{array}$$

De la comparación de pares considerando la relación de "a + b" y "c" de 80% y 20%:

$$\mathbf{VTF = 40a + 40b + 20c}$$

A las Personas y el Medio Ambiente por contaminación de aguas superficiales a causa de Precipitación. (ASD2):

$$\begin{array}{rcccc} (a * c) & + & b & + & d \\ (1^{\circ} 2^{\circ}) & & 1^{\circ} & & 3^{\circ} \\ (a') & + & b & + & d \\ 1^{\circ} & & 1^{\circ} & & 3^{\circ} \end{array}$$

De la comparación de pares:

$$(45,1a') + 45,1b + 9,8d$$

Para $a' = (a * c) = 45,1$

Considerando relación de "a" y "c" de 60% y 40% (1º y 2º lugar):

$$\mathbf{VTF = (8,2a * 5,5c) + 45,1b + 9,8d}$$