

**ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LAS INSTALACIONES MINERAS DE
IBERPOTASH S.A. EN LA CUENCA DEL LLOBREGAT
ESTUDIOS HIDROLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS**

**Documento nº 9
(MEMORIA Rev 1.0)**

**Modelo matemático del depósito salino El
Cogulló.**

Realizado por:



Diciembre 2007

Proyecto:	Actualización del programa de restauración del centro de trabajo de Sallent-Balsareny. Estudios hidrológicos y geotécnicos. Diciembre de 2007		
Documento:	Modelo Matemático del depósito salino de El Cogulló		
Rev	Fecha	Autor	Firma
0.0	1-agosto-2007	C. Sesmero	

	Nombre	Fecha	Firma
Escrito	C. Sesmero	1-agosto-2007	
Revisado	L. López Vílchez	25-noviembre-2007	
Aprobado	L. López Vílchez	25-noviembre-2007	
Conforme	L. López Vílchez	25-noviembre-2007	

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO DEL DEPÓSITO SALINO DE EL COGULLÓ.....	4
3	MODELO CONCEPTUAL.	8
4	ELEMENTOS DEL SISTEMA.....	14
4.1	El depósito salino.	14
4.2	El sustrato geológico.....	15
4.3	Sistemas de drenaje.	16
5	TÉRMINOS DEL BALANCE DEL SISTEMA	20
6	MODELO MATEMÁTICO	25
6.1	Discretización del medio físico.....	25
6.2	Conceptualización de los elementos del sistema.....	27
7	SIMULACIÓN.	35
8	RESULTADOS OBTENIDOS.....	36
9	CONCLUSIONES.	39
10	BIBLIOGRAFÍA.....	40

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	TOPOGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO PREVIA AL DEPÓSITO.....	4
FIGURA 2.	GEOLOGÍA DEL ENTORNO DEL DEPÓSITO SALINO.	5
FIGURA 3.	LOCALIZACIÓN DEL ARROYO SOLDEVILA RESPECTO A LOS AFLORAMIENTOS DE CALIZAS DEL COGULLÓ.....	7
FIGURA 4.	ESQUEMA CONCEPTUAL DE UN DEPÓSITO SALINO.....	11
FIGURA 5.	ESQUEMA CONCEPTUAL DEL DEPÓSITO SALINO DEL COGULLÓ.	13
FIGURA 6.	VARIACIÓN DE LA PERMEABILIDAD VS POROSIDAD.....	15
FIGURA 7.	SISTEMA DE DRENES INTERNO Y PERIMETRAL DEL DEPÓSITO SALINO DE EL COGULLÓ	19
FIGURA 8.	ESQUEMA DE CORRESPONDENCIA ENTRE LAS CAPAS Y NIVELES DEL MODELO Y LAS CAPAS DEL DEPÓSITO SALINO	27
FIGURA 9.	ZONAS DE RECARGA MODELIZADAS	29
FIGURA 10.	MODELIZACIÓN DEL CONTACTO CAPA SUPERFICIAL SUSTRATO GEOLÓGICO	31
FIGURA 11.	DISTRIBUCIÓN DE PERMEABILIDADES	32
FIGURA 12.	PIEZOMETRÍA OBTENIDA DEL MODELO DE SIMULACIÓN PARA LA CAPA 1.....	37
FIGURA 13.	PIEZOMETRÍA OBTENIDA EN EL MODELO DE SIMULACIÓN PARA LA CAPA 2...	37

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.	VALORES DE PERMEABILIDAD	16
TABLA 2.	PRECIPITACIÓN REGISTRADA EN EL ENTORNO DE EL COGULLÓ.	21
TABLA 3.	EVAPORACIÓN REGISTRADA EN EL ENTORNO DE EL COGULLÓ	22
TABLA 4.	CAUDALES REGISTRADOS EN EL CAUDALÍMETRO DE LA BALSA DE ESCORRENTÍA	23
TABLA 5.	BALANCE DE AGUA OBTENIDO (M³).	24
TABLA 6.	VALORES DE RECARGA ASIGNADOS	28
TABLA 7.	VALORES DE PERMEABILIDAD Y POROSIDAD ASIGNADOS A LOS DIFERENTES MATERIALES.	33
TABLA 8.	BALANCE HÍDRICO. RESULTADOS DEL MODELO.	36

1 INTRODUCCIÓN

Entre los trabajos que Argongra ha realizado a petición de Iberpotash S.A. se incluye la realización de un modelo matemático de flujo que simula la circulación de agua en el depósito salino de El Cogulló. El depósito salino de El Cogulló se localiza en la mina de sales potásicas que la empresa posee en Sallent (Barcelona), al sureste del núcleo urbano, en la margen derecha del río Llobregat, en las proximidades de la divisoria hidrográfica entre las subcuencas de los arroyos Mas de Les Coves y Soldevila, ambos tributarios del río Llobregat (Figura 1).

El material extraído de la explotación de la mina de sales potásicas de Iberpotash S.A. localizada en Sallent (Barcelona), es una silvinita que contiene del orden del 25% de sales potásicas (silvina) y el 75% restante de sales sódicas (halita). Los dos son productos vendibles, por lo que se clasifican dentro de los grupos B y C de la Ley de Minas.

Una vez concluido el proceso de separación de la silvinita y de la halita, en un breve espacio de tiempo se vende prácticamente el 100% de la silvinita, mientras que tan sólo se vende el 30% de la halita. La fracción no vendida es preciso almacenarla pues una vez agotadas las reservas de potasas y, por tanto, clausurada la mina, se seguirá comercializando hasta su agotamiento, generando de esta forma los depósitos salinos.

El estudio y por tanto la modelización de un depósito minero conlleva una complejidad intrínseca derivada de la propia naturaleza del depósito que la diferencia de los acuíferos convencionales y que radica en la evolución en el tiempo y en el espacio de las parámetros que determinan el funcionamiento hidrodinámico del sistema, tales como volumen de material depositado, superficie ocupada, altura, grado de compactación de material y disminución en el tiempo de la porosidad y permeabilidad de los materiales depositados. Los depósitos salinos, además, están constituidos por materiales solubles que dan lugar a fenómenos de disolución y precipitación que a su vez modifican estos parámetros.

Como punto de partida para el desarrollo del modelo matemático para la simulación del flujo subterráneo a través de los acopios mineros de halita y en concreto para el depósito de El Cogulló, se ha establecido un modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del depósito, tomando como referencia los resultados obtenidos en las experiencias realizadas en las universidades de Canadá y Australia sobre depósitos salinos y cuyo objetivo es analizar la evolución las propiedades de estos depósitos en el tiempo y la variación de las mismas frente a los incrementos de presión.

Las hipótesis sobre el comportamiento de las acumulaciones de sal obtenidas de los estudios citados son también asumidas por la Comisión Europea (Directorate-General JRC Joint Research Center. Institute for Prospective Technological Studies. Sevilla), tal y como se indica en la publicación "Draft Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities".(Draft May 2003).

Los ensayos y estudios realizados por la empresa minera en el depósito salino El Cogulló, en Sallent (Barcelona) y en su entorno han permitido establecer los parámetros hidrodinámico que caracterizan a los materiales depositados en el Cogulló, tales como la permeabilidad del material que lo constituye, su variación en las distintas capas o niveles que lo configuran y la relación del depósito con el medio geológico que lo alberga.

Así mismo, diferentes experiencias realizadas en el ámbito del almacenamiento de halita junto con los controles que Iberpotash S.A. realiza del caudal drenado por el mismo, han permitido establecer elementos del balance hídrico.

Con esta información se ha elaborado un modelo de flujo, utilizando el software Feflow versión 5.2, creado por Wasy (Institute for Water Resources Planning and Systems Research) en el cual se resuelve la ecuación fundamental del flujo mediante el método matemático de elementos finitos.

El objetivo último de este modelo ha sido doble: Por una parte contribuir al diseño de las medidas de control que minimicen en lo posible las potenciales afecciones al medio físico del entorno, y por otra ahondar en el conocimiento del funcionamiento hidrodinámico del depósito salino a fin de establecer una metodología de análisis que pueda ser aplicada a otros de características similares y en los que el conocimiento adquirido mediante el presente estudio permita suplir la carencia de datos de partida.

Este documento recoge la descripción del modelo matemático de flujo realizado en el depósito salino de El Cogulló (Sallent), las técnicas utilizadas para modelizar los diferentes elementos del sistema, los resultados obtenidos y las conclusiones que se deducen en relación con el funcionamiento hidrodinámico de los depósitos salinos.

El informe forma parte del estudio denominado “Estudio Hidrológico de las instalaciones mineras de Iberpotash S.A. en la cuenca del Llobregat” y se ha dividido en los siguientes epígrafes:

- 1. Introducción**
- 2. Descripción del emplazamiento del depósito salino de El Cogulló**
- 3. Modelo conceptual**
- 4. Elementos del sistema**
 - 4.1. El depósito salino
 - 4.2. El sustrato geológico
 - 4.3. Sistema de drenaje
- 5. Términos del balance**
 - 5.1. Entada de agua al sistema
 - 5.2. Salidas de agua del sistema
- 6. Modelo matemático**
 - 6.1. Discretización del medio físico
 - 6.2. Conceptualización de los elementos del sistema
- 7. Simulación**
- 8. Calibración**
- 9. Resultados obtenidos**
- 10. Conclusiones**
- 11. Bibliografía.**

2 DESCRIPCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO DEL DEPÓSITO SALINO DE EL COGULLÓ.

El depósito salino de El Cogulló se ubica sobre la cabecera del arroyo de Mas de les Coves, tributario del río Llobegrat por su margen derecha. Dicha cuenca presenta una morfología típica de cuenca de recepción, cuyo eje principal se desarrolla en dirección noroeste-sureste, en un primer tramo y prácticamente norte-sur en un segundo tramo. Antes del comienzo del depósito estaba constituida por tres cauces de orden inferior, que confluían en un punto situado en el extremo meridional del área que actualmente ocupa el depósito salino de El Cogulló. La superficie estimada de la cuenca de recepción, en el tramo de cabecera considerado es del orden de 22 ha. Las cotas del terreno variaban entre un máximo de 450 m s.n.m. y un mínimo de 330 m s.n.m, el cual corresponde al cauce del arroyo de Mas de les Coves en el punto de salida del tramo de cuenca considerado.

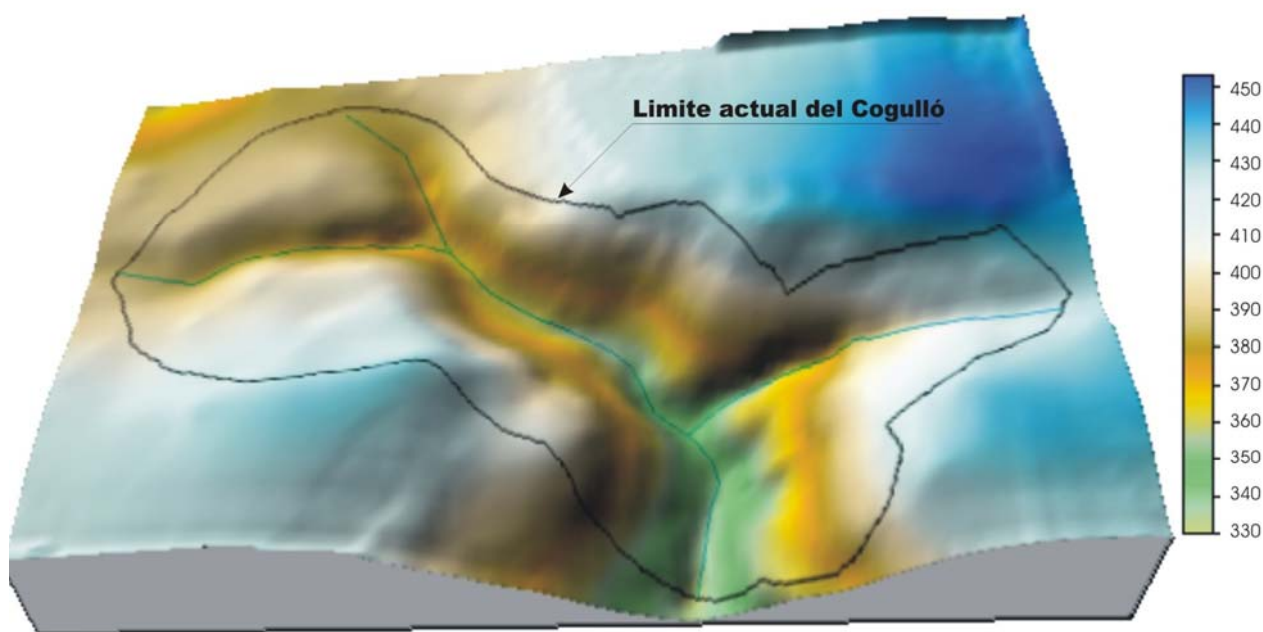


Figura 1. Topografía del área de estudio previa al depósito.

El sustrato geológico, del emplazamiento del depósito salino, corresponde a materiales detríticos de edad terciaria, constituidos , principalmente por una alternancia de margas y lutitas (Lutitas y areniscas rojas), que en conjunto alcanza un espesor total superior a los mil metros. Intercalados entre estas unidades se encuentra el nivel de sales potásicas que actualmente explota Iberpotash. S.A. Por encima de este nivel, los

paquetes de margas y lutitas presentan un espesor variable que puede oscilar entre 30 y 50 metros. Entre estos niveles de margas y lutitas se localizan paquetes de calizas, cuyo espesor puede variar entre 2 y 10 metros. En el entorno del depósito salino de El Cogulló y bajo la actual ubicación del mismo, aflora uno de estos niveles de calizas, las cuales reciben el nombre de calizas del Cogulló. Junto a las calizas del Cogulló, afloran en el área de estudio otros niveles calcáreos de menor envergadura, las cuales se sitúan estratigráficamente por debajo de las calizas del Cogulló.

A escala regional, las formaciones terciarias se disponen subhorizontales con un ligero buzamiento de 2 o 3 grados hacia el norte. En el extremo meridional del ámbito de estudio estas formaciones se encuentra afectadas por la estructura tectónica denominada falla del Guix. Esta estructura está constituida por una falla y una contrafalla, ambas de dirección aproximada este-oeste y desplazamiento inverso.

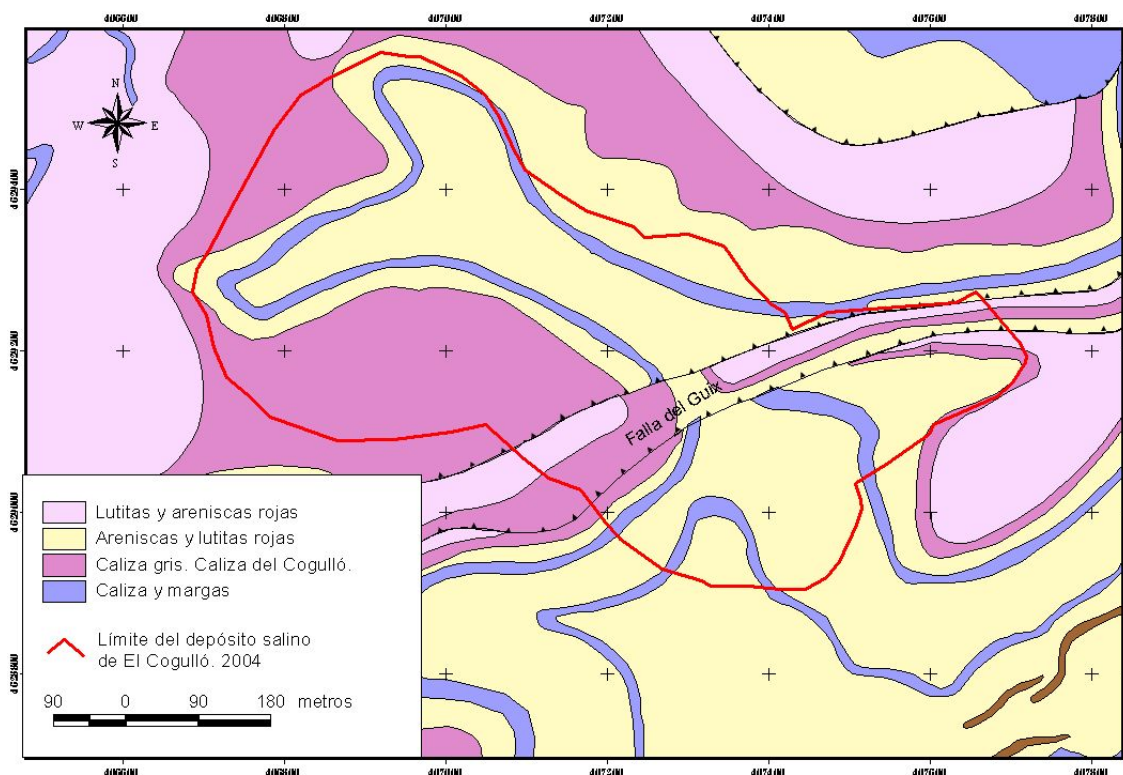


Figura 2. Geología del entorno del depósito salino.

Desde el punto de vista hidrogeológico, las formaciones geológicas presentes en el área de estudio, sobre las que se localiza el depósito salino, están clasificadas como impermeables o con acuíferos locales de

escasa importancia¹ y no existe en el entorno definida ninguna masa de agua subterránea, en consonancia con las directrices de la Directiva Marco del Agua. No obstante, la formación de calizas del Cogulló, en virtud a su naturaleza litológica y a los procesos de karstificación que han dado lugar al desarrollo de una porosidad secundaria, presenta cierta capacidad para permitir la circulación del agua subterránea, por lo que estos niveles de calizas pueden considerarse permeables.

Los estudios geológicos realizados en el entorno del emplazamiento han permitido deducir que los niveles de calizas permeables intercalados en el paquete terciario afloran bajo el depósito salino², por lo que existe una conexión hídrica con el agua que pueda contener la masa salina. Debido a la disposición espacial de las formaciones (buzamiento hacia el norte) el punto más bajo, a través del cual, se drenarían las aguas subterráneas circulantes por estos niveles calizos, se encuentra en el cauce del arroyo Soldevila a cota 320 m s.n.m.

La recarga por la infiltración del agua de lluvia en el entorno del emplazamiento, se localizan al sur del mismo a cotas del orden de los 427 m s.n.m. De esta forma, el flujo subterráneo en estos niveles permeables, en régimen natural, es fundamentalmente de dirección sureste-noroeste. Este esquema de flujo puede verse alterado localmente por la falla y contrafalla del Guix.

¹ Mapa de Unidades hidrogeológicas de la España Peninsular e Islas Baleares.(MOPU)

² Estudio hidrológico de las instalaciones mineras de Iberpotash .S.A. en la cuenca del Llobregat. Memoria.

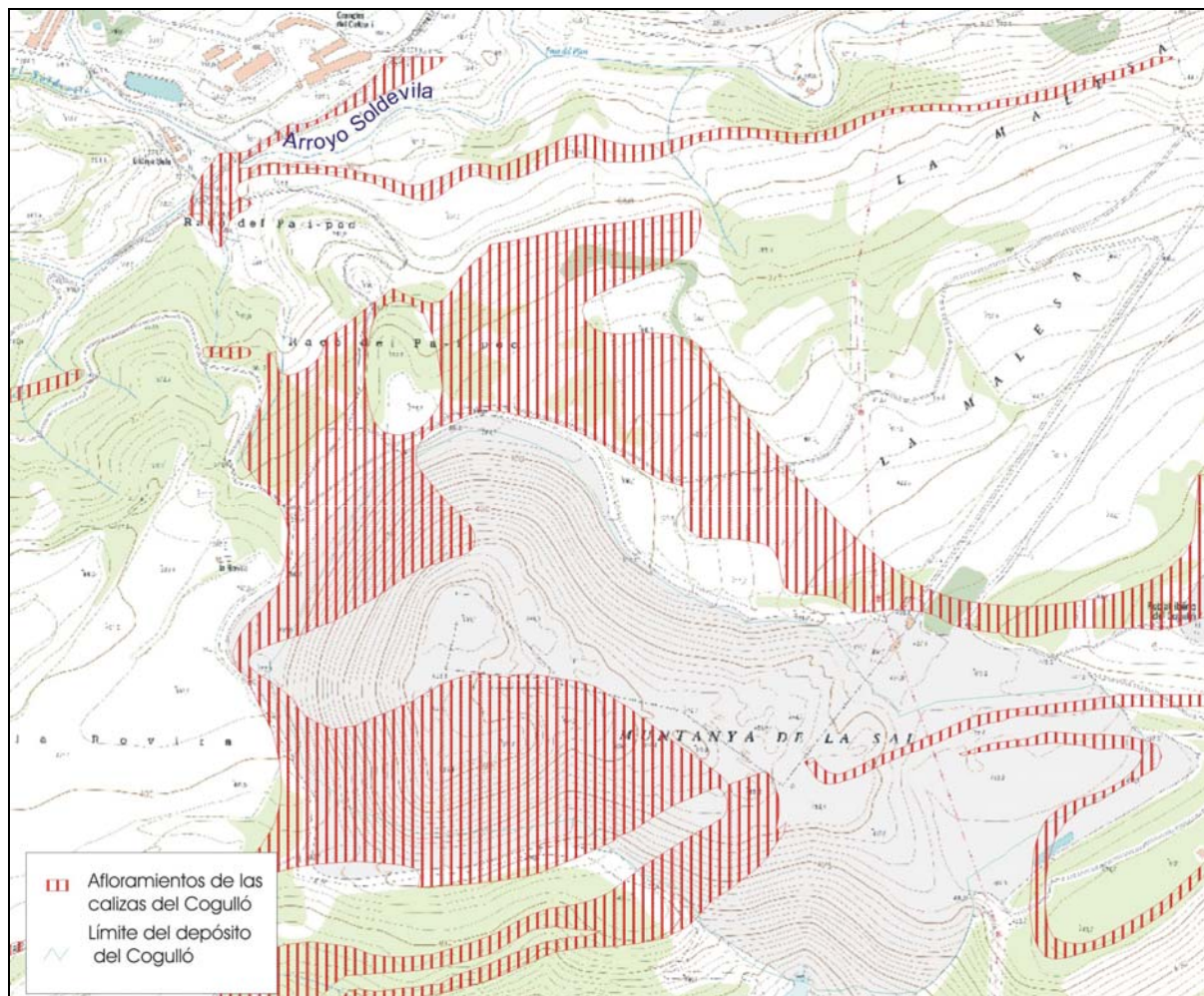


Figura 3. Localización del Arroyo Soldevila respecto a los afloramientos de calizas del Cogulló.

3 MODELO CONCEPTUAL.

El modelo conceptual de flujo adoptado como punto de partida para en el diseño del modelo matemático se ha basado en los estudios realizados para analizar el comportamiento de las acumulaciones de materiales salinos en distintos escenarios y la evolución en el tiempo de sus propiedades físicas y parámetros hidrodinámicos llevados a cabo en la Queens's University, Kingston, Notario, Canadá.

Las hipótesis sobre el comportamiento de las acumulaciones de sal obtenidas de los estudios citados son también asumidas por la Comisión Europea (Directorate-General JRC Joint Research Center. Institute for Prospective Technological Studies. Sevilla), tal y como se indica en la publicación "Draft Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities".(Draft May 2003).

A su vez, se han tenido en cuenta los resultados obtenidos en los estudios realizados sobre escombreras de minas de oro en Australia en las que los estériles de mina que se almacenan en superficie contiene agua con elevados contenidos en sal que pueden llegar a sobresaturarla. Los resultados fueron presentados en la decimocuarta Conferencia Internacional de mecánica de suelos y fundamentos de ingeniería en la publicación titulada "A study of evaporation from hypersaline tailings. T.A. Newson, Y Fujiyasu y M. Fahey de la Universidad de Western, Australia, W.A. Australia.

Así mismo, se han considerado los resultados de las experiencias realizadas por Iberpotash S.A., encaminados a corroborar las hipótesis planteadas sobre el funcionamiento hidrogeológico de los depósitos salinos, entre los que cabe destacar las experiencias realizadas para estimar la evaporación en el depósito salino³ y los ensayos de permeabilidad realizados por el Instituto Geológico y Minero de España realizados en los depósitos de Suria y Sallent.

Una de las principales características que presentan tanto las escombreras mineras como los depósitos salinos, derivada de la propia dinámica de extracción del mineral beneficiable, es la variación en el tiempo de la superficie que ocupan, de su altura, y, por tanto, de su morfología y volumen. A estas variaciones, en los depósitos salinos, hay que añadir que el incremento del material depositado provoca un aumento progresivo de la compactación del material previamente existente y, en consecuencia, una variación de las

³ Documento nº 5 Balances de agua en el depósito salino de El Cogulló.

propiedades hidrodinámicas del material que lo constituye, tales como la porosidad y la permeabilidad. Estas propiedades no sólo varían en el tiempo, sino también en el espacio como consecuencia del incremento de volumen del depósito.

En base a los estudios realizados en la Queen's University, Kingston, Ontario, Canadá para analizar la evolución de la porosidad y permeabilidad de los depósitos salinos, los cuales han sido realizados sobre materiales de características similares a los que se acumulan en el depósito salino de El Cogulló, se determina que un depósito de sal con una humedad inicial del 8% experimenta un grado de compactación del orden del 25%, debido al incremento de la presión que supone la existencia de nuevos depósitos sobre la sal inicialmente acumulada. Así mismo, como consecuencia de los procesos de compactación la humedad inicial del 8% pasa a ser del orden de 1% y la densidad de la sal alcanza valores de 1,7 y 1,8 g/cm³. La porosidad de la sal pasa de valores iniciales del orden del 25-30% a valores de porosidad del 2 y 3%. La permeabilidad, a su vez, experimenta una disminución correspondiente a valores comprendidos entre $7,05 \times 10^{-5}$ y $3,7 \times 10^{-3}$.

Estos mismos trabajos, concluyen que del agua expulsada de la estructura, el 80% se drena durante los procesos de compactación. El 60% del volumen restante se drena durante los tres meses siguientes y a los doce meses la sal acumulada contiene únicamente un 2% de agua.

La entrada en el sistema de agua dulce procedente de la precipitación sobre la superficie del depósito salino, provoca, en un primer instante, la disolución de la sal. Este comportamiento varía rápidamente, a medida que el agua dulce se va saturando en sal, de forma que la capacidad de disolución del agua de lluvia desaparece. Estos procesos tienen lugar en la franja más superficial o franja no saturada del depósito salino.

Existe una fracción de agua que se incorpora al depósito salino como humedad de la sal. Esta humedad se adquiere durante el proceso de separación de la halita de la silvinita y cuando alcanza el depósito se encuentra saturada en sal, por lo que no tiene capacidad de disolución.

El agua que circula a través de la sal puede llegar a sobresaturarse y dar lugar a procesos de precipitación que provocan la disminución de la porosidad y de la permeabilidad, generándose, dentro de la franja no saturada, niveles endurecidos o cortezas. Estas cortezas retienen el flujo descendente del agua favoreciendo la evaporación del agua en la franja superficial.

Como consecuencia de estos procesos los depósitos salinos se estructuran en dos capas o niveles con un funcionamiento hidrodinámico diferente y cuyas principales características son:

- Nivel superficial:

Incluye tanto, la franja de material depositado en un tiempo reciente, en el cual, la sal aun mantiene el porcentaje de porosidad adquirido durante el proceso minero y en el que el fenómeno de compactación del material aun no ha comenzado, como materiales depositados anteriormente pero que mantiene cierta porosidad como consecuencia de la disolución generada por la lluvia caída sobre el depósito. Este nivel superficial presenta una permeabilidad mayor y en él, la circulación del agua se efectúa a velocidad relativamente elevada y paralela a la superficie inferior del propio nivel.

- Núcleo

La presión que el peso del material depositado ejerce sobre el resto del depósito y los fenómenos de presión-disolución que experimenta la sal, dan lugar a la compactación del material y provocan la disminución de la porosidad. Como consecuencia de la disminución de la porosidad efectiva en profundidad, el cuerpo central del depósito salino está conformado por un núcleo muy impermeable de reducida porosidad, en el que la posible circulación de agua es escasa y lenta.

El funcionamiento hidrodinámico del depósito salino de El Cogulló, está íntimamente interrelacionado con el sustrato geológico que se encuentra en la base del mismo , así como con el sistema de drenes internos y perimetrales existentes en el entorno del depósito, funcionando todo el conjunto como un sistema único indivisible para el correcto entendimiento del funcionamiento del mismo. De aquí en adelante, el término “sistema del Cogulló”, englobará tanto el acopio de sal de El Cogulló como el sustrato geológico infrayacente y el sistema de drenes internos y perimetrales.

Por otro lado, se asume la existencia de un nivel de alteración localizado en la base del depósito salino, entre éste y el sustrato geológico, generado por la meteorización de los materiales geológicos del sustrato. Este nivel de alteración presentaría permeabilidades y porosidades propias de materiales disgregados y alterados que facilitaría la circulación subterránea de agua entre el depósito y el sustrato. El agua que circula por el nivel de alteración procede de la escorrentía subterránea del depósito salino y al alcanzar este nivel circularía hacia los puntos situados topográficamente más bajos en los que se encuentra, como se explica en apartados posteriores, el sistema de drenes internos. De no existir este nivel de alteración,

no sería posible explicar la circulación de agua existente entre los dos elementos mencionados, altamente impermeables y cuya existencia se pone de manifiesto por el drenaje de agua recogido en el sistema de drenes internos y que se contabiliza mediante un contador a la salida de los drenes en la Balsa de Escorrentía.



Figura 4. Esquema conceptual de un depósito salino.

Las entradas de agua al sistema están constituidas por la infiltración de lluvia caída directamente sobre el depósito salino y por la escorrentía superficial que se produce en la cuenca de recepción del arroyo Mas de les Coves, aguas arriba del depósito y que es interceptado por el mismo. Un tercer elemento de entrada al sistema lo constituye el agua que acompaña a la sal vertida(humedad de la sal).

Las salidas de agua del sistema se efectúan por evaporación en la franja más superficial del depósito salino, por drenaje a través del sistema de drenes perimetrales y centrales, proceso que se produce por el pie y base del depósito y por drenaje a través de las calizas permeables que constituyen parte del sustrato geológico.

Finalmente, existe una pequeña fracción del agua que entra en el depósito salino y queda inmovilizada en los poros y vacuolas de la sal, los cuales, debido a los proceso de compactación quedan cerrados, impidiendo la circulación del agua que queda retenida en ellos.

En definitiva los elementos que constituyen el balance hídrico del depósito salino del sistema del Cogulló son los siguientes:

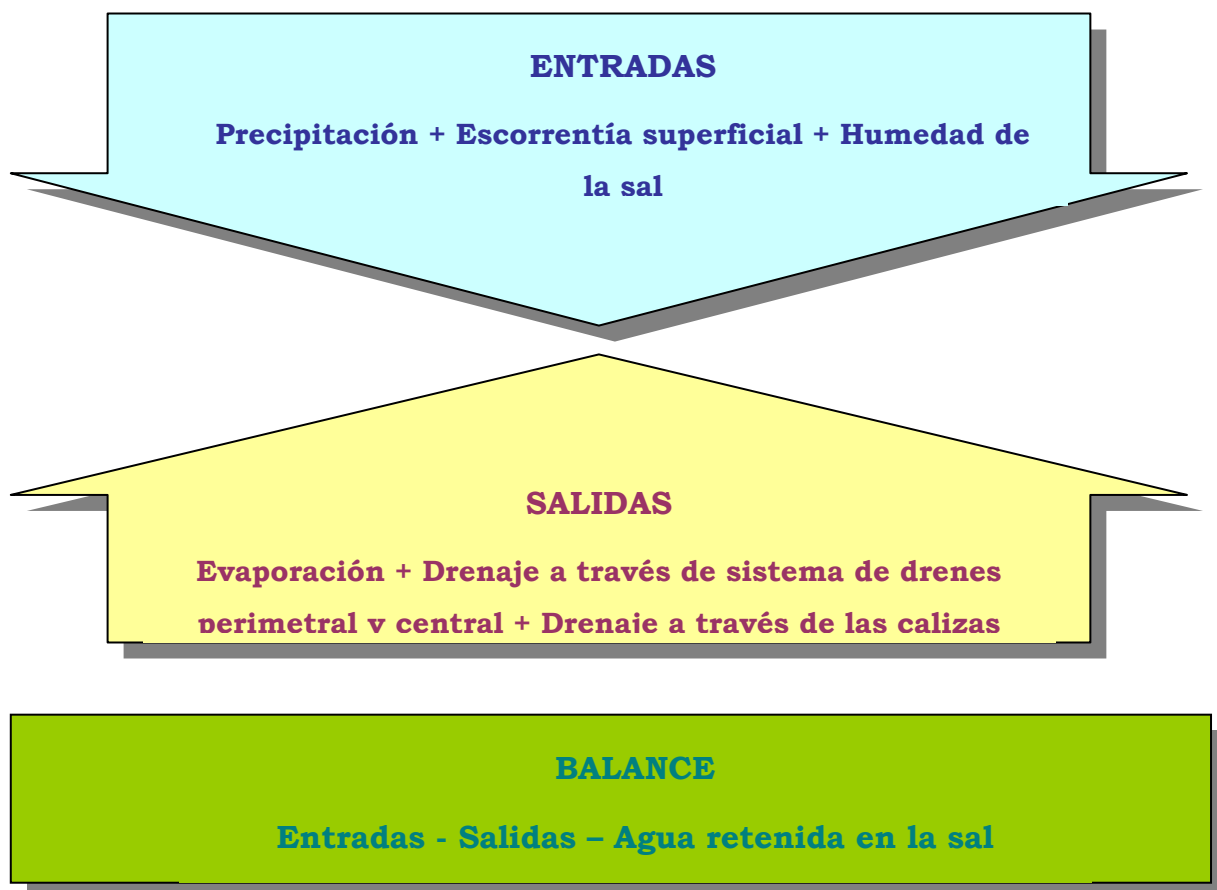




Figura 5. Esquema conceptual del depósito salino del Cogulló.

4 ELEMENTOS DEL SISTEMA

El acopio de sal en el depósito de El Cogulló comenzó a finales de la década de los setenta. El volumen acumulado, así como las dimensiones del depósito, han ido aumentando hasta la actualidad. Dado que el software con el que se ha llevado a cabo la simulación matemática no permite la variación de los parámetros hidrogeológicos en el tiempo, el modelo realizado se refiere a un periodo de tiempo de un año, asumiendo, por tanto, la simplificación que durante este periodo, los parámetros hidrodinámicos que definen el sistema no varían.

El tiempo simulado abarca el periodo comprendido entre marzo de 2004 y febrero de 2005, ya que es a partir de esa fecha cuando, a raíz de los estudios y controles que Iberpotash S.A. ha realizado en el depósito salino de El Cogulló, se dispone de más información sobre el funcionamiento hidrodinámico del depósito, así como, un registro más preciso de las salidas de agua del sistema.

4.1 El depósito salino.

El depósito salino de El Cogulló presenta una planta ovalada y ocupaba en el año estudiado una superficie de 35 hectáreas, donde su eje máximo de dirección NNO-SSE alcanzaba una longitud del orden de 1000 metros y el mínimo de 400 metros. La cota de coronación del depósito era de 570 m s.n.m. y la altura alcanzada sobre el terreno natural del orden de los 100 metros. Considerando una densidad media del vertido de $1,5 \text{ t/m}^3$, éste era del orden de 32 Mt.

Los valores de permeabilidad del núcleo del depósito salino de El Cogulló se han obtenido a partir de los tests realizados por el Instituto Geológico y Minero de España: slug, pulso, inyección en régimen transitorio a nivel constante e inyección en régimen pseudoestacionario⁴. Los resultados obtenidos son del orden de 10^{-7} y 10^{-8} m/s para el núcleo del depósito salino. No se ha podido ensayar *in situ* la permeabilidad de la zona superficial, la más permeable, ya que en los puntos sondeados no se encontraba saturada.

Ensayos de laboratorio llevados a cabo por el profesor Euler M. Souza en la Queen's University, Kingston, Canadá, realizados sobre materiales salinos de características similares a las que presentan los materiales acumulados en el depósito salino de El Cogulló, concluyen que para materiales salinos con una porosidad

⁴ Documento nº 8 Ensayos de permeabilidad del depósito salino “El Cogulló” y en el terciario.

del 22%, la permeabilidad mínima del material es del orden de 3×10^{-4} disminuyendo hasta hacerse prácticamente nula, a medida que disminuye la porosidad. En la capa superior del depósito salino, la permeabilidad disminuye en profundidad, al igual que el resto del depósito. En términos generales se asume que la permeabilidad media de este nivel superficial puede ser del orden del 5-6%. En la gráfica adjunta tomada de las publicaciones realizadas por el profesor Euler M. Souza en la Queen's University, Kingston, Canadá, se muestra la variación de la permeabilidad frente a la porosidad. En rojo se ha incluido la correspondencia de permeabilidad para un material con una porosidad comprendida entre el 5 y 6%, los cuales serían del orden de 0,001 cm/s.

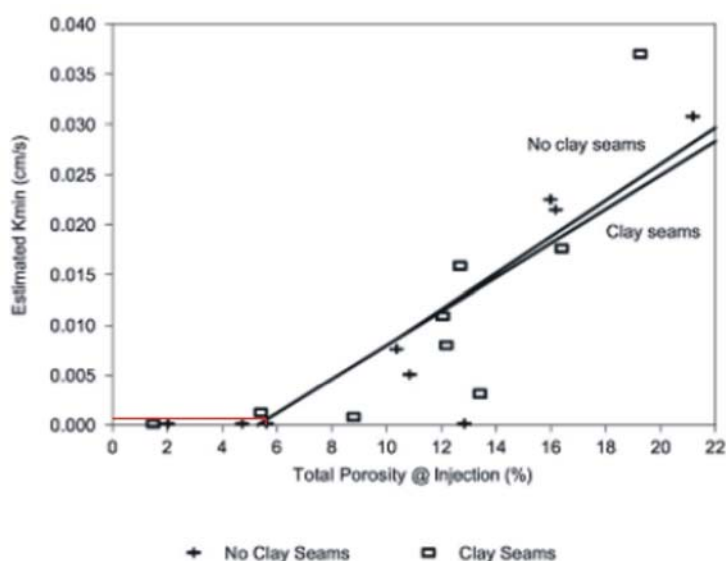


Figura 6. Variación de la permeabilidad vs porosidad

Ensayos realizados por este mismo equipo de investigación sobre materiales salinos sometidos a escalones de presión crecientes obtuvieron que la compactación que se produce en el material es del orden del 25% y como consecuencia los valores iniciales de porosidad (del orden de 25 a 30%) quedan reducidos a valores comprendidos entre 2 y 3%. Estos valores son lo que corresponderían a los materiales que constituyen el núcleo del depósito salino.

4.2 El sustrato geológico.

Las litologías que constituyen la base sobre la que se apoya el depósito salino de El Cogulló son, como se indicaron en el epígrafe anterior, por un lado los niveles impermeables de lutitas y areniscas y por otro los niveles permeables de calizas. En la figura nº 2 se puede observar la distribución en planta de estas formaciones y en la figura nº 5 un esquema de su disposición en la vertical. Los valores de permeabilidad de estos materiales se han obtenido, a su vez, en el marco de los estudios realizados por el Instituto Geológico y Minero de España citados en el epígrafe anterior. Los resultados obtenidos, asignan valores de permeabilidad de 10^{-11} m/s para las lutitas y de 10^{-6} m/s para los niveles calizos. Se asume una porosidad del 3% para las calizas y del 1% para las lutitas.

El nivel de alteración existente entre la base del depósito salino y el sustrato geológico sano, procede de la alteración por procesos de meteorización de las formaciones de lutitas y areniscas rojas por un lado y de calizas por otro. No he sido posible obtener información sobre los parámetros hidrodinámicos correspondientes a este nivel de alteración, por lo que se ha supuesto un valor único de permeabilidad y porosidad (10^{-5} m/s y 20%, respectivamente) propios de materiales alterados y disgregados.

En la tabla 1 se recogen a modo de resumen los valores de los parámetros hidrodinámicos asignados para los distintos materiales integrantes del sistema del Cogulló

MATERIAL	PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS		FUENTE
	Permeabilidad (m/s)	Porosidad (%)	
Nivel superficial del depósito salino	10^{-5} - 10^{-6}	5-6	Porosidad: Bibliográfica
			Permeabilidad: Bibliográfica
Núcleo del depósito salino	10^{-7} - 10^{-8}	2-3	Porosidad: Bibliográfica
			Permeabilidad: Ensayos IGME
Franja de alteración	10^{-5}	20	Porosidad: Bibliográfica
			Permeabilidad: Bibliográfica
Lutitas y areniscas rojas	10^{-11}	1	Porosidad: Bibliográfica
			Permeabilidad: Ensayos IGME
Calizas	10^{-6}	3	Porosidad: Bibliográfica
			Permeabilidad: Ensayos IGME

Tabla 1. Valores de permeabilidad

4.3 Sistemas de drenaje.

Entre las distintas actuaciones llevadas a cabo por Iberpotash S.A. encaminadas a realizar una gestión de las aguas, se incluye la colocación de una red de tuberías ranuradas situadas en el fondo de los antiguos

valles sobre los que se emplaza el depósito salino. Estas tuberías que han ido incrementando su longitud a medida que aumentaba la extensión del depósito están conectadas con la Presa de Escorrentías localizada en el extremo meridional del depósito, en el punto más bajo de la zona ocupada de la cuenca del arroyo Mas de les Coves. Este sistema de drenes internos recoge principalmente la escorrentía subterránea que circula a través del depósito salino y que alcanza la base del mismo.

Los materiales que constituyen la interface sustrato geológico-depósito salino, se encuentran altamente alterados, tal y como se indicó en el apartado anterior, presentando valores de permeabilidad elevados. De esta forma, en las zonas donde por debajo del nivel alterado se localizan las lutitas rojas impermeables, el agua procedente del depósito salino que alcanza el nivel alterado circulará, de forma subálvea, preferentemente hacia los puntos situados topográficamente más bajos, los cuales coinciden con la ubicación del sistema de drenaje interno, siendo recogida por las tuberías ranuradas y derivadas a la Balsa de Escorrentía. En las zonas donde por debajo del nivel alterado se encuentran las calizas permeables, el agua procedente del depósito salino que alcanza la base del mismo, circulará a través de las calizas en función del nivel piezométrico existente en las mismas.

En la base del depósito salino de El Cogulló y por debajo del nivel de alteración, el 32% de la superficie corresponde a afloramientos calizos y el 68% restante a afloramientos de materiales impermeables, por lo que es previsible que del volumen de agua que alcanza la base del depósito salino, la mayor parte circule hacia las tuberías del sistema interno de drenes y sólo una pequeña fracción, drenen hacia los materiales permeables. Por otro lado, debido a la elevada impermeabilidad del núcleo del depósito salino, es previsible que la mayor parte del agua que circula por el depósito, lo haga a través del nivel superficial, en contacto con el sustrato únicamente en la zona perimetral del mismo.

A lo largo del perímetro del depósito salino existe a su vez una red de canales perimetrales que recoge el agua procedente de la escorrentía superficial generada aguas arriba del depósito salino y el agua que se drena al pie del depósito. En estos canales, el agua recogida circula hacia los puntos de cota más baja, de forma que en la zona norte y oeste, el agua circula hacia los valles de los antiguos cauces, dónde el sistema externo de canales conecta con el interno. En el extremo sur y este el agua interceptada por los canales de drenaje perimetral se dirige directamente hacia la balsa de escorrentía. En el extremo noreste del depósito salino, donde se encuentra la balsa de lodos, no existen drenes perimetrales. Los lodos vertidos en esta balsa son altamente impermeables y en ellos la circulación del agua es escasa y se efectúa de forma difusa, por numerosos canales naturales hacia el punto más bajo, dónde es recogida por una tubería que la conduce, a su vez, hacia la Balsa de Escorrentía, como se indica en la figura adjunta, dónde la línea verde intermitente representa la tubería que recoge el agua en la balsa de lodos y la deriva

hacia la Balsa de Escorrentía. Las líneas de color verde continuas indican la disposición de los drenes perimetrales y la dirección de circulación, mientras que las líneas moradas indican la disposición de los drenes internos y la dirección en la que circula el agua en su interior.

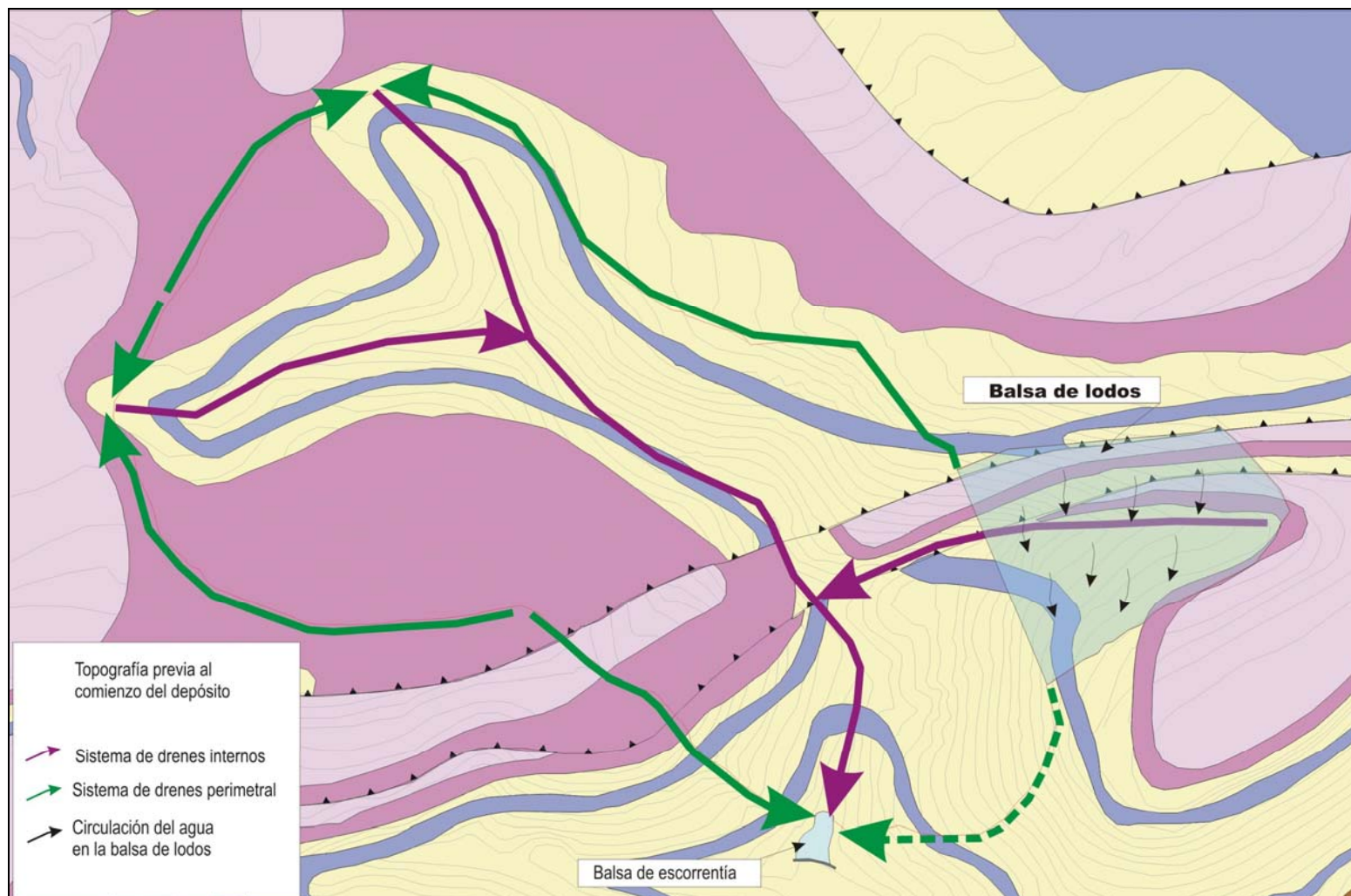


Figura 7. Sistema de drenes interno y perimetral del depósito salino de El Cogulló

5 TÉRMINOS DEL BALANCE DEL SISTEMA

Los elementos que participan en el balance hídrico del sistema del Cogulló para un periodo de tiempo concreto son como se han indicado en epígrafes anteriores los siguientes:

- Entradas:

- Agua de lluvia que se infiltra en el depósito. **(P)**
- Agua que acompaña a la sal. Humedad de la sal **(H)**
- Escorrentía superficial en la cabecera del arroyo Mas de Les Coves **(ES)**

- Salidas:

- Evaporación a través de la superficie del depósito salino **(E)**
- Salidas hacia el sistema de drenaje **(D)**
- Drenaje hacia las formaciones permeables del sustrato. **(C)**

Parte del agua que entra en el sistema, queda atrapada en los poros cerrados de la sal, quedando inmovilizada, de forma que deja de circular a través del depósito. El agua retenida en la sal **(R)** no puede ser considerado como una salida del sistema de forma estricta, no obstante debe ser considerado en términos del balance para una correcta interpretación del mismo.

De esta forma, la ecuación que define la variación en el almacenamiento **(ΔA)** del sistema del Cogulló será:

$$P + H + ES = E + D + C + R + \Delta A$$

El periodo de tiempo considerado corresponde, al espacio comprendido entre marzo de 2004 y febrero de 2005, periodo en el que como se ha indicado anteriormente, es en el que se dispone de mayor cantidad de información referente a las entradas y salidas del sistema del Cogulló.

A continuación se describen cada uno de los elementos considerados en el balance:

Aqua de lluvia que se infiltra en el depósito. En la tabla nº2 se incluye los datos de precipitación mensual registrados en la estación meteorológica localizada en las instalaciones de Iberpotash S.A. en las proximidades del depósito salino de El Cogulló. El agua de lluvia presenta un bajo contenido salino. Por otro lado, la sal vertida constituye un material muy soluble y por esta razón se admite que el agua de lluvia que cae directamente sobre la superficie del depósito salino se infiltra en el mismo, sin que se produzca escorrentía por la superficie de los taludes del depósito salino.

Mes	Precipitación (mm)
Marzo-2004	55.6
Abril-2004	86.9
Mayo-2004	49
Junio-2004	34.6
Julio-2004	68.7
Agosto-2004	54.5
Septiembre-2004	44.2
Octubre-2004	12.7
Noviembre-2004	5.2
Diciembre-2004	29.5
Enero-2005	1.5
Febrero-2005	68.3
Total	510.7

Tabla 2. Precipitación registrada en el entorno de El Cogulló.

Evaporación. Los diámetros de los poros existentes en la capa superficial del depósito salino, así como la proximidad a la superficie del nivel de saturación de esa capa, favorece la existencia de procesos capilares que dan lugar a la pérdida de agua por evaporación. Este fenómeno es tanto más acusado cuanto más cercano a la superficie se encuentre el nivel de saturación, por lo que se estima que la tasa de evaporación es mayor en la franja próxima al pie del depósito salino y es menor en las zonas más elevadas.

En el ámbito de los trabajos que Iberpotash S.A. está realizando en el depósito salino de El Cogulló se incluye un estudio cuyo objetivo ha sido acotar la evaporación que puede producirse en la superficie del depósito. Una descripción de la experiencia realizada y de las conclusiones obtenidas puede obtenerse en

el documento nº 5 del presente estudio (Balances de agua en el depósito salino de El Cogulló) En la tabla adjunta se incluyen los valores de evaporación estimados para el año 2004 extraídos del citado estudio.

Mes	Evaporación (mm)
Marzo	8
Abril	9
Mayo	14
Junio	19
Julio	21
Agosto	19
Septiembre	12
Octubre	6
Noviembre	3
Diciembre	2
Enero	4
Febrero	4

Total	121
-------	-----

Tabla 3. Evaporación registrada en el entorno de El Cogulló

Agua que acompaña a la sal. En el proceso minero de separación de la silvina del resto de las sales, se utilizan salmueras con una densidad intermedia entre las densidades de las sales separadas. Posteriormente el material se somete a un proceso de secado de forma que la humedad final de la halita depositada en El Cogulló es del orden del 8-9%. Este dato es conocido con precisión ya que en los laboratorios de Iberpotash S.A. se analiza con periodicidad el contenido de humedad de la sal antes de ser vertida. En 2004 el contenido medio fue de 8,4% y la sal vertida durante este periodo de tiempo fue de 1.578.568 t. De esta forma el volumen de agua incorporado al sistema por este concepto fue de 132.600 m³.

Agua retenida en la estructura de la sal. Anteriormente, se ha indicado que de las experiencias llevadas a cabo por el equipo de investigadores canadienses se deduce que el porcentaje de agua retenido en la sal después de haber sufrido los fenómenos de compactación, puede ser del orden del 1%. Considerando el volumen de sal vertida durante el año 2004 (1.578.568 t), y la densidad de la salmuera

(1,2 t/m³), se estima que el volumen de agua retenido en el depósito salino, del total que se incorpora con la sal, es del orden de 13.155 m³.

Salidas hacia el sistema de drenaje. Bajo este concepto se computan por un lado, la escorrentía superficial que se genera en la cuenca de recepción del arroyo Mas de les Coves, aguas arriba del depósito salino y que es recogido por el sistema de drenaje y por otro el drenaje de la propia masa salina tanto bajo el cuerpo del depósito salino como el que se produce al pie del depósito. El primero se recoge directamente por el sistema de drenaje perimetral y es dirigido hacia la balsa de Escorrentía a través de los drenes internos y el segundo por el sistema de canales internos directamente y a su vez, es dirigido hacia la balsa de escorrentía. En el año estudiado se estima que la superficie de la cuenca de recepción era de 22 hectáreas y la escorrentía superficial generada del orden de 1.685 m³. Hacia mediados de febrero de 2004 se instaló un contador de agua para determinar con precisión los caudales recogidos en la Balsa de Escorrentías. De esta forma se conoce que entre marzo de 2004 y febrero de 2005 el caudal vertido a la balsa de escorrentía fue de 152.577 m³.

Mes	Caudales (m³/mes)
Marzo-2004	11.409
Abril-2004	17.12
Mayo-2004	15.76
Junio-2004	12.413
Julio-2004	12.994
Agosto-2004	12.918
Septiembre-2004	13.349
Octubre-2004	13.539
Noviembre-2004	11.583
Diciembre-2004	11.379
Enero-2005	10.836
Febrero-2005	9.277

Total	152.577
-------	---------

Tabla 4. Caudales registrados en el caudalímetro de la Balsa de Escorrentía

Drenaje hacia las formaciones permeables del sustrato. Al pie de la surgencia de los afloramientos calizos en el valle del Soldevila, situado al norte del depósito salino, se construyó una presa, con objeto de controlar el caudal drenado desde la base del depósito salino a través de estos niveles permeables y

enviarlos a las balsas que regulan las entradas al Colector de Salmueras de la Generalitat. En febrero de 2004 se instaló un contador de agua que registra los volúmenes enviados. Dado que además del drenaje subterráneo se incluye, también, la escorrentía superficial que pudiera generarse en la cuenca de recepción de la balsa, en periodos de fuertes lluvias, se estima que del caudal total registrado por dicho contador en el periodo comprendido entre marzo de 2004 y febrero de 2005 (233.543 m³), sólo el 46% procedía del drenaje subterráneo de los niveles calizos, lo que supone 107.100 m³.

Finalmente y a modo de resumen, se incluye en la tabla adjunta, el balance estimado para el año estudiado(marzo de 2.004-febrero de 2.005) en el que se puede observar las que las entradas y salidas de agua están prácticamente equiparadas, por lo que se entiende que el sistema del Cogulló se encuentra en equilibrio hídrico.

Entradas	Humedad de la sal	132.600
	Infiltración de lluvia	179.524
	Escorrentía superficial	1.685
	Total	313.809
Salidas	Sistema de drenaje	152.577
	Drenaje hacia los niveles permeables	107.100
	Evaporación	42.535
	Inmovilizada en la sal	13.155
	Total	315.367

Tabla 5. Balance de agua obtenido (m³).

6 MODELO MATEMÁTICO.

A partir del modelo conceptual del sistema de Cogulló planteado se ha elaborado un modelo de flujo del depósito salino, en tres dimensiones, aplicando el método de resolución matemática de elementos finitos. El problema se ha resuelto en régimen transitorio. El periodo de tiempo simulado corresponde al año previamente indicado comprendido entre marzo de 2.004 y febrero de 2.005. El software utilizado ha sido el Feflow, versión 5.2, creado por Wasy (Institute for Water Resources Planning and Systems Research).

6.1 Discretización del medio físico.

El sistema hidrogeológico constituido por el conjunto depósito salino-sustrato geológico se ha discretizado en una malla tridimensional que consta de 7 capas (layers) y 8 niveles (slices). Los elementos que constituyen la malla son prismas triangulares de 6 nodos. En total, la malla generada consta de 12.390 elementos y 7.728 nodos.

La malla se ha construido de forma automática a partir de la digitalización del perímetro del depósito salino generando una malla de elementos equiareales que, posteriormente, se ha refinado en las zonas de mayor interés (zonas próximas a los bordes y localización del sistema de drenaje) para permitir un resultado más preciso. La malla generada se ha sometido, finalmente, a un proceso manual de optimización con objeto de eliminar el mayor número posible de elementos obtusos que pudieran dificultar el proceso de convergencia matemática. De esta forma el número de elementos con estas características negativas es inferior al 10%.

El área discretizada abarca una superficie de 34 ha. La diferencia de este valor con el indicado anteriormente para la superficie de ocupación del depósito salino, reside principalmente en los ajustes del perímetro que se ha realizado durante el proceso de optimización de la malla creada.

En el modelo realizado se han definido las siguientes capas:

Las capas 1 y 2 corresponden con la capa superficial del depósito salino en la que el material salino conserva bien la porosidad inicial adquirida durante el proceso minero, bien la conseguida por disolución del agua de lluvia caída sobre el mismo; en los dos casos tanto la permeabilidad como la velocidad de flujo son relativamente elevadas. El espesor conjunto de estas dos capas es de 20 metros.

Las capas 3 y 4 del modelo corresponden con el núcleo impermeable del depósito salino, dónde la velocidad de circulación es lenta y en el que los parámetros de porosidad y permeabilidad han quedado

reducidos por los procesos de compactación experimentados. El espesor conjunto de estas capas es variable, como consecuencia de la morfología del terreno y del depósito salino y oscilan entre mínimos de prácticamente 0 metros en la zona perimetral del depósito hasta espesores del orden de 100 metros, en la zona que corresponde en la vertical con la coronación del depósito salino.

La capa 5 del modelo simula el nivel superficial de materiales alterados que se dispone en la interfaz depósito salino-sustrato geológico. El espesor de esta capa es de 1 metro.

Finalmente las capas 6 y 7 simulan el sustrato geológico infrayacente al depósito salino. Estas dos capas se han generado con un espesor conjunto de 10 metros, el cual se ha considerado suficiente para representar la iteración del depósito salino con el sustrato geológico infrayacente.

El software utilizado en la modelización, no permite acuñar o terminar unas capas contra otras, por lo que todas las capas presentan la misma extensión espacial.

La generación de los niveles (slices) se ha llevado a cabo partiendo del modelo digital del terreno (MDT) correspondientes a la superficie del terreno previa al comienzo del vertido y del MDT correspondiente al año 2004 en el que se incluye el depósito salino.

De esta forma, el nivel 1 corresponde al MDT del año 2004. Los niveles 2, 3 y 4 se han generado restando a la altimetría del MDT de 2004 un valor tal que la superficie resultante fuera concéntrica a la superficie de 2004, en el caso de los niveles 2 y 3, las superficies generadas se mantienen en todos los puntos a una distancia de 10 y 20 metros respectivamente y en el caso del nivel 4 a una distancia de 70 metros desde la superficie.

Los niveles 5, 6, 7 y 8 se han generado a partir del MDT previo al comienzo del vertido. El nivel 5, se ha obtenido sumando 1 metro a la altimetría del MDT previo y los niveles 7 y 8 restando 5 y 10 metros a la altimetría del MDT previo, de forma que estos tres niveles son paralelos al MDT previo. El nivel 6 corresponde al MDT correspondiente a la topografía previa al comienzo del depósito salino.

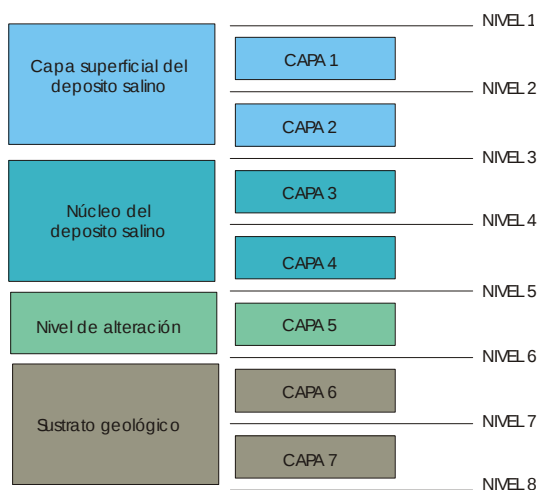


Figura 8. Esquema de correspondencia entre las capas y niveles del modelo y las capas del depósito salino

6.2 Conceptualización de los elementos del sistema.

Recarga. La recarga del sistema se ha simulado utilizando el módulo source/sink del programa Feflow que permite simular recargas positivas (source) y recargas negativas (sink). Los valores de recarga consignados al modelo se han distribuido de forma mensual y se han estimado considerando por un lado la precipitación mensual directa sobre la superficie del depósito salino, valores a los que se les ha restado la evaporación mensual y la recarga correspondiente al término del balance definido como humedad de la sal vertida.

La distribución de la precipitación sobre la superficie de la malla ha sido homogénea, de forma que cada uno de los elementos recibe la misma tasa de recarga en concepto de precipitación.

La evaporación se ha distribuido en tres franjas concéntricas: En la franja más externa (7,8 ha), adscrita al borde del depósito se ha computado el 60% del volumen de la evaporación total, en la franja central de 17,9 ha, se ha computado un 30% del volumen de la evaporación y en la franja interna, adscrita a la zona de coronación se ha computado el 10% restante.

El objeto de esta distribución ha sido simular el hecho que se indicaba en la descripción del modelo conceptual, en la que se advierte que los procesos de evaporación son más acusados en las zonas próximas al pie del depósito salino y de menor envergadura en las zonas de coronación, en función de la disposición del nivel de saturación de la capa superior.

Comparando los levantamientos topográficos del depósito salino correspondientes al inicio de los años 2004 y 2005, se ha determinado la zona sobre la que se ha producido el vertido de sal durante el periodo de tiempo simulado. Esta zona abarca una extensión de 7,7 ha y se localiza en el sector occidental del depósito. En la área de la malla correspondiente a este sector se ha computado una recarga adicional que supone la humedad de la sal vertida (132.600 m^3) distribuido de forma homogénea en todos los elementos incluidos en esta área, lo que supone un incremento de la recarga de $1,72 \text{ m}^3/\text{año}$. No se han considerado las entradas procedentes de la escorrentía superficial, ya que ha efectos de términos de balance se consideran insignificantes.

En la tabla adjunta se incluyen los valores mensuales asignados a las diferentes zonas de recarga efectiva, cuya distribución espacial puede verse en la figura adjunta.

Recarga z. Interior (mm/mes)	Recarga z. Intermedia (mm/mes)	Recarga z. Exterior (mm/mes)	Recarga z. interior + humedad de la sal (mm/mes)	Recarga z. intermedia + humedad de la sal (mm/mes)	Recargaz. exterior + humedad de la sal (mm/mes)
-0,18	-0,75	-8,91	-0,18	-0,75	-8,91
66,21	65,46	55,29	66,21	65,46	55,29
53,1	52,2	39,99	53,1	52,2	39,99
83,97	82,95	68,67	83,97	82,95	68,67
45,66	44,49	28,17	45,66	44,49	28,17
30,84	29,52	11,16	30,84	29,52	11,16
64,5	63,06	42,66	64,5	63,06	42,66
49,89	48,27	25,86	49,89	48,27	25,86
39,18	37,41	12,96	39,18	37,41	12,96
7,26	5,34	-21,15	7,26	5,34	-21,15
-0,66	-2,7	-31,23	-0,66	-2,7	-31,23
23,22	21,03	-9,54	23,22	21,03	-9,54

Tabla 6. Valores de recarga asignados

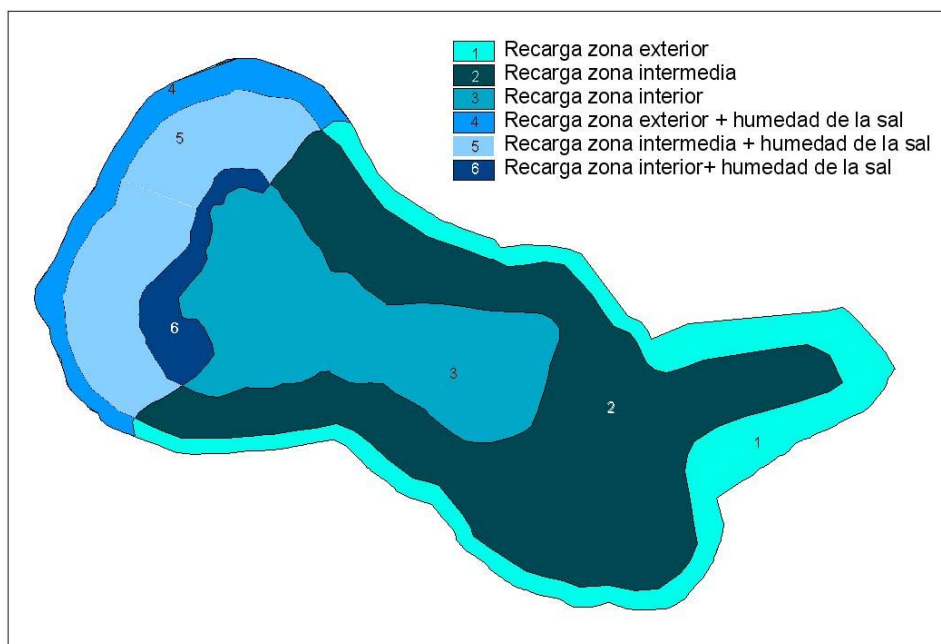


Figura 9. Zonas de recarga modelizadas

Permeabilidad y porosidad. La permeabilidad es un parámetro que es función de las características intrínsecas del material y de las propiedades hidrodinámicas del fluido que las atraviesa (peso específico y viscosidad dinámica). En el caso que nos ocupa, el fluido circulante por el depósito salino corresponde a una salmuera de densidad $1,25 \text{ t/m}^3$ y viscosidad dinámica que varía en un rango comprendido entre 2 y 4 centipoises.

La recarga procedente del agua de lluvia se convierte rápidamente en una salmuera al infiltrarse en el depósito, debido a que la solubilidad del material salino es muy elevada y el fenómeno de sobresaturación del agua dulce se efectúa en un breve periodo de tiempo. El fluido empleado en la realización de los ensayos que el Instituto Geológico y Minero de España, efectuó para caracterizar la permeabilidad de los materiales del depósito salino de El Cogulló, era una salmuera y por tanto los valores de permeabilidad obtenidos no corresponde a la permeabilidad intrínseca de los materiales, sino a la permeabilidad equivalente o permeabilidad influenciada por los parámetros hidrodinámicos del fluido utilizado.

El modelo matemático de flujo utilizado no considera como variables de entrada las propiedades dinámicas de los fluidos, por lo que no es posible variarlas, de modo que el fluido de simulación corresponde a uno de peso específico 1 t/m^3 y viscosidad dinámica 1 centipoise. No obstante, en el presente trabajo se ha

considero que los resultados obtenidos al simular el binomio permeabilidad intrínseca – fluido viscoso son asimilables a los resultados obtenidos con el binomio permeabilidad equivalente-fluido de viscosidad 1 centipoise, asumiendo la simplificación que este hecho supone.

La permeabilidad de los diferentes materiales diferenciados se ha simulado con los módulos conductivity (Kxx, Kyy, Kzz) del programa Feflow. Las capas 1 y 2, correspondientes a la capa superficial del depósito salino se han considerado isotrópicas y homogéneas y se le ha asignado un valor de permeabilidad equivalente de 10^{-6} m/s.

En las capas 3 y 4, correspondientes al núcleo del depósito salino se han considerado de igual forma isotrópicas y se les ha asignado un valor de permeabilidad equivalente de 10^{-8} m/s. La distribución espacial de las capas del depósito salino, en la realidad, es concéntrica, de forma que en el pie del depósito, la capa superficial está en contacto con el sustrato geológico. El programa utilizado en la simulación no permite crear capas de diferente extensión superficial, ni elementos con componente tridimensional de valor 0. De forma que no es posible generar una malla tridimensional en cuyos extremos la capa 2 se encuentre sobre la capa 5, correspondiente en este caso al sustrato geológico. Con objeto de salvar dicha limitación se ha realizado un artificio consistente en asignar a los elementos de la franja externa de las capas 3 y 4, las propiedades correspondientes a la capa superficial del depósito salino, asegurando así la continuidad hídrica entre la capa superficial (capas 1 y 2 del modelo) y el sustrato geológico (capa 5, 6 y 7)

La capa 5 del modelo representa el nivel de alteración superficial existente entre la masa salina y el sustrato geológico y se le ha asignado un valor de permeabilidad equivalente de 10^{-5} m/s para las tres componentes espaciales de la permeabilidad (Kxx, Kyy, Kzz).

Finalmente, en las capas del modelo que representan el sustrato geológico (capas 6 y 7) se han distinguido por un lado los elementos que corresponden a los afloramientos en planta de los niveles permeables de calizas, a los que se les ha asignado un valor de 10^{-5} m/s y los elementos que corresponden a los afloramientos de materiales lutíticos a los que se les ha asignado un valor de permeabilidad equivalente de 10^{-8} m/s.

Los criterios seguidos para asignar los valores de permeabilidad son idénticos a los indicados en el caso de la permeabilidad. En la tabla adjunta se incluyen dichos valores:

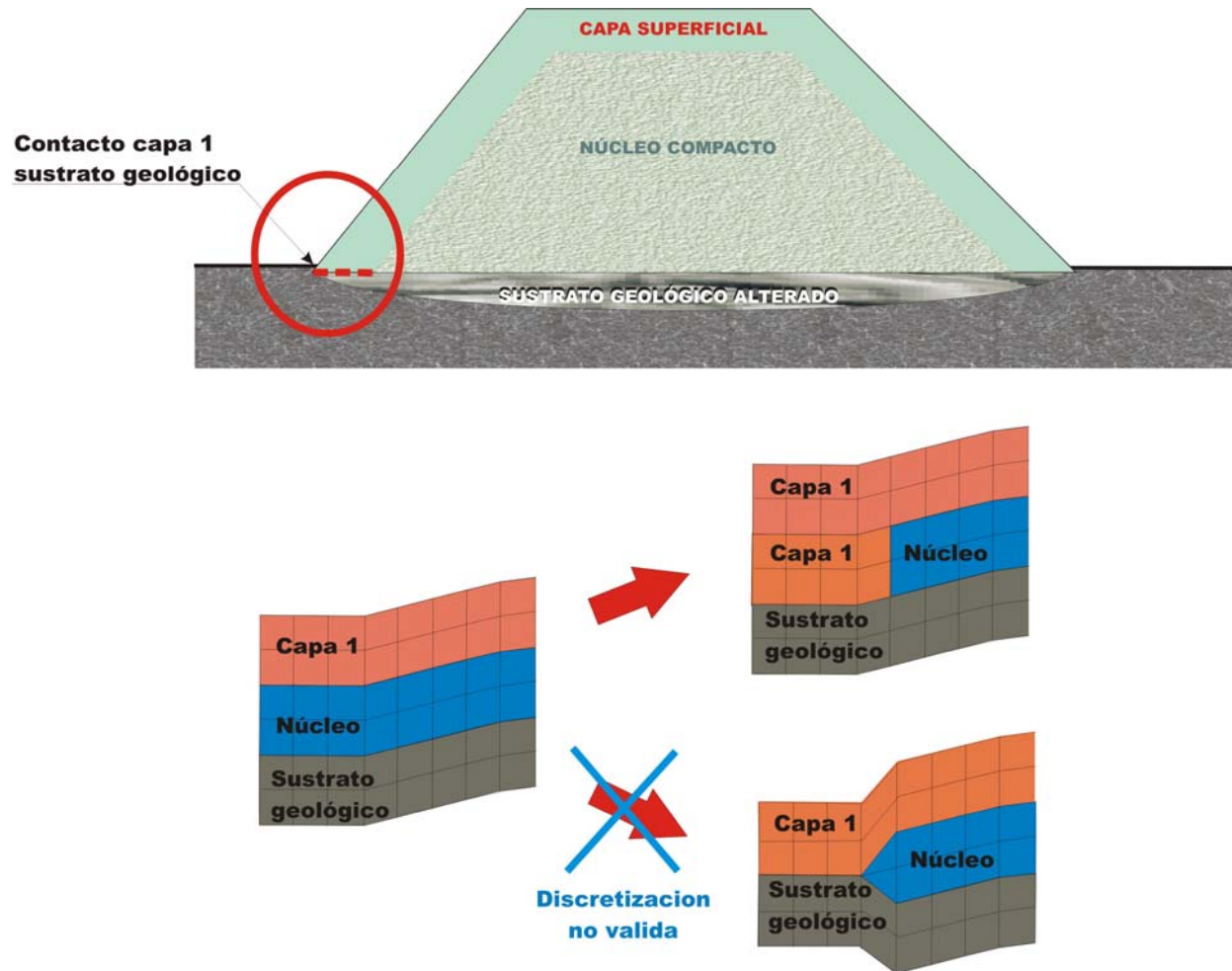


Figura 10. Modelización del contacto capa superficial sustrato geológico

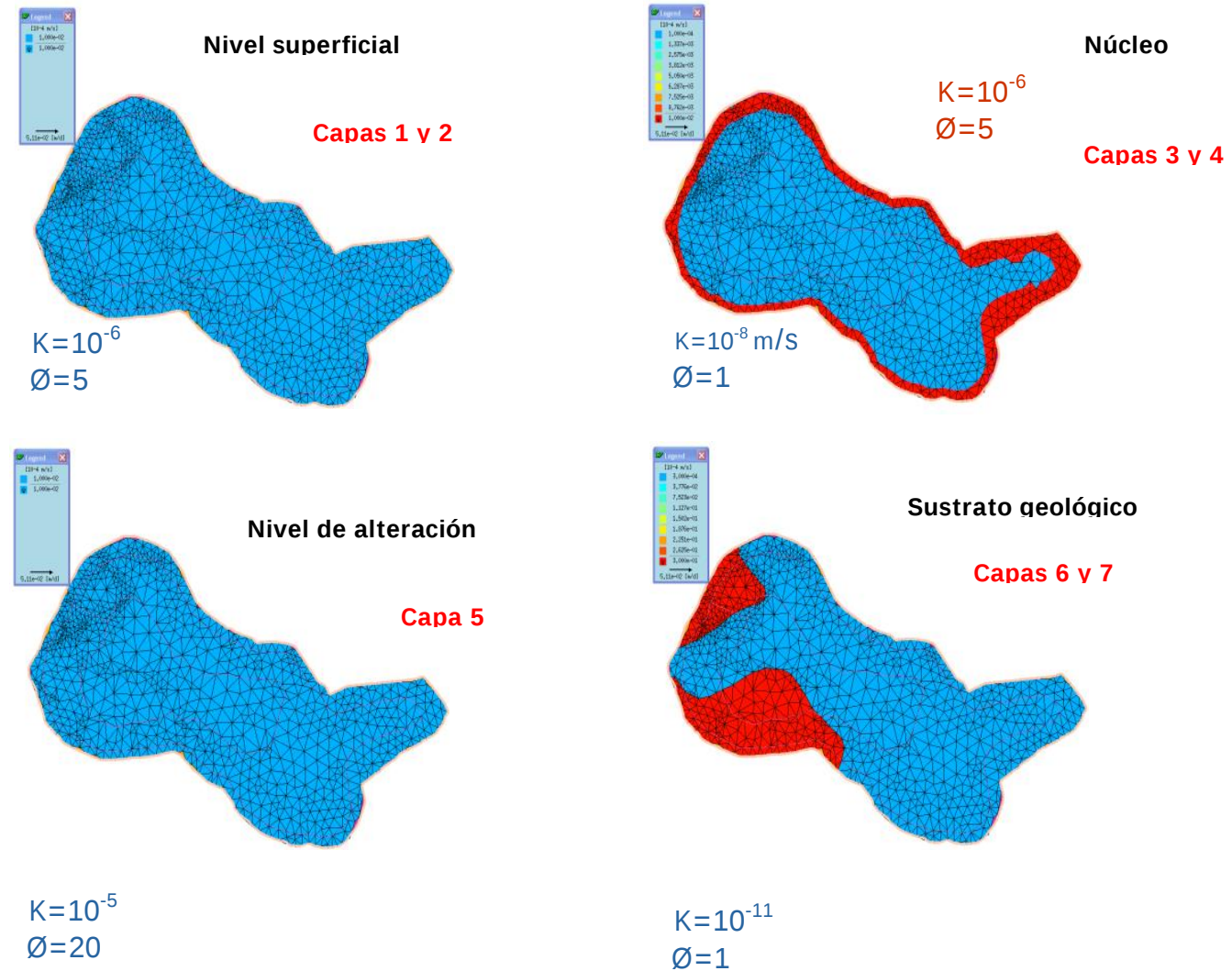


Figura 11. Distribución de permeabilidades

MATERIAL	PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS	
	Porosidad (%)	Permeabilidad (m/s)
Nivel superficial del depósito salino	10^{-6}	5
Núcleo del depósito salino	10^{-8}	1
Franja de alteración	10^{-5}	20
Lutitas y areniscas rojas	10^{-11}	1
Calizas	10^{-6}	3

Tabla 7. Valores de permeabilidad y porosidad asignados a los diferentes materiales.

Red de drenaje. La red de drenaje perimetral se ha simulado utilizando el módulo transfer del programa Feflow, el cual corresponde a la condición de borde de Cauchy. El valor de potencial constante asignado a cada uno de los nodos modelizados con la condición de dren, se ha hecho corresponder con las cotas del terreno natural sobre el que se localizan los canales del sistema perimetral. El valor de la conductancia de los drenes se ha simulado con el módulo de transfer rate. El valor asignado ha sido objeto de calibración y se ha ido variando hasta alcanzar el valor de 0,005 m/d en la simulación cuyos resultados se han considerado correctos. Esta condición de dren se ha simulado únicamente sobre los nodos pertenecientes a elementos con permeabilidad de lutita.

La red de drenajes internos localizados en la base del depósito salino, sobre los antiguos cauces, se ha simulado mediante la capa 5, la cual representa el nivel de meteorización existente entre el depósito salino y el sustrato geológico. La permeabilidad consignada a esta capa facilita la circulación del agua procedente del drenaje de la masa salina, que alcanza la superficie del terreno, hacia los puntos más bajos (los cuales corresponden a los antiguos cauces). Así mismo, en el borde sureste de la malla se ha simulado un dren que representa la salida del sistema de drenes internos. La cota de drenaje asignada al dren sureste (330 m

s.n.m) corresponde a la cota del terreno en el ámbito de la balsa. El valor de conductancia asignado ha sido la misma que en los drenes perimetrales (0,005 m/d) ya que estos también se sitúan sobre elementos con condición de lutita.

Drenaje hacia los niveles permeables. La salida natural del sistema hacia los niveles calizos permeables que se localizan en la base del depósito salino, se ha simulado utilizando el módulo transfer y el módulo transfer rate. Con el primero se ha fijado la cota de drenaje, la cual se ha hecho corresponder con la cota piezométrica calculada en base a los criterios indicados en el apartado 2 de la presente comunicación, en el que se describe el medio físico y en concreto la hidrogeología de estos niveles calizos. La cota de drenaje corresponde, por tanto, al valor de la isopieza de los niveles calizos en cada uno de los nodos afectados por esta condición. Los valores asignados varían desde 387 m s.n.m en el extremo oriental y 385 m s.n.m en el extremo occidental. El valor de la conductancia, asignado mediante el modelo transfer rate se ha ido variando durante el proceso de calibración hasta alcanzar el valor de 0,25 m/d. Los nodos asignados con esta condición pertenecen a elementos con permeabilidad de caliza.

Piezometría de partida. No ha sido posible disponer de información referente a la piezometría del depósito salino al inicio del periodo estudiado. Por esta razón la piezometría inicial corresponde a la más alta con los niveles modelizados totalmente saturados. Las superficies piezométricas de partida utilizadas se han obtenido a partir del MDT del año 2004 y MDT previo. De forma que la superficie de partida asignadas a los niveles 1 y 2 corresponden a la superficie del depósito salino; las superficies piezométricas asignadas a los niveles 3 y 4 a la superficie generada para delimitar la capa superficial del núcleo impermeable del depósito salino; y la superficie piezométrica de partida asignada al nivel 5 se corresponde con el techo topográfico de este nivel y a los niveles restantes (6, 7 y 8) se les ha asignado una superficie de partida que se corresponde con el MDT previo el cual representa la superficie del terreno natural.

7 SIMULACIÓN.

Los datos del balance hídrico presentados para el año estudiado ponen de manifiesto que el sistema hidrogeológico depósito salino-sustrato geológico se encuentra en equilibrio, de modo que las salidas de agua del sistema son similares a la entrada. Las simulaciones del modelo matemático se han realizado en régimen transitorio.

La primera simulación realizada ha partido de la superficie piezométrica inicial más alta posible, esto es, con todas las capas totalmente saturadas. Se ha realizado un proceso iterativo de simulación, de forma que el resultado final de cada simulación constituía la piezometría inicial de la siguiente, hasta que el resultado obtenido en la última simulación no variase con respecto a la anterior., consiguiendo de esta forma un estado de equilibrio.

Para la calibración del modelo se han considerado principalmente los datos reflejados en el balance para el año estudiado, referentes a los drenajes recogidos en la Presa de Escorrentías del depósito salino y en menor medida los datos estimados en el balance sobre los caudales drenados hacia los niveles calizos permeables localizados en la base del depósito salino.

8 RESULTADOS OBTENIDOS.

En la tabla adjunta se incluyen los resultados obtenidos, en términos de balance, del modelo matemático del depósito salino de El Cogulló. Es importante destacar que en los datos de entrada del modelo no se han considerado las entradas por escorrentía superficial. No obstante, la discrepancia que es posible observar en los datos de entrada se debe fundamentalmente a la diferencia indicada en apartados anteriores entre la superficie considerada en los cálculos de balance (35 ha) y la superficie modelizada (34 ha).

El programa empleado, no simula el volumen de agua que queda retenida en el sal, por lo que este volumen el modelo realizado lo incluye como drenado hacia el exterior del sistema, incrementando los volúmenes drenados hacia la Presa de Escorrentía y hacia los materiales permeables infrayacentes.

Datos de balance para el año 2004. Depósito salino de El Cogulló (m³/año)	
Entradas	
Humedad de la sal	132.600
Infiltración de lluvia	179.524
Escorrentía superficial	1.685
Evaporación	-42.535
Total	271.274
Salidas	
Sistema de drenaje	152.577
Drenaje hacia los niveles permeables	107.100
Inmovilizada en la sal	13.155
Total	272.832

Datos de balance resultado del modelo. Depósito salino de El Cogulló (m³/año)	
Entradas	
Recarga	260.900
Total	260.900
Salidas	
Sistema de drenaje	155.300
Drenaje hacia los niveles permeables	123.900
Total	279.200

Tabla 8. Balance hídrico. Resultados del modelo.

En las superficies piezométricas resultantes de las simulaciones realizadas, se observa que en la capa superficial del depósito salino, la piezometría desciende desde las zonas centrales, dónde el máximo alcanzado es de 419,8 m s.n.m, hacia las zonas periféricas, dónde el mínimo piezométrico es de 336 m s.n.m. Esto supone que la zona central de la capa superficial se encuentra parcialmente saturada e incluso en algunos puntos seca. Las principales salidas de agua se observan en los bordes, en los que en

profundidad se localizan los niveles permeables de calizas y hacia el punto donde se ubica la Presa de Escorrentía. La velocidad de circulación es más elevada en los bordes que en la zona central.

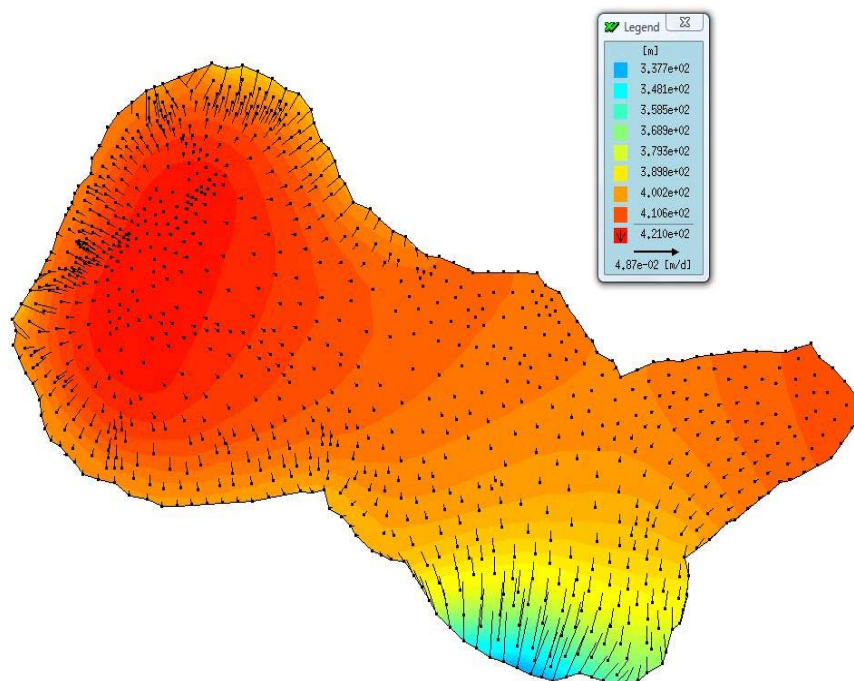


Figura 12. Piezometría obtenida del modelo de simulación para la capa 1.

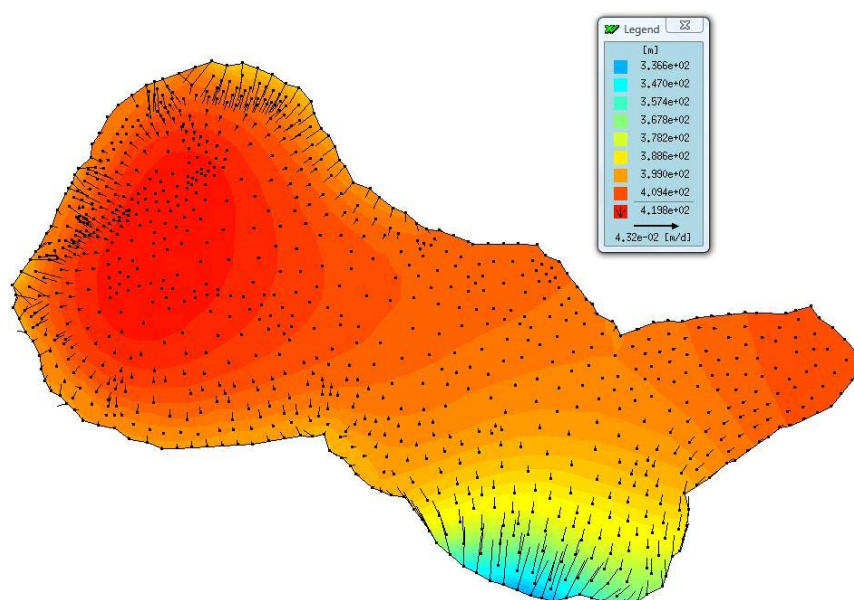


Figura 13. Piezometría obtenida en el modelo de simulación para la capa 2

La piezometría correspondiente al núcleo del depósito salino refleja en, términos generales, la piezometría de la capa superior. Los niveles piezométricos en la zona central de la capa son del orden de 419 m s.n.m, lo que implica que esta capa se encuentra parcialmente saturada. La velocidad en este nivel es más reducida que en el nivel superior. En la figura nº 5 se observa la superficie piezométrica obtenida para la capa 2 o núcleo del depósito salino. Es importante resaltar que, tal y como se indicó en apartados anteriores, los bordes de las capas 3 y 4 del modelo (correspondientes al núcleo del depósito salino), presentan propiedades iguales que las asignadas a las capas 1 y 2 (capa superficial del depósito).

9 CONCLUSIONES.

Para la Modelización del flujo en el depósito salino “El Cogulló” se ha utilizado el software Feflow versión 5.2, creado por Wasy (Institute for Water Resources Planning and Systems Research) en el cual se resuelve la ecuación fundamental del flujo mediante el método matemático de elementos finitos.

El modelo de flujo realizado, constituye la base de un modelo de doble densidad en el que se consideren las propiedades dinámicas del fluido circulante, así como los fenómenos de disolución y precipitación que tienen lugar como consecuencia de la infiltración de agua dulce procedente de la precipitación.

Para la simulación el depósito se ha dividido en 7 capas. Las dos primeras representan la parte más alta y superficial del depósito. La tercera y cuarta las zonas de taludes y del núcleo. La quinta la banda de contacto del depósito con la formación geológica infrayacente. Y la sexta y séptima el substrato geológico.

El espacio ocupado por el depósito se ha discretizado en prismas triangulares de seis nodos. En total la malla generada consta de 12.390 elementos y 7.728 nodos.

Para asignar permeabilidades a los elementos del modelo se ha partido del modelo conceptual hidrogeológico del depósito que, en síntesis, consiste en un núcleo impermeable y una franja superficial permeable. Los valores de K utilizados se corresponden con los obtenidos en los ensayos realizados por el IGME, extrapolados al modelo conceptual: En las capas 1 y 2 y en los bordes de los taludes de las capas 3 y 4, valores del orden de 10^{-6} m/s y en el núcleo del orden de 10^{-8} . En la base, capas 6 y 7, valores del orden de 10^{-6} en las calizas y 10^{-8} en las lutitas. En la capa intermedia nº 5, valores suficientes para permitir la circulación del agua.

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizados han permitido obtener resultados congruentes con los datos de partida: caudales drenados y valores de permeabilidad, así como con el modelo conceptual planteado.

Se considera que los resultados obtenidos constituyen una base en la modelización de los depósitos salinos, que se irá afinando con la adquisición de un mayor número de datos de partida. La aplicación de esta herramienta podrá ser ensayada para evaluar el funcionamiento hidrodinámico y la piezometría de depósitos salinos de similares características, en los que exista un mayor déficit de información de partida.

10 BIBLIOGRAFÍA

Assesment of the reliability of tailings dam structures by centrifuge modeling. E. De Souza, A. P. Dirige. Evironmental Issues and Management of Waste in Energy and Mineral Production. 2000

A study of evaporation from hypersaline tailings. T.A. Newson, Y. Fujiyasu, M. Fahey. Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Volume 3.

Control of sodium-rich brine inflows at Central Canada Potash. A.M.Code, E.M.de Souza. CIM Mining Technology.

Draft Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. European Commission. 2003

Engineering and envirnmental considerations in salt tailings management and disposal underground. Euler de Souza.

Environmental Magement Strategies for Salt Tailings. Euler de Souza,

Field Investigation of Evaporation from Freshwater Tailings. Yoshimasa Fujiyasa, MartinbFahey, Tim Newson. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Volume 126, nº. 6. 2000.

Measurement of evaporation from saline tailings storages. T.A. Newson, M. Fahey. Engieering Geology. Volume 70 nos. 3-4. 2003.

Programa de restauración de las instalaciones de Súra K, S.A. R.S.E. 1998.

Programa de restauración de Potasa del Llobregat. Institut Cartogràfic de Catalunya. Universitat Politècnica de Catalunya, Remote Sensing Europe, S. A. 1998

Salt backfill as a support system for soft rock mines. Euler M. De Souza. Rock Support in Mining and Undergrod Construction. 1992.

Solving tailings impoundment water balance problems with 3-D seepage software. Maritz Rykaart, Murray Fredlund, Jason Stianson.

The Alpha, Beta, Gamma of Evaporation From Saline Water Bodies. Atul M. Salhotra, E. Eric Adams d R.F. Harleman. Water Resources Research, Vol 23 no. 9, 1987.

The chemical and hydrological evolution of an ancient potash-forming evaporite dasin as constrained by mineral sequence, fluid inclusion composition, and numerical simulation. Carlos Ayora, Javier García-Veigas, Juan José Pueyo. Geochimica et Cosmochimica Acta. Vol.58, no 16. 1994

The effect of brine dissolution on the strength behaviour of evaporites. R. Lee, E. De Souza. Rock Mechaics. 1996

The Efficct of brine on the hydro-geotechnical behavior of tailings backfill, Rod S. Winsor, Euler de Souza. 97th Anual General Meeting of C.I.M. Rock Mechanics and Strata Control Session. 1995.

Unidades hidrogeológicas de la España peninsular e Islas Baleares. Informaciones y Estudios nº 52. MOPU, 1990

Water balance approach to prediction of seepage from mine tailings impoundments. Keith A. Ferguson, A.M. ASCE, Ian P.G. Hutchison, Robert L. Schiffman, M.ASCE. Seepage and Leakage from dams and impoundments. Edited by Richard L. Volpe and William E. Kelly.