

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 682 944**

51 Int. Cl.:

C22B 26/10 (2006.01)

C22B 3/46 (2006.01)

E21B 43/30 (2006.01)

E21B 43/28 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.03.2015** **E 15159022 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.05.2018** **EP 2924233**

54 Título: **Explotación minera con una solución multi-pozo de un estrato mineral de evaporita**

30 Prioridad:

14.03.2014 US 201461953378 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

24.09.2018

73 Titular/es:

**SOLVAY SA (100.0%)
Rue de Ransbeek, 310
1120 Brussels, BE**

72 Inventor/es:

**HUGHES, RONALD O.;
VENDETTI, JOSEPH A.;
REFSDAL, LARRY C.;
CUCHE, HERVÉ;
PAPERINI, MATTEO;
DETOURNAY, JEAN-PAUL;
HANSEN, DAVID M.;
BRICHACEK, TODD;
PATTERSON, JUSTIN;
KOLE SAR, JOHN;
SCHMIDT, RYAN y
ORTEGO, BEATRICE**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 682 944 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Explotación minera con una solución multi-pozo de un estrato mineral de evaporita

5 Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

La presente solicitud reivindica el beneficio de prioridad para la Solicitud provisional de Estados Unidos n.º 61/953378 presentada el 14 de marzo de 2014, cuyo contenido completo se incorpora en el presente documento como referencia para todos los fines.

10

Declaración respecto a la investigación o el desarrollo patrocinado a nivel federal

No aplicable.

15 Campo técnico de la invención

La presente invención se refiere a un método para la explotación continua de una cavidad mineral proporcionada en un estrato mineral de evaporita subterránea a través de la minería con una solución de multi-pozo.

20 Antecedentes de la invención

El carbonato de sodio (Na_2CO_3), o ceniza de sosa, es uno de los productos alcalinos de mayor volumen en todo el mundo preparados con una producción total en 2008 de 48 millones de toneladas. El carbonato de sodio encuentra un uso principal en el vidrio, productos químicos, detergentes, industrias del papel, y también en la industria de producción de bicarbonato de sodio. Los principales procesos para la producción de carbonato de sodio son el proceso de síntesis de amoníaco Solvay, el proceso de cloruro de amonio y los procesos basados en trona.

25

La ceniza de sosa a base de trona se obtiene de yacimientos de trona en los Estados Unidos (Sudoeste de Wyoming en Green River, California cerca de Searles Lake y Owens Lake), Turquía, China y Kenia (en el lago Magadi) mediante técnicas de minería mecánica subterránea, por minería con una solución, o procesamiento de aguas del lago.

30

La trona cruda es un mineral que puede contener hasta un 99 % de sesquicarbonato de sodio (generalmente alrededor del 70-99 %). El sesquicarbonato de sodio es una sal doble de carbonato de sodio-bicarbonato de sodio que tiene la fórmula ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y que contiene el 46,90 % en peso de Na_2CO_3 , el 37,17 % en peso de NaHCO_3 , y el 15,93 % en peso de H_2O . La trona cruda también contiene, en cantidades menores, cloruro de sodio (NaCl), materia orgánica de sulfato de sodio (Na_2SO_4) e insolubles como arcilla y lutitas. En la TABLA 1 se muestra un análisis típico del mineral de trona extraído en Green River.

35

Se conocen otros minerales de (bi)carbonato de origen natural a partir de los cuales se puede producir carbonato de sodio y/o bicarbonato de sodio tales como la nahcolita, un mineral que contiene principalmente bicarbonato de sodio y está esencialmente libre de carbonato de sodio y el conocido como "wegscheiderita" (también denominado "decemita") de fórmula: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3 \text{NaHCO}_3$.

40

TABLA 1

Constituyente	Porcentaje de peso
Na_2CO_3	43,2-45
NaHCO_3	33,7-36
H_2O (humedad cristalina y libre)	15,3-15,6
NaCl	0,004-0,1
Na_2SO_4	0,005-0,01
Insolubles	3,6-7,3

45

En los Estados Unidos, la trona y la nahcolita son la principal fuente de minerales para la industria del bicarbonato de sodio. Mientras que el bicarbonato de sodio puede producirse mediante la disolución en agua y la carbonatación de mineral de trona extraído mecánicamente o de ceniza de sosa producida a partir de mineral de trona, también se puede producir bicarbonato de sodio mediante la extracción en solución de nahcolita. La producción de bicarbonato de sodio normalmente incluye cristalización por enfriamiento o una combinación de cristalización por enfriamiento y evaporación.

50

Los grandes yacimientos de trona mineral en la cuenca del río Green, en el sudoeste de Wyoming, se han explotado mecánicamente desde finales de la década de 1940 y han sido explotados por cinco operaciones mineras diferentes durante el período entre medias. En 2007, el carbonato de sodio a base de trona de Wyoming comprendía aproximadamente el 90 % de la producción total de ceniza de sosa de los Estados Unidos. Para recuperar valiosos productos alcalinos, con frecuencia se usa el denominado proceso comercial 'monohidrato' para producir ceniza de sosa a partir de la trona. Cuando la trona se extrae mecánicamente, el mineral de trona triturado se calcina (es decir,

55

se calienta) para convertir el bicarbonato de sodio en carbonato de sodio, eliminar el agua de cristalización y formar ceniza de sosa cruda. La ceniza de sosa cruda se disuelve entonces en agua y el material insoluble se separa de la solución resultante. Una solución clara de carbonato de sodio se alimenta a un cristizador monohidrato, por ejemplo, un sistema evaporador de alta temperatura que generalmente tiene uno o más efectos (a veces denominado 'evaporador-cristalizador'), donde parte del agua se evapora y parte del carbonato de sodio se conforma en cristales de monohidrato de carbonato de sodio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Los cristales de monohidrato de carbonato de sodio se eliminan del licor madre y a continuación se secan para convertir los cristales en ceniza de sosa densa. La mayoría del licor madre se recicla al sistema del evaporador para su procesamiento adicional en cristales de monohidrato de carbonato de sodio.

Los yacimientos de trona de Wyoming son evaporitas y, por lo tanto, forman varias capas (o lechos) sustancialmente horizontales. Los yacimientos principales constan de 25 lechos casi horizontales que varían de 1,2 m (4 pies) a aproximadamente 11 m (36 pies) de espesor y están separados por capas de pizarras. Las profundidades oscilan desde 120 m (400 pies) hasta 1000 m (3300 pies). Estos yacimientos contienen de aproximadamente el 88 % al 95 % de sesquicarbonato, siendo las impurezas principalmente pizarras y shortitas de dolomita y calcita. Algunas regiones de la cuenca contienen impurezas solubles, sobre todo halita (NaCl). Estos se extienden por alrededor de 1000 millas cuadradas (aproximadamente 2600 km^2), y se estima que contienen más de 75.000 millones de toneladas de ceniza de sosa equivalente, proporcionando así reservas adecuadas para necesidades futuras razonablemente previsibles.

En particular, un lecho principal de trona (n.º 17) en la cuenca del río Green, con un espesor promedio de aproximadamente 2,4 m (8 pies) a aproximadamente 3,3 m (11 pies) se encuentra aproximadamente de unos 365 m (1200 pies) aproximadamente a unos 488 m (1600 pies) bajo la superficie del suelo. En la actualidad, la trona de los yacimientos de Wyoming se recupera económicamente principalmente del lecho principal de trona n.º 17. Este lecho principal se encuentra debajo de capas sustancialmente horizontales de areniscas, limolitas y principalmente pizarras no consolidadas. En particular, a unos 122 m (400 pies) por encima del lecho principal de la trona se encuentran capas de lutitas verde grisáceas débilmente laminadas y pizarra bituminosa, intercaladas con bandas de trona de aproximadamente 1,2 m (aproximadamente 4 pies) a aproximadamente 1,5 m (5 pies) de espesor. Inmediatamente debajo del lecho principal de trona se encuentran capas sustancialmente horizontales de pizarra bituminosa algo plástica, también intercaladas con bandas de trona. Tanto las capas de pizarra superpuestas como subyacentes contienen gas metano.

Las resistencias a la tracción comparativas, en libras por pulgada cuadrada (psi) o kilopascales (kPa), de trona y pizarra en valores promedio son esencialmente las siguientes:

Pizarra:	482-965 kPa (70 a 140 psi)
Trona:	200-3861 kPa (290 a 560 psi)

Tanto la capa de pizarra inmediatamente superpuesta como la capa de pizarra inmediatamente subyacente son sustancialmente más débiles que el lecho principal de trona. La recuperación del lecho principal de trona, en consecuencia, consiste esencialmente en eliminar la única capa fuerte de sus inmediaciones.

La mayoría de las operaciones mineras mecánicas para extraer mineral de trona practican alguna forma de extracción de mineral subterránea utilizando técnicas adaptadas de las industrias mineras del carbón y la potasa. Existe una variedad de diferentes sistemas y técnicas de minería mecánica (como la minería de paredes largas, la minería de paredes cortas, la minería de sala y pilar o varias combinaciones). Aunque cualquiera de estas diversas técnicas mineras puede emplearse para extraer mineral de trona, cuando se utiliza una técnica de minería mecánica, hoy día es preferible la minería de paredes largas.

Todas las técnicas de minería mecánica requieren que los mineros y la maquinaria pesada estén bajo tierra para excavar y transportar el mineral a la superficie, incluidos los pozos hundidos de aproximadamente 800-2000 pies (aproximadamente 240-610 metros) de profundidad. El coste de los métodos de minería mecánica para la trona es alto, representando hasta el 40 por ciento de los costes de producción de la ceniza de sosa. Además, la recuperación de trona por estos métodos se vuelve más difícil ya que los lechos más gruesos (reservas más accesibles) de los yacimientos de trona de alta calidad (menos contaminantes) se explotaron primero y ahora se están agotando. Por lo tanto, la producción de carbonato de sodio mediante la combinación de técnicas de minería mecánica seguida por el proceso de monohidrato es cada vez más cara, ya que los yacimientos de trona de mayor calidad se agotan y aumentan los costes de mano de obra y energía. Además, el desarrollo de nuevas reservas es costoso y requiere una inversión de capital de hasta cientos de millones de dólares para hundir nuevos pozos mineros e instalar equipos de minería y seguridad (ventilación) relacionados.

Además, debido a que también se elimina algo de pizarra durante la extracción mecánica, esta lutita extraída debe transportarse junto con el mineral de trona a la refinera de superficie, retirarse de la corriente de producto y transportarse nuevamente a la mina o a un estanque de desechos de superficie. Estos contaminantes insolubles no solo cuestan una gran cantidad de dinero para extraer, retirar y manipular, sino que le dan muy poco valor a la mina y al operador de la refinera. Además, la trona cruda normalmente se purifica para eliminar o reducir las impurezas,

principalmente pizarra y otros materiales no solubles, antes de que su valioso contenido de sodio se pueda vender comercialmente como: ceniza de sosa (Na_2CO_3), bicarbonato de sodio (NaHCO_3), sosa cáustica (NaOH), sesquicarbonato de sodio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), un fosfato de sodio ($\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$) u otros productos químicos que contienen sodio.

5 Reconociendo las limitaciones económicas y físicas de las técnicas de minería mecánica subterránea, la extracción en solución de la trona ha sido promocionada durante mucho tiempo como una alternativa atractiva con la primera Patente de Estados Unidos n.º 2.388.009 titulada "Solution Mining of Trona" expedida a Pike en 1945. Pike desvela un método de producción de ceniza de sosa de yacimientos subterráneos de trona en Wyoming inyectando una salmuera calentada que contiene sustancialmente más carbonato que bicarbonato que está insaturado con respecto a la trona, retirando la solución de la formación, eliminando la materia orgánica de la solución con un adsorbente, separando la solución del adsorbente, cristalizando y recuperando sesquicarbonato de sodio de la solución, calcinando el sesquicarbonato para producir ceniza de sosa y reinyectando el licor madre del paso de cristalización en la formación.

15 En su forma más simple, la extracción en solución de trona se lleva a cabo poniendo en contacto el mineral de trona con un solvente como agua o una solución acuosa para disolver el mineral y formar un licor (también denominado 'salmuera') que contiene valores de sodio disueltos. Para el contacto, el agua o la solución acuosa se inyecta en una cavidad de la formación subterránea, para permitir que la solución disuelva la mayor cantidad posible de mineral de trona soluble en agua, y a continuación la salmuera resultante se extrae a la superficie. Una parte de la salmuera puede usarse como materia prima para uno o más procesos para fabricar uno o más productos a base de sodio, mientras que otra porción de salmuera puede reinyectarse para un contacto adicional con la trona.

25 La extracción en solución de trona podría reducir o eliminar los costes de la minería subterránea, como hundir los costosos pozos mineros y emplear mineros, elevar, triturar, calcinar, disolver, clarificar, manejar sólidos/líquidos/vapores y el cumplimiento medioambiental. Las numerosas minas de solución salina (NaCl) que operan en todo el mundo ejemplifican el potencial bajo coste e impacto ambiental de la extracción en solución. Pero minerales que contienen carbonato de sodio y bicarbonato de sodio (trona, wegscheiderita) tienen relativamente baja solubilidad en agua a temperatura ambiente en comparación con otros minerales evaporíticos, como la halita (principalmente cloruro sódico) y la silvita (principalmente cloruro de potasio), que son extraídos "in situ" con técnicas de extracción en solución.

35 Implementar una técnica de extracción en solución para explotar minerales que contienen (bi)carbonato como mineral de trona, especialmente aquellos minerales cuyos lechos delgados, lechos de menor calidad de trona (por ejemplo, menos del 70 % de calidad) y/o lechos profundos de profundidades superiores a 610 m (2000 pies) que actualmente no son económicamente viables a través de técnicas de minería mecánica, ha demostrado ser un gran desafío.

40 En 1945, Pike propuso el uso de un único pozo que comprende una tubería de recubrimiento exterior y una tubería de recubrimiento interna. Se inyecta solvente caliente a través de la tubería de recubrimiento interna para que entre en contacto con el lecho de trona, y la salmuera se retira a través del anillo. Sin embargo, este método resultó infructuoso, y actualmente se están llevando a cabo dos enfoques para la extracción en solución de trona.

45 Un enfoque híbrido para la extracción en solución de trona que se utiliza en el mercado en la actualidad es parte de un proyecto de eliminación de relaves subterráneos. Los operadores de minas inundan los trabajos anteriores, disolviendo los pilares y recuperando el valor de sodio disuelto. La extracción en solución de los pilares de la mina se desveló en la Patente de Estados Unidos n.º 2.625.384 expedida a Pike et al. en 1953 titulada "Mining Operation"; utiliza agua como solvente a temperatura ambiente para extraer la trona de las secciones minadas existentes de los yacimientos de trona. Solvay Chemicals, Inc. (SCI), conocida entonces como Tenneco Minerals, fue la primera en comenzar a depositar escorias, desde el proceso de refinación hasta estos huecos extraídos mecánicamente durante la operación de extracción parcial normal. Este enfoque híbrido aprovecha los huecos remanentes y las áreas superficiales expuestas posteriormente de la trona dejada por la minería mecánica para depositar materiales insolubles y otros contaminantes (colectivamente denominados relaves o escorias) y para recuperar el valor de sodio de las soluciones acuosas utilizadas para transportar las escorias.

55 Aunque la extracción en solución 'híbrida' es uno de los métodos de minería preferidos en términos de seguridad y productividad, este método depende necesariamente del área de superficie y de las aberturas proporcionadas por la minería mecánica para que sean económicamente factibles y productivas, y hay una cantidad de trona finita que previamente se ha extraído mecánicamente. La extracción en solución 'híbrida' no puede existir en su forma actual sin la necesidad de una minería mecánica previa en un modo de producción parcial. Cuando los lechos actuales de trona se explotan mecánicamente por completo, los operadores de la mina se verán forzados a moverse hacia lechos más delgados y/o hacia lechos de menor calidad y soportar condiciones mineras más rigurosas mientras los lechos más deseables se consumen y finalmente se agotan.

65 Un enfoque más sostenible para la extracción en solución de trona permitiría la extracción de lechos menos deseables (lechos delgados, lechos de mala calidad y/o lechos más profundos) que actualmente son menos viables

económicamente, sin el impacto negativo del aumento de los peligros de la minería y el aumento de los costes. En dicho enfoque, se perforan dos o más pozos en la plataforma de la trona, y la comunicación fluida entre los pozos se establece por fracturación hidráulica o perforación direccional.

5 Los intentos de la extracción en solución de trona utilizando pozos verticales comenzaron poco después del descubrimiento de la trona en la cuenca del río Green en Wyoming en 1940. La Patente de Estados Unidos n.º 3.050.290 titulada "Method of Recovery Sodium Values by Solution Mining of Trona" de Caldwell et al. desvela un proceso para la extracción en solución de trona que sugiere el uso de una solución minera a una temperatura del orden de 100-200 °C. Este proceso requiere el uso de recirculación de una parte sustancial de la solución de minería
10 extraída de la formación de vuelta a la formación para mantener las altas temperaturas de la solución. Una corriente de purga de la solución de extracción de recirculación se lleva a un proceso de recuperación durante cada ciclo y se reemplaza por agua o licor madre diluido. La Patente de Estados Unidos n.º 3.119.655 titulada "Evaporative Process for Producing Soda Ash from Trona" de Frint et al. desvela un proceso para la recuperación de ceniza de sosa de la trona y reconoce que la trona puede recuperarse mediante la extracción en solución. Este proceso incluye la
15 introducción de agua calentada a aproximadamente 130 °C y la recuperación de una solución de la formación subterránea a 90 °C.

La perforación direccional desde la superficie del suelo se ha utilizado para conectar pozos duales para la extracción en solución de yacimientos de evaporita y para la producción de bicarbonato de sodio, potasa y sal. La extracción en
20 solución de nahcolita utiliza pozos perforados direccionalmente y una solución acuosa caliente compuesta de ceniza de sosa disuelta, bicarbonato de sodio y sal. El desarrollo de cavidades de extracción en solución de nahcolita mediante el uso de agujeros horizontales perforados direccionalmente y pozos verticales se describe en la Patente de Estados Unidos n.º 4.815.790, expedida en 1989 a E. C. Rosar y R. Day, titulada "Nahcolite Solution Mining Process". El uso de la perforación direccional para la extracción en solución de trona se describe en la Publicación
25 previa a la concesión de la solicitud de Patente de Estados Unidos n.º US2003/0029617 titulada "Application, Method and System For Single Well Solution Mining" de N. Brown y K. Nesselrode. Pueden usarse un par de pozos por cavidad para la inyección y producción. Se describe una pluralidad de perforaciones laterales en diversas configuraciones tales como las descritas en la Patente de Estados Unidos n.º 8.057.765, publicada en noviembre de 2011 de Day et al., titulada "Methods for Constructing Underground Borehole Configurations and Related Solution
30 Mining Methods" para mejorar la expansión lateral de una cavidad minada en solución en el yacimiento de evaporita.

La patente US2919909 desvela una formación subterránea que comprende un estrato mineral evaporítico que comprende trona (columna 1, línea 35-43), nahcolita, wegscheiderita, o combinaciones de las mismas, un método para la extracción en solución (columna 1, línea 48-50) de un mineral evaporítico desde al menos una cavidad (Fig. 1,12) que tiene una cara libre de minerales, dicho método que comprende los pasos a) a c) de la presente invención, pero que no dice nada para desvelar los pasos d) (cambiando el modo de operación de al menos un pozo del conjunto después de un período de tiempo adecuado); y que no dice nada del paso (e) (repetir los pasos (a) a (d)).

La patente US5246273 desvela un proceso de extracción en solución de trona que comprende los pasos de socavación de un lecho o yacimiento masivo mediante un chorro de aire con una solución acuosa seguida de extracción en solución del mineral por encima del socavado con supervisión y control para detener la extracción en solución cuando la roca del techo está adecuadamente expuesta para mantener un techo estable y soporte de pilar estable (resumen), y que desvela cambiar periódicamente el modo de introducción y producción con 2 pozos (columna 14, líneas 65-67). También describe el uso de un tercer pozo vertical de cavidad media 78 en el punto medio del eje longitudinal de la cavidad (ver Col. 15, líneas 6-11, Fig. 15.a, 15.b).

A fines de la década de 1950 y comienzos de la de 1960, la fracturación hidráulica de la trona se propuso, reivindicó o describió en patentes como medio para conectar dos pozos situados en un lecho de trona. Ver por ejemplo, Patente de Estados Unidos n.º 2.847.202 (1958) de Pullen, titulada "Methods for Mining Salt Using Two Wells Connected by Fluid Fracturing"; Patente de Estados Unidos n.º 2.952.449 (1960) por Bays, titulada "Method of Forming Underground Communication Between Boreholes"; Patente de Estados Unidos n.º 2.919.909 (1960) de Rule titulada "controlled Caving For Solution Mining Methods"; Patente de Estados Unidos n.º 3.018.095 (1962) por Redlinger et al., titulada "Method of Hydraulic Fracturing in Underground Formations"; y la patente GB 897566 (1962) por Bays titulada "Improvements in or relating to the Hydraulic Mining of Underground Minerals Deposits".

55 En la década de 1980, un intento de mina de solución de trona en pozo por parte de FMC Corporation implicó la conexión multi-pozos verticales perforados convencionalmente a lo largo de la base de un lecho de trona preferido mediante el uso de fracturación hidráulica. FMC publicó un informe (Frint, Engineering & Mining Journal, septiembre de 1985, "FMC's Newest Goal: Commercial Solution Mining Of Trona" que incluye "Past attempts and failure") promoviendo la conexión de pozos de fractura hidráulica de pares de pozos como nuevo desarrollo que comercializaría la extracción en solución de trona. Sin embargo, según el artículo de FMC de 1985, la aplicación de fracturación hidráulica para la extracción en solución de la trona no era fiable. Los intentos de comunicación por fractura fallaron en algunos casos y en otros casos produjeron la comunicación entre los pozos perforados previamente pero no de la manera deseada. El proyecto de comunicación por fractura fue abandonado finalmente a
60 principios de la década de 1990.
65

Estos intentos de extracción en solución in situ de trona virgen en Wyoming se encontraron con un éxito menos que limitado, y las tecnologías que utilizan fracturación hidráulica para conectar pozos en un lecho de trona no pudieron madurar.

5 Sin embargo, en el campo de la perforación y operación de petróleo y gas, la fracturación hidráulica es una operación fundamental, y se estima que más del 60 % de los nuevos pozos en 2011 utilizaron fracturación hidráulica para extraer gas de pizarra. Dicha fracturación hidráulica a menudo emplea la perforación direccional con sección horizontal dentro de una formación de pizarras con el fin de abrir la formación e incrementar el flujo de gas desde allí a un único pozo particular usando eventos de multi-fracking desde un pozo horizontal en la formación.

10 Mediante esta técnica, se ha establecido que las fracturas producidas en formaciones deben ser aproximadamente perpendiculares al eje de menor tensión y que, en el estado general de tensión subterránea, las tres principales tensiones son desiguales (condiciones anisotrópicas). Cuando la tensión principal en la formación es la tensión de la sobrecarga, estas fracturas tienden a desarrollarse en una dirección cónica vertical o invertida. Las fracturas horizontales no pueden ser producidas por presiones hidráulicas menores que la presión total de la sobrecarga.

15 Al fracturar pozos separados en formaciones minerales evaporíticas con el fin de eliminar el mineral por una solución que fluye entre los pozos adyacentes, los métodos de 'fracking' utilizados en la industria del petróleo y gas no son adecuados para conseguir la formación de una única fractura horizontal principal. Debido a que la profundidad de la formación fracturada hidráulicamente generalmente es superior a 1000 metros (3280 pies), las presiones de inyección en la exploración de petróleo y gas son altas, a pesar de que todavía son menores que la presión de sobrecarga; esto favorece la formación de fracturas verticales que aumenta la permeabilidad de la formación de pizarras explotadas. El objetivo principal de los métodos de "fracking" en la industria del petróleo y el gas es, de hecho, aumentar la permeabilidad de la pizarra. El gradiente de sobrecarga generalmente se estima entre 17 kPa/m (0,75 psi/pie) y 23,8 kPa/m (1,05 psi/pie), por lo que lo que se denomina 'gradiente de fractura' utilizado en el fracking de petróleo y gas es menor que el gradiente de sobrecarga, preferiblemente inferior a 22,6 kPa/m (1 psi/pie), preferiblemente inferior a 21,5 kPa/m (0,95 psi/pie), a veces inferior a 20,4 kPa/m (0,9 psi/pie). El 'gradiente de fractura' es un factor utilizado para determinar la presión de fracturación de la formación en función de la profundidad del pozo en unidades de kPa/m (psi/pie). Por ejemplo, un gradiente de fractura de 15,8 kPa/m (0,7 psi/pie) en un pozo con una profundidad vertical de 2440 m (8000 ft) proporcionaría una presión de fractura de 38,6 MPa (5600 psi).

20 A diferencia de la exploración de petróleo y gas en formaciones de pizarras donde es deseable producir numerosas fracturas verticales cerca del centro de la formación de pizarras para recuperar la mayor cantidad de petróleo y/o gas de las mismas, en la recuperación de un mineral soluble de formaciones de evaporitas subterráneas, es deseable producir una única fractura sustancialmente en el fondo del estrato mineral evaporítico y a lo largo de la parte superior del estrato subyacente no evaporítico insoluble en agua y dirigir la fractura al siguiente pozo adyacente a lo largo de la interfaz entre el fondo del estrato evaporítico a eliminar y la parte superior del estrato subyacente para que el mineral soluble se disuelva de abajo hacia arriba.

25 El enfoque de abajo arriba para disolver el mineral del intersticio de la interfaz (fractura) creada sustancialmente en la parte inferior del estrato de evaporita ofrece una serie de ventajas. El solvente menos concentrado y menos saturado presente en el intersticio se eleva a una capa superior del cuerpo del solvente dentro del intersticio debido al gradiente de densidad, y entra en contacto con el techo de la cavidad del estrato evaporítico, disuelve el mineral del mismo y a medida que el solvente se satura, se deposita en una capa inferior del cuerpo del solvente de modo que el borde inferior del estrato de evaporita esté siempre expuesto a la disolución por un solvente menos concentrado. Los materiales insolubles en la formación de evaporita pueden depositarse a través del cuerpo del solvente en el fondo de la cavidad de extracción en solución y depositarse sobre el mismo de forma que solo se recuperen soluciones claras de los pozos de producción.

30 Otra ventaja del enfoque de abajo arriba para la extracción de mineral en solución de una cavidad mineral madura es que puede ayudar a minimizar el contacto del solvente con minerales ricos en contaminantes (por ejemplo, halita) que se pueden encontrar en estratos suprayacentes, como estratos de pizarra verde encontrados encima de un estrato de trona. Como estos minerales ricos en contaminantes generalmente son solubles en el mismo solvente que el mineral deseable, si se permite que el flujo del solvente llegue a las capas suprayacentes contaminadas, esto permitiría que los contaminantes de estas capas superpuestas se disuelvan en el solvente, "envenenando" así la salmuera resultante e inutilizándola o, al menos, haciendo que su posterior procesamiento en productos valiosos sea muy costoso. De hecho, el envenenamiento por cloruro de sodio a partir de minerales a base de cloruro puede ocurrir durante la extracción en solución de la trona, y se sospecha que los esfuerzos de extracción en solución de FMC en la década de 1980 en la cuenca del río Green se suspendieron en la década de 1990 debido a la alta contaminación con NaCl en la salmuera extraída.

35 Además del envenenamiento por cloruro, otro factor que complica la disolución in situ de minerales subterráneos de sales dobles como mineral que contiene sesquicarbonato de sodio (componente principal de la trona) o wegscheiderita es que el carbonato de sodio y el bicarbonato de sodio tienen diferentes solubilidades y tasas de disolución en agua. Estas solubilidades incongruentes del carbonato de sodio y el bicarbonato de sodio pueden

causar el "cegamiento" del bicarbonato de sodio (también denominado "cegamiento de bicarbonato") durante la extracción en solución. El cegamiento ocurre cuando el bicarbonato, que se ha disuelto en la solución minera, tiende a depositarse de nuevo en la superficie expuesta del mineral a medida que aumenta la saturación de carbonato en la solución, obstruyendo así la cara de disolución y "cegando" sus valores de carbonato de una mayor disolución y recuperación. El cegamiento, por tanto, puede retardar la disolución y puede producir que se dejen cantidades importantes de reservas en la mina. Se puede demostrar que el problema mencionado anteriormente surge porque cuando la trona, por ejemplo, se disuelve en agua, tanto las fracciones de bicarbonato de sodio como de carbonato de sodio comienzan a entrar en solución al mismo tiempo hasta que la solución alcanza la saturación con respecto al bicarbonato de sodio. Desafortunadamente, la fase líquida resultante que existe en este punto está en equilibrio con el bicarbonato de sodio en fase sólida, y el carbonato de sodio continúa disolviéndose mientras el bicarbonato comienza a precipitar hasta que la solución resultante final está en equilibrio con el sesquicarbonato de sodio (trona) como fase sólida estable; de hecho, se alcanza una fase sólida estable en la que una porción sustancial del bicarbonato sódico precipita la solución y se disuelve mucho más del carbonato sódico. La wegscheiderita se comporta de la misma manera que la trona ya que ambas entran en la solución de acuerdo con sus respectivas composiciones de porcentaje sólido de bicarbonato de sodio y carbonato de sodio. Se espera que el bicarbonato de sodio depositado prevalezca con mayor probabilidad alrededor de un extremo del fondo de un pozo de producción durante la fase de disolución (a), cuando el contenido de bicarbonato de sodio en la salmuera que rodea el pozo puede estar saturado o súper-saturado bajo las condiciones de disolución en esta área de la cavidad.

Además, puede ocurrir un fenómeno denominado "canalización" en un lecho de mineral durante la extracción en solución. Un evento de "canalización" describe la tendencia del solvente a encontrar y mantener un camino a través de un área de insolubles de mineral (por ejemplo, insolubles de trona). Una vez que se crea un canal, puede dar lugar a velocidades de disolución bajas o cercanas a cero del mineral circundante, ya que el solvente evita el mineral que contiene soluto y no expone el soluto mineral al solvente. Sin embargo, se espera que este fenómeno no se produzca o se interrumpa cuando la trayectoria de flujo del solvente se modifica periódicamente.

Algunos de los problemas de las técnicas de extracción en solución de la técnica anterior, por ejemplo la formación de agujeros de "campana" que generalmente son estrechos en la base y se abomban hacia fuera en la parte superior en un perfil de suelo de sección transversal generalmente convexo hacia arriba. Se han intentado una variedad de técnicas para evitar la formación de dichos tipos de agujeros, ya que son muy antieconómicos y puesto que dan como resultado un bajo porcentaje de recuperación mineral del lecho. Una de estas técnicas implica el uso de un fluido de manto por encima del nivel del solvente en la cavidad para conseguir una cavidad minada en solución más o menos cilíndrica. El contacto entre el solvente y el techo del mineral se evita por el fluido de manto que es menos denso que el solvente (tal como un líquido más ligero que el agua, por ejemplo, diésel o gas licuado de petróleo, o un gas, por ejemplo, aire presurizado, nitrógeno). Este fluido de manto fuerza el contacto del solvente con las paredes de la cavidad, controlando así la expansión de la cavidad en dirección horizontal. Pero debido a que el fluido del manto evita el contacto del solvente con una gran área superficial de mineral en el techo de la cavidad mineral, se puede reducir en gran medida la velocidad de disolución.

En base a lo anterior, aún existe la necesidad de un método de extracción en solución que aborde al menos uno o más de los problemas proporcionados anteriormente.

Sumario de la invención

Los solicitantes han desarrollado, en un primer aspecto, en una formación subterránea que comprende un estrato mineral evaporítico, un método para la extracción en solución de dicha mena de mineral evaporítica que contiene trona, nahcolita, wegecheiderita o combinaciones de las mismas de al menos una cavidad que tiene una cara libre de minerales. Este método comprende:

- a) proporcionar un conjunto de pozos en comunicación fluida con al menos una cavidad, dicho conjunto que comprende un primer subconjunto de pozos operados en modo de inyección y un segundo subconjunto de pozos separados operados en modo de producción;
- b) inyectar un solvente en la al menos una cavidad a través del primer subconjunto operado en modo de inyección para que el solvente contacte con la cara libre de minerales a medida que el solvente fluye a través de al menos una cavidad y disolver in situ al menos una parte del mineral desde la cara libre en el solvente para formar una salmuera;
- c) extraer al menos una porción de dicha salmuera a la superficie del suelo a través del segundo subconjunto de pozos operados en modo de producción;
- d) cambiar el modo de operación de al menos un pozo del conjunto después de un período de tiempo adecuado;
- y
- (e) repetir los pasos (a) a (d).

La al menos una cavidad puede formarse inicialmente a partir de al menos una sección no cubierta, preferiblemente de al menos una sección horizontal no cubierta, de al menos un pozo taladrado direccionalmente a través del estrato mineral. Alternativa o adicionalmente, la al menos una cavidad puede estar formada inicialmente por un desplazamiento litológico del estrato mineral. Dicho desplazamiento litológico se realiza cuando dicho estrato mineral

está situado inmediatamente encima de un estrato insoluble en agua de una composición diferente con una interfaz de separación débil que se define entre los dos estratos y por encima de la cual se define una sobrecarga hasta el suelo, dicho desplazamiento litológico que comprende la inyección de un fluido en la interfaz de separación para levantar el estrato evaporítico a una presión hidráulica de elevación superior a la presión de sobrecarga, formando así un intersticio de la interfaz que es una cavidad mineral naciente en la interfaz y que crea dicha superficie libre de mineral.

La al menos una cavidad se agranda mediante la disolución del mineral de las paredes de la cavidad (por ejemplo, la sección del pozo no cubierto de un intersticio de la interfaz de un pozo perforado direccionalmente) en un solvente inyectado en la cavidad.

De acuerdo con algunas realizaciones de la presente invención, el conjunto de pozos comprende un número 'n' de pozos con n igual o superior a 4, y un número de pozos inferior a 'n' que están dispuestos en uno o más patrones centrados alrededor uno o más pozos centrales. Preferiblemente, un número (n-1) de pozos periféricos está dispuesto en uno o más patrones centrados alrededor de un pozo central. En algunas realizaciones, puede haber un número de pozos periféricos n/2 o (n-1)/2 dispuestos en un patrón centrado alrededor de n/2 o (n-1)/2 pozos centrales, respectivamente.

El patrón centrado alrededor de al menos un pozo central puede ser al menos un polígono con de 3 hasta 16 lados, una forma de panal, al menos una forma ovoide, o una pluralidad de los mismos; preferiblemente un círculo, un óvalo, un polígono con 4 a 6 lados, o una pluralidad de los mismos.

Los pozos en el conjunto pueden estar emparejados, y en la que se proporcionan y se controlan válvulas de cruce de modo que los dos pozos sirvan alternativamente como pozos de inyección y producción.

El conjunto de pozos puede comprender de 4 a 100 pozos o incluso más.

Cuando uno de los pozos cambia al modo de operación en el paso (d), la inyección de solvente y la producción de salmuera para este pozo se pueden llevar a cabo con la misma bomba, preferiblemente con la misma bomba de superficie.

El conjunto de pozos puede comprender pozos más exteriores, estos pozos preferiblemente que rodean los pozos más internos que incluyen uno o más pozos centrados. En dichas realizaciones, el cambio del modo de operación en el paso (d) para algunos o todos estos pozos más externos se puede hacer con más frecuencia que para los pozos más internos. En realizaciones preferidas, el cambio del modo de operación en el paso (d) para los pozos más exteriores en el conjunto se lleva a cabo preferiblemente dos veces más a menudo, más preferiblemente tres veces más a menudo, que para los pozos más internos.

El paso (d) comprende conmutar el modo de operación de al menos un pozo del primer subconjunto y también cambiar el modo de operación de al menos un pozo del segundo subconjunto después del período de tiempo adecuado.

El paso (d) comprende conmutar el modo de operación de dos o más pozos desde el primer subconjunto desde la inyección a la producción y también cambiar el modo de operación de dos o más pozos del segundo subconjunto de producción a inyección después del período de tiempo dado. En algunas realizaciones, la conmutación del modo de operación en el paso (d) se realiza en pozos periféricos del conjunto para impartir un movimiento giratorio de solvente alrededor de un pozo centrado del conjunto.

Como con cualquiera de las realizaciones descritas en este documento, el período de tiempo para el paso de conmutación (d) puede establecerse basándose en un cronograma de tiempo predeterminado. Este cambio regular de pozo tiene la ventaja de ser predecible. Como tal, la mano de obra puede mantenerse a un mínimo, ya que el paso de conmutación (d) se puede llevar a cabo por un controlador automático que está conectado a la válvula o válvulas de flujo en cada pozo, controlando así el flujo, el flujo de salida, o deteniendo el flujo para cada pozo. Para el control automático, el operador de la mina puede establecer la secuencia de conmutación entre los pozos en intervalos de tiempo regulares. El tiempo para el cambio de pozos puede seleccionarse para que ocurra durante las horas de trabajo regulares del operador a fin de supervisar el cambio de control automático en caso de que haya un mal funcionamiento o un fallo de la válvula durante el paso de conmutación (d).

En realizaciones alternativas, el período de tiempo para el paso de conmutación (d) puede establecerse basándose en restricciones específicas determinadas a partir de la salida de producción y los requisitos específicos. Por ejemplo, el cambio de pozo en el paso (d) puede tener lugar en respuesta a la medición de los parámetros seleccionados que el operador de la mina identifica como indicadores clave del rendimiento de extracción en solución del mineral. El indicador o indicadores clave para el rendimiento de extracción en solución del mineral puede ser al menos un parámetro, preferiblemente más de uno, seleccionado del grupo que consiste en la temperatura de salmuera, el pH de salmuera, la tasa de salida de salmuera de cada pozo operado en modo de producción, el contenido de insolubles, la concentración de salmuera de la mena de mineral deseada, el contenido

en impurezas solubles en solventes, y cualquier combinación de los mismos. Ejemplos de dichos indicadores clave del rendimiento de extracción en solución de la trona que pueden desencadenar un cambio de pozo pueden ser un contenido de bicarbonato de sodio en salmuera que exceda un nivel objetivo máximo; un contenido de Alcalinidad total en salmuera por debajo de un nivel objetivo mínimo; un contenido de salmuera en cloruro de sodio, en sulfato de sodio, en compuestos orgánicos (tal como contenido orgánico total, o contenido total de materia orgánica disuelta) que excede su nivel umbral máximo respectivo; y/o una tasa de salida de salmuera por debajo de un nivel objetivo mínimo.

En realizaciones alternativas, la conmutación de pozo (d) puede realizarse en secuencias de tiempos y pozos aleatorios o semialeatorios con el fin de fomentar una disolución uniforme del estrato de mineral.

El período de tiempo adecuado para cambiar el modo de funcionamiento en el paso (d) puede ser de 1 hora a 1 semana. Los pasos (b) a (d) se pueden llevar a cabo en la cavidad a una presión menor que la presión hidráulica de elevación (que se utiliza durante el desplazamiento litológico del mineral para crear el intersticio de la interfaz) a menos presión de la cabeza hidrostática.

El método puede comprender además: llevar a cabo el paso (e) cambiando al menos un pozo del primer o segundo subconjunto que se opera en modo de inyección o producción a un modo inactivo; llevar a cabo el paso (e'): cambiar al menos un pozo en modo inactivo del conjunto de pozos a un modo de inyección o producción; o llevar a cabo el paso (e) y (e') simultáneamente en al menos dos pozos diferentes del conjunto.

Los pasos (e) y (e') se pueden llevar a cabo al mismo tiempo, con uno o más pozos que se intercambian en el paso (e) que son diferentes de uno o más pozos intercambiados en el paso (e'). Los pasos (e) y (e') se pueden llevar a cabo simultáneamente cuando existe la necesidad de alterar los patrones de flujo dentro de la cavidad y/o ajustar localmente las tasas de flujo de líquido.

El paso (e) o el paso (e') se pueden llevar a cabo cuando existe la necesidad de ajustar la velocidad de flujo total del solvente en la cavidad o la velocidad de flujo global de la salmuera fuera de la cavidad.

La al menos una cavidad puede formarse inicialmente a partir de al menos una sección no cubierta, preferiblemente a partir de al menos una sección horizontal no cubierta, de un pozo perforado direccionalmente a través del estrato mineral.

La al menos una cavidad puede formarse inicialmente por un desplazamiento litológico del estrato mineral, dicho desplazamiento litológico que se realiza cuando dicho estrato mineral está situado inmediatamente encima de un estrato insoluble en agua de una composición diferente con una interfaz de separación débil que se define entre los dos estratos y encima de los cuales se define una sobrecarga hasta el suelo, dicho desplazamiento litológico que comprende inyectar un fluido en la interfaz de separación para elevar el estrato evaporítico a una presión hidráulica de elevación superior a la presión de sobrecarga, formando así un intersticio de la interfaz que es una cavidad de mineral naciente en la interfaz y creando una superficie libre de minerales. La presión hidráulica de elevación aplicada puede caracterizarse por un gradiente de fractura de entre 20,4 kPa/m (0,9 psi/pie) y 34 kPa/m (1,5 psi/pie), preferiblemente entre 21,5 kPa/m (0,95 psi/pie) y 29,4 kPa/m (1,3 psi/pie), más preferiblemente entre 21,5 kPa/m (0,95 psi/pie) y 27,1 kPa/m (1,2 psi/pie), lo más preferiblemente entre kPa/m (1 psi/pie) y 24,9 kPa/m (1,1 psi/pie). La presión hidráulica de elevación puede ser del 0,01 % al 50 % superior a la presión de sobrecarga a la profundidad de la interfaz. La interfaz de separación puede ser horizontal o casi horizontal con una caída de 5 grados o menos, aunque no necesariamente. En algunas realizaciones, la interfaz de separación definida 20 puede tener una caída mayor de 5 grados y de hasta 45 grados.

En algunas realizaciones, se puede inyectar un material apuntalante en la interfaz durante el desplazamiento litológico que permitiría mantener abierto el gas de la interfaz. Este "apuntalamiento" permitiría que cualquier inyección subsiguiente de solvente en el intersticio de la interfaz se lleve a cabo a una presión por debajo de la presión de elevación de sobrecarga.

Una ventaja del método de acuerdo con la presente invención puede ser obtener una disolución más uniforme de la mena de mineral de evaporita en la cavidad. Dado que el mineral se disolverá más fácilmente en el punto de inyección donde las condiciones de disolución son más favorables (por ejemplo, solvente insaturado, temperatura del solvente más alta), el movimiento cambiante del punto o puntos de inyección permite el contacto con solvente recién inyectado a través de la cavidad y no en uno o más puntos de inyección fijos. Para la uniformidad de disolución cuando se repite el paso (d) en el método, se prefiere que el cambio del modo de operación en el paso (d) no se lleve a cabo en el mismo o mismos pozos en el conjunto. Al cambiar el modo de operación de diferentes pozos en un conjunto multi-pozos en la repetición de los pasos (d), el presente método debería proporcionar al menos un 70 % de uniformidad de disolución en la cavidad, preferiblemente al menos un 75 % de uniformidad de disolución, más preferiblemente al menos un 80 % de uniformidad de disolución, más preferiblemente al menos un 85 % de uniformidad de disolución. Por ejemplo, para una disposición de pozo hexagonal de 7 pozos, el presente método podría conseguir desde un 85 % hasta un 99 % de uniformidad de disolución, o más específicamente del 87 % al 99 % de uniformidad de disolución, o incluso más específicamente del 87 % al 95 % de uniformidad de disolución.

Se espera que la aplicación de varios patrones alternativos para el cambio del modo de operación en el paso (d) pueda alcanzar una uniformidad de disolución muy cercana al 100 %.

5 Otra ventaja de dicho método puede ser controlar mejor la configuración de desarrollo de la cavidad, reduciendo así la formación de cavidades de campana y/o reduciendo el estrechamiento o la configuración de cavidad de barra con un flujo continuo de solvente unidireccional desde un pozo de inyección a un pozo de producción.

Otra ventaja de dicho método sería mantener la integridad geomecánica de la cavidad que se extrae.

10 Otra ventaja más de dicho método puede ser reducir el fenómeno del "cegamiento" del bicarbonato de sodio durante la extracción en solución de un mineral que contenga sesquicarbonato de sodio (componente principal de la trona) o wegscheiderita. Al cambiar la operación del pozo desde la producción a la inyección en esta área, se dirige la redisolución del bicarbonato de sodio depositado alrededor del fondo del pozo y evita la posible obstrucción de una cadena de tuberías de producción de salmuera en el pozo de producción.

15 Todavía otra ventaja de dicho método puede ser reducir el fenómeno de "canalización" como se ha explicado anteriormente.

20 Todavía otra ventaja más de dicho método puede ser evitar el yacimiento desigual de insolubles de mineral que se depositan en el fondo de la cavidad durante la disolución.

25 Otra ventaja puede ser obtener un movimiento específico de solvente alrededor de un pozo de producción centrado, tal como desencadenar diversos eventos de inyección de solvente en pozos periféricos dispuestos alrededor del pozo de producción centrado para formar una masa que gira lentamente de salmuera casi homogénea a saturación o cerca de ella en el pozo de producción.

30 Otra ventaja más puede ser obtener un primer movimiento giratorio de solvente alrededor de un pozo de producción centrado, tal como desencadenar diversos eventos de inyección de solvente en pozos periféricos dispuestos alrededor del pozo de producción centrado para formar una masa que gira lentamente de salmuera casi homogénea a saturación o próxima al pozo de producción, y a continuación revertir el movimiento giratorio del solvente alrededor de la misma producción centrada (tal como desencadenar los diversos eventos de inyección de solvente en los pozos periféricos pero en orden inverso).

35 Una ventaja de la presente invención es la inyección continua de solvente y la producción de salmuera, a diferencia de la producción discontinua, ya que no se pierde tiempo inyectando solvente en la cavidad, esperando el enriquecimiento y finalmente llegando a la saturación del solvente con el mineral disuelto, y a continuación bombeando la salmuera.

40 Una ventaja adicional del proceso de conmutación de pozos en modo continuo en comparación con un proceso discontinuo es que el método de conmutación de pozos continuo evita eficientemente una alta disolución vertical sobre áreas pequeñas que probablemente conduciría a problemas relacionados con la inestabilidad geomecánica de la cavidad que se mina en solución.

45 Un segundo aspecto de la presente invención se refiere a un proceso de fabricación para preparar uno o más productos basados en sodio a partir de un estrato mineral evaporítico que comprende un mineral soluble en agua seleccionado del grupo que consiste en trona, nahcolita, wegecheiderita y combinaciones de las mismas, preferiblemente de un estrato mineral evaporítico que comprende trona, dicho proceso que comprende:

- 50 - llevar a cabo el método de acuerdo con el primer aspecto de la presente invención para disolver la mena de mineral soluble en agua de una cavidad en el estrato mineral evaporítico para obtener una salmuera que comprende carbonato de sodio y/o bicarbonato de sodio, y
- pasar al menos una porción de dicha salmuera a través de una o más unidades seleccionadas del grupo que consiste en un cristalizador, un reactor y una unidad de electrodiálisis, para formar al menos un producto a base de sodio. El al menos un producto a base de sodio se selecciona preferiblemente del grupo que consiste en ceniza de sosa, bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio, sulfito de sodio, sesquicarbonato de sodio, cualquier hidrato de carbonato de sodio y cualquier combinación de los mismos.

60 Un tercer aspecto de la presente invención se refiere a un producto a base de sodio seleccionado del grupo compuesto por sesquicarbonato sódico, carbonato sódico monohidratado, carbonato sódico decahidratado, carbonato sódico heptahidratado, carbonato sódico anhidro, bicarbonato sódico, sulfito sódico, bisulfito sódico e hidróxido de sodio, que se obtiene mediante el proceso de fabricación de acuerdo con el segundo aspecto de la presente invención.

65 Lo anterior ha resumido bastante ampliamente las características y ventajas técnicas de la presente invención con el fin de que la descripción detallada de la invención que sigue se pueda entender mejor. A continuación se describirán características y ventajas adicionales de la invención que forman el objeto de las reivindicaciones de la invención.

Los expertos en la técnica apreciarán que la concepción y las realizaciones específicas descritas pueden utilizarse fácilmente como base para modificar o diseñar otros métodos para llevar a cabo los mismos fines de la presente invención. Los expertos en la técnica también deberían comprender que dichas construcciones o métodos equivalentes no se apartan del alcance de la invención como se establece en las reivindicaciones adjuntas.

5

Breve descripción de los dibujos

Para una descripción detallada de las realizaciones preferidas de la invención, ahora se hará referencia a los dibujos adjuntos que se proporcionan, por ejemplo y sin carácter limitante, en los que:

10

La Fig. 1 ilustra una realización de la creación de una cavidad mineral que comprende una etapa de desplazamiento litológico (etapa de elevación) en una extracción en solución de un estrato de trona a partir de un estrato de pizarra bituminosa usando inyección de fluido en un pozo vertical en o cerca de una interfaz de separación trona/pizarra bituminosa;

15

La Fig. 2 ilustra otra realización de la creación de una cavidad mineral que comprende un desplazamiento litológico (elevación) de un estrato de trona a partir de un estrato de pizarra bituminosa utilizando inyección de fluido en un pozo direccionalmente perforado a través de una sección de perforación horizontal que se encuentra en o cerca de una interfaz de separación trona/pizarra bituminosa;

20

La Fig. 3a muestra una vista en planta de la cavidad formada por desplazamiento litológico (elevación) de la capa de trona utilizando un pozo vertical como se ilustra en la Fig. 1;

La Fig. 3b muestra una vista en planta de la cavidad formada por desplazamiento litológico (elevación) de la capa de trona usando un pozo perforado direccionalmente como se ilustra en la Fig. 2;

25

Las Figs. 4a, 4b, 4c, 4d y 4e muestran una vista en planta de varios patrones centrados de pozos en comunicación fluida con una cavidad formada por desplazamiento litológico (elevación) de un estrato de trona usando un conjunto de 3 pozos, un conjunto de 4 pozos, un conjunto de 5 pozos, un conjunto de 9 pozos, y un conjunto de 7 pozos, respectivamente, cada conjunto de pozos que incluye una disposición de pozos en un único patrón alrededor de un pozo central;

30

La Fig. 4f muestra una vista en planta de un conjunto multi-pozos que incluye una disposición de pozos en dos patrones concéntricos o pseudo-concéntricos alrededor de uno o más pozos centrales y opcionalmente uno o más pozos al azar;

35

Las Figs. 5a y 5b muestran una vista lateral de un extremo de fondo del pozo de un pozo de inyección/producción doble que contiene cadenas de tuberías una al lado de la otra, la Fig. 5a que ilustra la inyección de solvente en una cadena de tuberías, y la Fig. 5a que ilustra la extracción de salmuera de una cadena de tuberías paralela;

40

Las Figs. 6a y 6b muestran una vista lateral de un extremo de fondo del pozo de un pozo de inyección/producción doble que contiene cadenas de tuberías concéntricas, la Fig. 6a que ilustra la inyección de solvente en una cadena de tuberías exterior y la Fig. 5a que ilustra la extracción de salmuera de una cadena de tuberías interna;

45

Las Figs. 7a, 7b, 7c y 7d ilustran varias realizaciones del paso (d) según la presente invención, que comprende cambiar algunos pozos en un conjunto de 7 pozos que comprende un pozo central y 6 pozos periféricos en comunicación fluida con una cavidad formada por desplazamiento litológico de un estrato de trona, en el que, a intervalos de tiempo adecuados, el flujo de inyección de solvente se cambia de un pozo periférico al siguiente pozo periférico adyacente alrededor del perímetro de la cavidad de forma giratoria, es decir, inyectando desde cada pozo periférico sucesivo en el sentido de las agujas del reloj mientras se cierra el otro pozo periférico, y la salmuera se extrae a la superficie desde el pozo central operado como pozo de producción;

50

La Fig. 8 ilustra otra realización del paso (d) según la presente invención, que comprende cambiar algunos pozos en un conjunto de 7 pozos que comprende un pozo central y pozos periféricos en comunicación fluida con una cavidad formada por desplazamiento litológico de un estrato de trona, en el que, a intervalos de tiempo adecuados, el operador de la mina cambia simultáneamente tres de los pozos periféricos del modo cerrado al de producción, mientras que los otros pozos periféricos que estaban produciendo están cerrados;

55

La Fig. 9 ilustra otra realización del paso (d) según la presente invención, que comprende cambiar algunos pozos en un conjunto de 7 pozos que comprende un pozo central y pozos periféricos en comunicación fluida con una cavidad formada por desplazamiento litológico de un estrato de trona, en el que, a intervalos de tiempo adecuados, el operador de la mina cambia el pozo interior de producción a inyección y cambia un pozo periférico de inyección al pozo de producción; la reversión de este paso; y la realización de un cambio doble similar en el pozo periférico inmediatamente adyacente, "disparando" de ese modo cada pozo periférico sucesivo alrededor del perímetro de la cavidad;

60

Las Figs. 10a, 10b, 10c y 10d ilustran otras realizaciones del paso (d) según la presente invención, que comprende cambiar algunos pozos en un conjunto de 7 pozos dispuestos en un patrón de forma hexagonal que comprende un pozo central y 6 pozos periféricos en comunicación fluida con una cavidad formada por desplazamiento litológico de un estrato de trona, en el que, a intervalos de tiempo apropiados, el operador de la mina cambia los modos de operación de los pares de pozos de forma aleatoria;

65

Las Figs. 11a y 11b ilustran aún otras realizaciones del paso (d) según la presente invención, que comprende cambiar algunos pozos en un conjunto de 9 pozos dispuestos en un patrón ovalado y que comprende un pozo central y pozos periféricos en comunicación fluida con una cavidad formada por desplazamiento litológico de un estrato de trona a través de un pozo perforado direccionalmente como se ilustra en la Fig. 2, en el que, a

intervalos de tiempo apropiados, el operador de la mina cambia los modos de operación de pares de pozos periféricos adyacentes;

La Fig. 12 ilustra otra realización del paso (d) según la presente invención, que comprende el cambio del modo de operación de pozos en un conjunto principal de 7 pozos y en seis cavidades periféricas conectadas hidráulicamente, dicho conjunto principal de 7 pozos que está dispuesto en forma hexagonal y que comprende un pozo central principal y seis primeros pozos periféricos, cada una de dicha pluralidad de cavidades periféricas que está formada por desplazamiento litológico a partir de su propio pozo central, en el que algunos pozos se cambian entre modos de producción e inyección desde las cavidades principal y periférica;

Las Figs. 13a, 13b, 13c y 13d ilustran el desarrollo progresivo de un campo de pozos con una disposición de una pluralidad de conjuntos de pozos en comunicación fluida con una pluralidad de cavidades interconectadas de acuerdo con una realización de la presente invención, cada cavidad que se forma por desplazamiento litológico a partir de un conjunto de pozos con al menos un pozo central y que además comprende pozos periféricos, preferiblemente dispuestos en un patrón específico.

La Fig. 14 ilustra una realización del paso de conmutación (d) de pozos de acuerdo con la presente invención, que se identifica como "Método I" y que utiliza el campo de pozos en comunicación fluida con la pluralidad de cavidades interconectadas ilustradas en la Fig. 13d;

La Fig. 15 ilustra otra realización del paso de conmutación (d) de pozos de acuerdo con la presente invención, que se identifica como "Método II" y que utiliza el campo de pozos en comunicación fluida con la pluralidad de cavidades interconectadas ilustradas en la Fig. 13d;

La Fig. 16 ilustra otra realización más del paso de conmutación (d) de pozos de acuerdo con la presente invención, que se identifica como "Método III" y que utiliza el campo de pozos en comunicación fluida con la pluralidad de cavidades interconectadas ilustradas en la Fig. 13d;

La Fig. 17 ilustra una realización alternativa del paso de conmutación (d) de pozos de acuerdo con la presente invención, que se identifica como "Método VI" y que utiliza el campo de pozos en comunicación fluida con la pluralidad de cavidades interconectadas ilustradas en la Fig. 13d;

La Fig. 18 ilustra otra realización más del paso de conmutación (d) de pozos de acuerdo con la presente invención, que se identifica como "Método V" y que utiliza el campo de pozos en comunicación fluida con la pluralidad de cavidades interconectadas ilustradas en la Fig. 13d;

Las Figs. 19a y 19b ilustran otras dos realizaciones de campos de pozos que pueden utilizarse en el paso de conmutación (d) de pozos de acuerdo con la presente invención, cada campo de pozos que está en comunicación fluida con la pluralidad de cavidades interconectadas que aún no se solapan sustancialmente, y cada cavidad que se forma a partir de al menos un pozo central por desplazamiento litológico;

Las Figs. 20a, 21a, 22a, 23a, 24a ilustran patrones de flujo fundamentales de 7 pozos de los Ejemplos 1A, 1D, 1G, 1J y 1M, respectivamente, de acuerdo con diversas realizaciones de la presente invención, mientras que las Figs. 20b, 21b, 22b, 23b, 24b ilustran la disolución uniforme de la cavidad resultante usando cada patrón de flujo fundamental respectivo y sus patrones de flujo derivados, con el color más oscuro que indica áreas de mayor disolución vertical; y

Las Figs. 25a, 26a, 27a ilustran patrones de flujo fundamentales de 7 pozos de los Ejemplos 1P, 1Q, 1R, respectivamente, de acuerdo con otras realizaciones de la presente invención, mientras que las Figs. 25b, 26b, 27b ilustran la disolución desigual y la mala disolución de la cavidad resultante utilizando cada patrón de flujo fundamental respectivo y sus patrones derivados, con el color más claro que indica áreas de disolución vertical pobre.

En las figuras, los números idénticos corresponden a referencias similares.

Los dibujos no tienen escala ni proporciones. Algunas características pueden haber sido disminuidas o aumentadas en tamaño para ilustrarlas mejor.

Definiciones y nomenclaturas

Para los fines de la presente divulgación, se pretende que ciertos términos tengan los siguientes significados.

El término "conjunto de pozos" significa una pluralidad de pozos, cada pozo que está en el conjunto en comunicación fluida con al menos otro pozo del conjunto. El conjunto de pozos preferiblemente está en comunicación fluida con al menos una cavidad. Un conjunto de pozos comprende uno o más pozos operados en modo de producción (o extracción), uno o más pozos operados en modo de inyección, y opcionalmente uno o más pozos inactivos (modo inactivo), siempre que el conjunto de pozos contenga al menos 3 pozos, preferiblemente al menos 4 pozos, o incluso más.

El término "subconjunto de pozos" significa uno o más pozos de un conjunto de pozos. Cada pozo en un subconjunto que se caracteriza por los mismos modos de operación. Uno de los subconjuntos en el conjunto comprende uno o más pozos operados en modo de inyección. Otro subconjunto en el mismo conjunto comprende uno o más pozos operados en modo de producción. El conjunto de pozos también puede comprender un subconjunto de uno o más pozos inactivos.

El término 'evaporita' significa una roca sedimentaria soluble en agua formada de, pero no limitado a, minerales salinos tales como trona, halita, nahcolita, silvita, wegscheiderita, que resultan de la precipitación provocada por la evaporación solar de salmueras acuosas de aguas de origen marino o lacustre.

- 5 El término "fractura" cuando se usa en el presente documento como verbo se refiere a la propagación de fractura o fracturas (naturales) preexistentes y a la creación de fractura o fracturas nuevas; y cuando se usa en el presente documento como sustantivo, se refiere a un camino de flujo de fluido en cualquier porción de una formación, estrato o yacimiento que se puede generar de manera natural o hidráulica.
- 10 El término "desplazamiento litológico" tal como se usa en este documento incluye un desplazamiento vertical generado hidráulicamente de un estrato evaporítico (elevación) en su interfaz con un estrato no evaporítico (generalmente subyacente). Un "desplazamiento litológico" también puede incluir un desplazamiento lateral (horizontal) del estrato de evaporita (deslizamiento), pero preferiblemente se evita el deslizamiento.
- 15 El término "sobrecarga" se define como la columna de material situada por encima de la interfaz de destino hasta la superficie del suelo. Esta sobrecarga aplica una presión sobre la interfaz que se identifica por un gradiente de sobrecarga (también denominado "tensión de sobrecarga", "tensión gravitacional", "tensión litostática") en un eje vertical.
- 20 El término "AT" o "álcali total" como se usa en este documento se refiere al porcentaje en peso en solución de carbonato de sodio y/o bicarbonato de sodio (que se expresa convencionalmente en términos de su contenido de carbonato de sodio equivalente) y se calcula de la siguiente manera: $AT\% \text{ en peso} = (\% \text{ en peso de } Na_2CO_3) + 0,631 (\% \text{ en peso de } NaHCO_3)$. Por ejemplo, una solución que contiene el 17 por ciento en peso Na_2CO_3 y el 4 por ciento en peso de $NaHCO_3$ tendría un AT del 19,5 por ciento en peso.
- 25 El término "licor" o "salmuera" representa una solución que contiene un solvente y un mineral disuelto (como la trona disuelta) o al menos un componente disuelto de dicho mineral. Un licor o salmuera puede estar insaturado o saturado en minerales.
- 30 Como se usa en el presente documento, el término "soluta" se refiere a un compuesto (por ejemplo, mineral) que es soluble en agua o en una solución acuosa, a menos que se indique lo contrario en la divulgación.
- Como se usa en el presente documento, los términos "solubilidad", "soluble", "insoluble" como se usan en este documento se refieren a la solubilidad/insolubilidad de un compuesto o soluto en agua o en una solución acuosa, a menos que se indique lo contrario en la divulgación.
- 35 El término "solución" tal como se usa en el presente documento se refiere a una composición que contiene al menos un soluto en un solvente.
- 40 El término "suspensión" se refiere a una composición que contiene partículas sólidas y una fase líquida.
- El término "saturado" en relación con una solución se refiere a una composición que contiene un soluto disuelto en una fase líquida a una concentración igual al límite de solubilidad de dicho soluto bajo la temperatura y presión de la composición.
- 45 El término "insaturado" en relación con una solución como se usa en el presente documento se refiere a una composición que contiene un soluto disuelto a una concentración que está por debajo del límite de solubilidad de dicho soluto bajo la temperatura y presión de la composición.
- 50 El término "(bi)carbonato" se refiere a la presencia tanto de bicarbonato de sodio como de carbonato de sodio en una composición, ya sea en forma sólida (como trona como una sal doble) o en forma líquida (como un licor o salmuera). Por ejemplo, una corriente que contiene (bi)carbonato describe una corriente que contiene tanto bicarbonato de sodio como carbonato de sodio.
- 55 Un parámetro de "superficie" es un parámetro que caracteriza un fluido, solvente y/o salmuera en la superficie del suelo (ubicación sobre el terreno), por ejemplo, antes de la inyección en una cavidad subterránea o después de la extracción desde una cavidad a la superficie.
- Un parámetro 'in situ' es un parámetro que caracteriza un fluido, solvente y/o salmuera en una cavidad subterránea o espacio vacío (ubicación subterránea).
- 60 El término "que comprende" incluye "que consiste esencialmente en" y también "que consiste en".
- Una pluralidad de elementos incluye dos o más elementos.
- 65

Cualquier referencia a 'un' elemento se entiende que engloba 'uno o más' elementos.

En la presente divulgación, cuando se dice que un elemento o componente se incluye y/o se selecciona de una lista de elementos o componentes enumerados, debe entenderse que en las realizaciones relacionadas contempladas explícitamente en el presente documento, el elemento o componente también puede ser cualquiera de los elementos o componentes individuales enumerados, o también se puede seleccionar de un grupo que consta de dos o más de los elementos o componentes enumerados explícitamente, o se puede omitir de esta lista cualquier elemento o componente enumerado en una lista de elementos o componentes enumerados. Además, debe entenderse que los elementos y/o características de una composición, un proceso o un método descritos en este documento pueden combinarse de diversas maneras sin apartarse del alcance y las divulgaciones de las presentes enseñanzas, ya sean explícitas o implícitas en este documento.

El uso del singular 'un' o 'uno' en el presente documento incluye el plural (y viceversa) a menos que se indique específicamente lo contrario.

Además, si el término "aproximadamente" se usa antes de un valor cuantitativo, las presentes enseñanzas también incluyen el valor cuantitativo específico en sí, a menos que se indique específicamente lo contrario. Como se usa en el presente documento, el término "aproximadamente" se refiere a una variación de $\pm 10\%$ del valor nominal a menos que se indique específicamente lo contrario.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

La siguiente descripción detallada ilustra realizaciones de la presente invención a modo de ejemplo y no necesariamente a modo de limitación.

Debe observarse que cualquier característica descrita con respecto a un aspecto o una realización es intercambiable con otro aspecto o realización a menos que se indique lo contrario.

La presente invención se refiere a la extracción en solución in situ de un mineral en una formación subterránea que comprende un estrato mineral evaporítico en el que el mineral es soluble en un solvente de eliminación (líquido) usando múltiples operaciones de pozos interconectados. El método de extracción en solución se puede llevar a cabo en una cavidad mineral que se forma mediante la disolución de la cara libre de minerales creada a través del estrato mineral evaporítico. La cara libre de minerales puede crearse, por ejemplo, perforando una sección no cubierta de un pozo perforado direccionalmente a través del estrato mineral evaporítico o creando un intersticio de la interfaz mediante desplazamiento litológico. La creación de dicha cavidad mineral permite la interconexión de estos pozos de modo que el conjunto de pozos esté en comunicación fluida con la al menos una cavidad.

Formación de cavidades

La al menos una cavidad puede estar formada inicialmente por una o más secciones de pozo no cubiertas, preferiblemente una sección de pozo horizontal no cubierta de al menos un pozo perforado direccionalmente a través del estrato mineral.

La al menos una cavidad puede estar formada inicialmente por un desplazamiento litológico del estrato mineral. Dicho desplazamiento litológico se realiza cuando dicho estrato mineral está situado inmediatamente encima de un estrato insoluble en agua de una composición diferente con una interfaz de separación débil que se define entre los dos estratos y por encima de la cual se define una sobrecarga hasta el suelo, dicho desplazamiento litológico que comprende la inyección de un fluido en la interfaz de separación para elevar el estrato de evaporita a una presión hidráulica de elevación superior a la presión de sobrecarga, formando así un intersticio de la interfaz que es una cavidad mineral naciente en la interfaz y que crea dicha superficie libre de mineral.

La al menos una cavidad se agranda mediante la disolución del mineral de las paredes de la cavidad en un solvente inyectado en la cavidad.

Al menos una cavidad está formada preferiblemente por un desplazamiento litológico del estrato mineral.

Cuando el conjunto de pozos está en comunicación fluida con más de una cavidad, al menos una de las cavidades está formada por desplazamiento litológico. Las otras cavidades minerales pueden crearse mediante la separación hidráulica de los planos de estratificación, mediante perforación horizontal o mediante socavación.

Para el desplazamiento litológico, cuando el estrato mineral se encuentra inmediatamente encima de un estrato insoluble en agua de una composición diferente con una interfaz de separación débil que se define entre los dos estratos y por encima de la cual se define una sobrecarga hasta el suelo, el desplazamiento litológico se realiza separando hidráulicamente los planos de los estratos. El desplazamiento litológico comprende inyectar un fluido de elevación en la interfaz de separación para elevar el estrato evaporítico a una presión hidráulica de elevación superior a la presión de sobrecarga, formando así un intersticio de la interfaz que es una cavidad mineral naciente

en la interfaz y creando la superficie libre mineral que es accesible al solvente y está disponible para la disolución del mineral.

5 Esta cavidad puede estar abierta o no abierta después del desplazamiento litológico inyectando un material apuntalante adecuado. Con el fin de mantener y/o mejorar la fluidez del intersticio creado hidráulicamente en el estrato mineral, las partículas con alta resistencia a la compresión (a menudo denominadas "apuntalante") pueden depositarse en el intersticio, por ejemplo, inyectando el fluido de elevación que lleva el apuntalante. El apuntalante puede evitar que el intersticio se cierre completamente con la liberación de la presión hidráulica para la extracción, formando canales de flujo de fluido a través de los cuales puede fluir un solvente de producción en una fase posterior de explotación de extracción en solución. El proceso de colocar el apuntalante en el intersticio de la interfaz se denomina en el presente documento "apuntalar" la interfaz. Aunque puede ser deseable usar apuntalante para mantener trayectorias de flujo de fluido en el intersticio de la interfaz, la disolución de mineral mediante el fluido de elevación que comprende solvente agrandará el intersticio a lo largo del tiempo para formar una cavidad mineral. Como tal, el apuntalante puede ser necesario solo durante la formación del intersticio de la interfaz y/o durante el desarrollo de la cavidad naciente. Pero en algunos casos, este apuntalamiento puede omitirse en el paso de elevación.

20 El fluido de elevación puede comprender o consistir en un solvente adecuado para disolver el mineral, pero no es necesario. El fluido de elevación puede ser un fluido que tiene propiedades interesantes tales como una viscosidad suficiente para mantener eficientemente partículas contenidas en este documento (tal como apuntalante) de una manera bien dispersa para llevarlas a lo largo de todo el intersticio de la interfaz.

25 Cuando el estrato de evaporita comprende trona, el fluido de elevación comprende preferiblemente agua o una solución acuosa insaturada que comprende carbonato de sodio, bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio, hidróxido de calcio, o combinaciones de los mismos

Se puede usar agua preferiblemente como fluido de elevación para crear el intersticio de la interfaz y para agrandar el intersticio de la interfaz rápidamente mediante disolución mineral para formar la cavidad.

30 El fluido de elevación inyectado puede comprender o consistir en una suspensión que comprende partículas suspendidas en agua o una solución acuosa (por ejemplo, solución que contiene sosa cáustica y/o (bi)carbonato de sodio). El fluido puede comprender o consistir en una suspensión que comprende partículas suspendidas en agua o en la solución acuosa. Las partículas pueden ser de cualquier materia insoluble en agua adecuada, tal como residuos, partículas de apuntalante o combinaciones de las mismas. Las partículas pueden comprender o consistir en relaves utilizados como apuntalante.

40 Dichos relaves son materiales insolubles que pueden obtenerse durante el refinado de la trona de minas mecánicas. Los relaves en el procesamiento de trona representan una materia insoluble en agua recuperada después de que una trona minada mecánicamente se disuelva (generalmente después de ser calcinada) en una refinería de superficie. Durante la extracción mecánica de un estrato de trona, algunas partes del suelo subyacente y la roca del techo que lo cubre y que contienen pizarra bituminosa, lutolita y arcilla, así como material intercalado, se extraen al mismo tiempo que la trona. La materia prima de la trona extraída mecánicamente que se envía a la refinería de superficie puede variar en pureza desde un mínimo del 75 por ciento hasta un máximo de casi el 95 por ciento de la trona. La refinería de superficie disuelve esta materia prima (generalmente después de una etapa de calcinación) en agua o en un medio acuoso para recuperar los valores alcalinos, y la parte que no es soluble, por ejemplo, la pizarra bituminosa, la lutolita, la arcilla y el material intercalado, se denominan "insoles" o "relaves". Después de la disolución de la trona, los relaves se separan de la salmuera que contiene carbonato sódico mediante un sistema de separación sólido/líquido. El tamaño de las partículas en los relaves puede variar según las operaciones de la refinería de superficie. Los relaves de trona típicos pueden tener tamaños de partículas que oscilan entre 1 micrómetro y 250 micrómetros, aunque se pueden obtener tamaños más grandes y más pequeños. Más del 50 % de las partículas en los relaves generalmente tienen un tamaño de partícula entre 5 y 100 micrómetros. El rango completo de los relaves minerales puede usarse como partículas insolubles en agua. Como alternativa, una fracción del rango completo de relaves se puede usar como insolubles. Por ejemplo, puede usarse un aparato de separación por tamaño (por ejemplo, un aparato de tamiz húmedo) para aislar una fracción de partículas específica, tal como aislar partículas que pasan a través de un tamiz con un tamaño de corte específico (tal como 44 μm = malla 325) a partir de partículas retenidas por el tamiz.

60 Un apuntalante puede ser cualquier material sólido insoluble adecuado con una distribución de tamaño que abra el intersticio inducido hidráulicamente de tal manera que permita el paso y flujo de fluido en el intersticio cuando se usa una presión hidráulica más baja en un paso de disolución posterior.

65 En realizaciones en las que la cavidad se crea levantando hidráulicamente la formación de mineral subterránea para establecer la comunicación fluida entre al menos dos pozos, se mantiene una presión hidráulica suficiente en la interfaz para soportar las fracturas abiertas; y hacer circular un líquido solvente a través de dichas fracturas para disolver los constituyentes solubles en agua del mineral para crear la cavidad.

En otras realizaciones, cuando la cavidad puede crearse perforando un pozo perforado direccionalmente (que comprende una porción vertical recubierta, que no está en contacto con el mineral, y una porción horizontal no recubierta, que está en contacto con el mineral), y también perforando un pozo vertical, una porción recubierta de la cual no está en contacto con el mineral. El extremo de fondo del pozo vertical interseca preferiblemente la porción horizontal no cubierta para proporcionar comunicación fluida entre los dos pozos. La inyección de un líquido solvente acuoso a través de un pozo se lleva a cabo para llevar el líquido solvente para que entre en contacto con el mineral en dicha porción horizontal a fin de disolver los componentes minerales solubles en agua y crear dicha cavidad.

Ejemplos adecuados de dicha creación de la cavidad se pueden encontrar en la Patente de Estados Unidos n.º 4.398.769 de Jacoby (hidrofracturación), en la Patente de Estados Unidos n.º 7.611.208 de Day et al. (extracción en solución con múltiples perforaciones horizontales), en la Patente de Estados Unidos n.º 5.246.273 de Rosar et al., y en la Publicación de solicitud de Patente de Estados Unidos n.º 2011/0127825 de Hughes et al. (extracción en solución socavada con perforaciones horizontales). En realizaciones preferidas, el método de extracción en solución se puede llevar a cabo en al menos una cavidad mineral que se forma por desplazamiento litológico del estrato evaporítico que se encuentra inmediatamente encima de un estrato no evaporítico de una composición diferente que es insoluble en dicho solvente de eliminación.

En realizaciones preferidas, el método de extracción en solución se puede llevar a cabo en una pluralidad de cavidades, todas ellas formadas por desplazamiento litológico.

En otras realizaciones, la pluralidad de cavidades se puede crear inicialmente usando pozos perforados direccionalmente (que comprenden una porción vertical recubierta, no en contacto con el mineral, y una porción horizontal no recubierta, en contacto con el mineral). El método de extracción en solución se puede llevar a cabo en una pluralidad de cavidades, todas ellas formadas inicialmente por porciones no recubiertas de pozos perforados direccionalmente.

En otras realizaciones más, la pluralidad de cavidades se puede crear inicialmente usando una combinación de dichas técnicas. Preferiblemente, al menos una cavidad de la pluralidad de cavidades está formada por desplazamiento litológico.

Las formaciones de evaporita solubles en agua, y en particular las formaciones de trona, generalmente consisten en capas casi paralelas de varios espesores, subyacentes y suprayacentes por rocas sedimentarias insolubles en agua como pizarras, lutolita, margas y limolitas. La superficie de separación entre el estrato evaporítico y el estrato subyacente o suprayacente no evaporítico suele estar claramente definida y forma un plano natural de debilidad. Esta superficie de separación en cualquier punto dado puede estar sustancialmente en un plano horizontal. En la cuenca del río Green de los Estados Unidos, la profundidad de la superficie de separación entre la trona y los estratos de pizarra bituminosa es poco profunda, normalmente de 914 m (3000 pies) o menos, preferiblemente de una profundidad de 762 m (2500 pies) o menos, más preferiblemente de una profundidad de 610 m (2000 pies) o menos.

Si se aplica una cantidad suficiente de presión hidráulica en esta interfaz, las dos sustancias diferentes (la trona y la pizarra) deben separarse fácilmente. Cuando el estrato de evaporita soluble en agua es un lecho casi horizontal a profundidades suficientemente poco profundas y cubierto por roca sedimentaria casi horizontal insoluble en agua, presiones de inyección iguales o ligeramente superiores a la presión de la sobrecarga deben favorecer el desarrollo de una fractura horizontal principal, en particular en el caso en el que la fractura objetivo deseada se encuentra a lo largo del plano conocido de debilidad entre dos materiales incongruentes. La única fractura principal (intersticio de la interfaz) creada en su interfaz es sustancialmente horizontal, y crea una gran superficie libre de mineral sobre la cual se puede introducir un solvente adecuado para la extracción en solución in situ.

El intersticio de la interfaz se crea inicialmente desplazando litológicamente (levantando) el estrato de evaporita y la sobrecarga en la interfaz mediante la aplicación de una presión hidráulica de elevación superior a la presión de sobrecarga. La presión hidráulica de elevación se aplica inyectando un fluido en una interfaz de separación de estratos (preferiblemente inyectada a un caudal volumétrico constante específico) hasta que se alcanza la presión hidráulica de elevación deseada (una presión hidráulica de elevación superior a la presión de sobrecarga) y se crea el intersticio de la interfaz generando una superficie libre mineral. Una vez que la presión hidráulica ha alcanzado la presión de elevación deseada, el intersticio de la interfaz que genera una cavidad naciente se puede agrandar mediante la disolución de mineral de la superficie libre expuesta al solvente para formar una cavidad mineral y generar una salmuera que contenga mineral disuelto (o un componente disuelto del mineral). Esta cavidad mineral puede explotarse mediante el método de extracción en solución según la presente invención, utilizando uno o más pozos para inyectar solvente y usando uno o más pozos diferentes para extraer al menos parte de la salmuera.

Para formar la cavidad mineral, la inyección de solvente se puede llevar a cabo a través de un pozo vertical inicial o un pozo inicial perforado direccionalmente.

El método de acuerdo con la presente invención puede comprender formar al menos un pozo parcialmente recubierto y cementado que tiene una porción no cubierta, preferiblemente una porción horizontal no recubierta, que

generalmente está situada en o encima de la interfaz del estrato y perforada a través de la mena de mineral. Las paredes de esta porción no recubierta del pozo parcialmente recubierto y cementado consisten esencialmente en mena de mineral. Este pozo puede servir como pozo de inyección de solvente y/o puede servir como pozo de producción del que se puede extraer el licor.

5 El método de acuerdo con la presente invención puede comprender formar al menos un pozo completamente recubierto y cementado que interseca la interfaz del estrato. Este pozo servirá como pozo de inyección de solvente y/o puede servir como pozo de producción.

10 La formación del pozo inicial puede incluir perforar un pozo desde la superficie hasta al menos la profundidad de una zona de inyección objetivo que se encuentra cerca o en la interfaz entre el bloque objetivo del estrato de evaporita y el estrato subyacente, seguido de recubrimiento parcial o completo y cementación del pozo inicial.

15 El pozo inicial puede estar totalmente cementado y recubierto, pero con una sección de fondo del pozo que proporciona al menos una zona de inyección de solvente in situ que está en comunicación fluida con la interfaz de estratos. La sección de fondo del pozo puede ser una porción del pozo completamente cementado y recubierto que comprende al menos una abertura (que proporciona al menos una zona de inyección de solvente in situ) que está en comunicación fluida con la interfaz del estrato. Un líquido (por ejemplo, solvente) puede fluir a través de la abertura o aberturas entre el interior del pozo y la interfaz del estrato. La tubería de recubrimiento de una sección de fondo del pozo puede estar perforada y/o el pozo inicial puede quedar abierto en la interfaz para exponer la zona de inyección de solvente in situ objetivo.

20 Cuando el pozo inicial es vertical para el desplazamiento litológico, la zona de inyección in situ puede comprender o constar de perforaciones (aberturas de la tubería de recubrimiento) en una sección de fondo del pozo de la tubería de recubrimiento del pozo, preferiblemente alineada a lo largo de la interfaz del estrato. Cuando el pozo vertical pasa a través de la interfaz que es horizontal o casi horizontal, las perforaciones (aberturas de la tubería de recubrimiento) se colocan preferiblemente en al menos una circunferencia de la tubería de recubrimiento de esta sección de fondo del pozo, estando dicha circunferencia de la tubería de recubrimiento alineada a lo largo de la interfaz del estrato.

25 Cuando el pozo inicial es perforado direccionalmente para su desplazamiento litológico, el pozo inicial perforado direccionalmente comprende una zona de inyección in situ que está situada en o cerca de la interfaz de separación, en la que la zona de inyección puede comprender o consistir en una abertura final de una sección horizontal de fondo del pozo inicial y/o las perforaciones específicas de la tubería de recubrimiento en la sección horizontal del fondo del pozo, por ejemplo perforaciones en una pared lateral o en paredes laterales opuestas de la sección horizontal del pozo que están alineadas a lo largo de la interfaz del estrato (como una hilera de perforaciones en una pared lateral o en ambas paredes laterales de la sección horizontal del fondo del pozo). En este caso, cuando el fluido de elevación sale de la zona de inyección in situ (apertura del extremo y/o perforaciones de la tubería de recubrimiento del pozo) elevando así el estrato de evaporita suprayacente en la interfaz, el espacio creado en la interfaz es una extensión de dicha sección de perforación horizontal.

30 El método puede comprender además perforar la tubería de recubrimiento a lo largo de al menos una circunferencia del pozo vertical inicial o a lo largo de al menos una generatriz de su sección horizontal de fondo del pozo.

35 La abertura o aberturas en la tubería de recubrimiento pueden estar en comunicación fluida con un conducto insertado en el pozo para facilitar el flujo de solvente desde la superficie del suelo a esta zona de inyección de solvente del pozo.

40 El pozo inicial cuando es vertical preferiblemente se perfora desde la superficie del suelo más allá de la profundidad de la interfaz, y el pozo vertical inicial se recubre y se cementa en toda su longitud, pero comprende una zona de inyección in situ que está en comunicación fluida con la interfaz del estrato, dicha zona de inyección in situ de dicho pozo vertical inicial que comprende una abertura de extremo de fondo del pozo y/o perforaciones de la tubería de recubrimiento.

45 En al menos una realización, la zona de inyección de solvente in situ puede ensancharse intencionadamente para formar una ranura de "elevación previa" entre el estrato de evaporita suprayacente y el estrato insoluble subyacente, esta ranura de "elevación previa" proporciona una "superficie de elevación inicial" preexistente que permitiría que la presión hidráulica ejercida por el fluido inyectado actúe sobre esta superficie de elevación inicial preferentemente para comenzar la separación inicial de los dos estratos. La ranura de elevación previa puede crearse inyectando direccionalmente un fluido (que comprende preferiblemente un solvente adecuado para disolver el mineral) a presión a través de una pistola de chorro giratoria.

50 A continuación, se describirán realizaciones relacionadas con una etapa de desplazamiento litológico para fabricar dicha cavidad mineral de acuerdo con la presente invención en referencia a los siguientes dibujos: La Fig. 1 y 2.

55 A pesar de que las Figs. 1-2 se ilustran en el contexto de un sistema de trona/pizarra y la aplicación de presión hidráulica en su interfaz subterránea, con respecto a cualquiera o todas las realizaciones de la presente invención, el

mineral de evaporita al que se puede aplicar el presente método puede ser cualquier estrato de evaporita adecuado que contiene un soluto mineral deseable. El estrato mineral evaporítico puede comprender un mineral que es soluble en el solvente para formar una salmuera que puede usarse para la producción de sal de roca (NaCl), potasa (KCl), ceniza de sosa y/o derivados de las mismas. El estrato mineral evaporítico puede comprender, por ejemplo, un mineral seleccionado del grupo que consiste en trona, nahcolita, wegscheiderita, shortita, northupita, pirssonita, dawsonita, silvita, carnalita, halita y combinaciones de las mismas, preferiblemente el estrato mineral evaporítico comprende cualquier yacimiento que contenga carbonato de sodio y/o bicarbonato de sodio. El estrato mineral evaporítico comprende preferiblemente un mineral soluble en agua seleccionado del grupo que consiste en trona, nahcolita, wegeideriderita y combinaciones de las mismas. Más preferiblemente, el mineral de evaporita comprende trona. En tal caso, el estrato subyacente insoluble en agua de una composición diferente puede incluir pizarra bituminosa o cualquier roca sedimentaria sustancialmente insoluble en agua que tenga una interfaz de unión débil con el estrato evaporítico objetivo.

La sobrecarga se define como la columna de material ubicada sobre la interfaz del estrato hasta la superficie del suelo. Esta sobrecarga aplica una presión sobre esta interfaz que se identifica por un gradiente de sobrecarga (también denominado "tensión de sobrecarga", "tensión gravitacional", "tensión litostática") en un eje vertical.

En las Figs. 1 y 2, un estrato de trona 5 está por encima de un estrato de pizarra bituminosa 10 y está por debajo de otro estrato no evaporítico 15 (generalmente otro estrato de pizarra que puede estar contaminado con bandas que contienen cloruro). Hay una interfaz de separación definida 20 entre los estratos 5 y 10. También hay una interfaz de separación 21 entre los estratos 5 y 15. La aplicación de presión hidráulica se lleva a cabo preferiblemente en la interfaz 20.

El estrato de trona 5 puede contener hasta el 99 % en peso de sesquicarbonato de sodio, preferiblemente del 25 al 98 % en peso de sesquicarbonato de sodio, más preferiblemente del 50 al 97 % en peso de sesquicarbonato de sodio.

El estrato de trona 5 puede contener hasta el 1 % en peso de cloruro de sodio, preferiblemente hasta el 0,8 % en peso de NaCl, aún más preferiblemente hasta el 0,2 % en peso de NaCl.

La interfaz de separación definida 20 entre los estratos 5 y 10 es preferiblemente horizontal o casi horizontal, pero no es necesario. La interfaz 20 se puede caracterizar por una caída de 5 grados o menos; preferiblemente con una caída de 3 grados o menos; más preferiblemente con una caída de 1 grado o menos. En algunas realizaciones, la interfaz de separación definida 20 puede tener una caída superior a 5 grados de hasta 45 grados o más.

La interfaz trona/pizarra 20 puede tener una profundidad 'D' inferior a 1000 m (3280 pies) o una profundidad de 914 m (3000 pies) o menos, preferiblemente a una profundidad de 762 m (2500 pies) o menos, más preferiblemente a una profundidad de 610 m (2000 pies) o menos. La interfaz trona/pizarra 20 puede a una profundidad 'D' de más de 244 m (800 pies).

En la cuenca del río Green, la interfaz de separación de trona/pizarra bituminosa 20 puede estar a una baja profundidad de 244-762 m (800 a 2500 pies).

En la cuenca del río Green, el estrato de trona 5 puede tener un espesor de 1,5-9,1 m (5 pies a 30 pies), o puede ser más delgado con un espesor de 1,5-4,6 m (5 a 15 pies).

En la Fig. 1 se ilustra una realización de la técnica de desplazamiento litológico utilizada para hacer que la cavidad mineral emplee al menos un pozo de inyección vertical.

El método puede comprender perforar primero al menos uno, pero posiblemente más, pozos verticales 30 desde el suelo hasta una profundidad por debajo de la interfaz 20. La porción 35 del pozo 30 que está debajo de la interfaz 20 está preferiblemente tapada. La profundidad a la que se encuentra el fondo de la porción del pozo 35 (donde se detiene la perforación del pozo 30) puede estar al menos 5 pies por debajo de la profundidad de la interfaz 20, preferiblemente entre 10 pies y 100 pies por debajo de la profundidad de la interfaz 20, más preferiblemente entre 30 pies y 80 pies debajo de la profundidad de la interfaz 20.

El pozo 30 preferiblemente está completamente cementado y recubierto, excepto por que comprende una zona 40 de inyección in situ que está en comunicación fluida con la interfaz 20 de estratos. La zona 40 de inyección in situ debería permitir inyectar un fluido en el pozo 30 y dirigirlo a la interfaz 20. La zona 40 de inyección in situ está preferible, aunque no necesariamente, diseñada para así inyectar lateralmente el fluido con el fin de evitar la inyección de fluido en una dirección vertical. La zona 40 de inyección in situ permite que el fluido fuerce un camino en la interfaz trona/pizarra 20 desplazando verticalmente el estrato 5 para crear el intersticio 42.

La zona de inyección in situ 40 puede comprender una o más aberturas de la tubería de recubrimiento de fondo del pozo. Una sección vertical de fondo del pozo 30 puede tener una abertura de fondo del pozo que está situada en o cerca de la interfaz de separación 20. La sección de perforación vertical puede tener, alternativa o adicionalmente,

perforaciones (no ilustradas) que pueden alinearse con la interfaz 20. Usando una herramienta de perforación en el fondo del pozo, estas perforaciones pueden cortarse a través de la tubería de recubrimiento y el cemento en una circunferencia del pozo alineada con la interfaz 20 para formar la zona 40 de inyección in situ.

5 El fluido puede fluir dentro de la tubería de recubrimiento del pozo 30 o puede inyectarse a través de un conducto (no mostrado) hasta la zona de inyección 40 in situ. Dicho conducto puede insertarse dentro del pozo de inyección 30 para facilitar la inyección de fluido. El conducto puede insertarse mientras se perfora el pozo de inyección 30, o puede insertarse después de completar la perforación. El conducto de inyección puede comprender una cadena de tuberías s, donde los tubos se conectan de extremo a extremo entre sí en serie sin demasiados empalmes. El
10 conducto de inyección puede comprender o consistir en un tubo flexible, donde el conducto es una única unidad tubular flexible sin empalmes. El conducto de inyección puede estar hecho de cualquier material adecuado, tal como, por ejemplo, acero o cualquier material polimérico adecuado (por ejemplo, polietileno de alta densidad). El conducto de inyección dentro del pozo 30 debe estar en comunicación fluida con la zona de inyección 40 in situ.

15 Para la extracción de salmuera a la superficie, se pueden perforar uno o más pozos a una distancia del pozo vertical inicial 30. Con fines ilustrativos, se ilustra un pozo de producción vertical 45 en una vista lateral en la Fig. 1 y en vista en planta en la Fig. 3a. Pero en realizaciones preferidas de la presente invención, un conjunto de pozos que comprende al menos 4 pozos, uno de los cuales es el pozo vertical inicial 30 a través del cual se inyecta el fluido de elevación 50 para levantar el mineral evaporítico 5, mientras que los otros pozos son pozos periféricos dispuestos en un patrón a lo largo del perímetro 55 del intersticio 42 centrado alrededor del pozo vertical inicial 30. Se ilustran
20 ejemplos de disposiciones de pozos adecuadas para el conjunto de pozos en las Figs. 4a-4e. Los pozos periféricos 45x (x = a, b,... h) en estas disposiciones de pozos se pueden perforar antes del desplazamiento litológico tal como se describe a continuación para el pozo 45 en la Fig. 1 y la Fig. 3a. Pero algunos de los pozos periféricos 45x pueden perforarse después de que se haya creado y agrandado el intersticio 42 mediante la disolución del mineral para formar la cavidad mineral 142.
25

En referencia a la Fig. 1, el pozo 45 puede estar separado del pozo vertical inicial 30 por una distancia 'd' de como máximo 1000 metros, o como máximo de 800 metros, o como máximo de 600 metros. La separación 'd' preferida entre estos pozos puede ser de 100 a 600 metros, preferiblemente de 100 a 500 metros.
30

El pozo 45 puede cementarse y recubrirse desde la superficie hacia abajo más allá del fondo del estrato de trona 5 que está definido por la interfaz 20, y que penetra una porción del estrato de pizarra bituminosa 10 con una sección de fondo del pozo 47. La sección de fondo del pozo 47 puede dejarse sin recubrir y sin cementar, de modo que la salmuera que fluya a través de ella pueda tener contacto con las paredes de la sección de fondo del pozo 47 del pozo 45.
35

Preferiblemente, el pozo 45 se cementa y se recubre completamente, incluyendo la sección de fondo del pozo 47, pero la sección de fondo del pozo 47 está perforada donde interseca la interfaz 20. Utilizando una herramienta de perforación de fondo del pozo, las perforaciones 48 pueden cortarse a través de la tubería de recubrimiento y el cemento en la interfaz 20. Como se muestra en la Fig. 1, estas perforaciones 48 permitirían que líquido y, opcionalmente, insolubles entren en el lumen del pozo 45 y se recojan en un sumidero 49 (zona de recogida) en el extremo del fondo del pozo 45 para que al menos una parte del líquido recogido sea extraído a la superficie.
40

El sumidero 49 puede crearse en la sección de fondo del pozo 47 del pozo 45 para facilitar la recuperación de la salmuera del intersticio 42. La formación del sumidero 49 se lleva a cabo preferiblemente por medios mecánicos (tales como perforación más allá de la interfaz trona/pizarra 20). El fondo del sumidero 49 puede tener una profundidad superior a la parte inferior del estrato de trona 5. El sumidero 49 puede estar incrustado al menos parcial o completamente en el estrato de pizarra bituminosa 10. Las paredes y el fondo del sumidero 49 están preferiblemente recubiertos y cementados.
45

Se puede instalar un sistema de bombeo (no ilustrado) de modo que la salmuera producida en el intersticio 42 y la cavidad resultante 142 se pueda bombear a la superficie para su posterior procesamiento y la recuperación de productos valiosos. El sistema de bombeo adecuado puede instalarse en la sección de fondo del pozo 47 del pozo de producción 45 o en el extremo de la superficie de este pozo. Este sistema de bombeo podría ser un sistema "en la mina" en el sumidero 49 (por ejemplo, una bomba de fondo del pozo (no mostrada) que permitiría empujar al menos una parte de la salmuera desde el subsuelo hasta la superficie del suelo) o un sistema "terrestre" (por ejemplo, un sistema de bombeo que permitiría extraer al menos una parte de la salmuera del subsuelo a la superficie del suelo). Se puede colocar una tubería de retorno de salmuera (no mostrada) en el sumidero 49 en comunicación fluida con el sistema de bombeo del suelo para permitir que la salmuera sea bombeada a la superficie durante la producción.
50
55
60

Para la inyección del fluido de elevación 50, se puede usar agua inicialmente para crear el intersticio 42 en la interfaz 20 y para agrandar el intersticio 42 para formar la cavidad mineral naciente 142. El fluido inyectado 50 se puede extraer por retorno al interior del pozo 30 para drenar la cavidad del líquido.
65

- 5 El fluido inyectado 50 se inyecta preferiblemente a un caudal volumétrico de 7 a 358 metros cúbicos por hora (m^3/h) [31,7-1575 galones por minuto o 1-50 barriles por minuto], para permitir que la presión hidráulica aumente a la zona de inyección 40 in situ hasta alcanzar una presión hidráulica de elevación objetivo (se estima que es la profundidad de interfaz multiplicada por el gradiente de sobrecarga más un pequeño gradiente de presión adicional necesario para superar la resistencia a la tracción de la interfaz y la resistencia de fricción al flujo de fluido). Otros caudales de fluido adecuados se han descrito previamente. En este punto, el flujo de fluido inyectado 50 puede detenerse o, al menos, reducirse a un caudal muy bajo, pero se mantiene la presión hidráulica de elevación.
- 10 El fluido inyectado 50 puede comprender agua o una solución acuosa insaturada que comprende carbonato de sodio, bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio, hidróxido de calcio o combinaciones de los mismos.
- 15 El fluido inyectado 50 puede comprender o consistir en una suspensión que comprende partículas suspendidas en agua o una solución acuosa (por ejemplo, solución cáustica). Las partículas pueden ser relaves (insolubles), partículas de apuntalante o combinaciones de los mismos. Las partículas pueden comprender o consistir en relaves utilizados como apuntalante. Estas partículas son generalmente insolubles en agua.
- 20 El fluido 50 puede precalentarse antes de la inyección. Cuando el fluido 50 comprende un solvente adecuado para la disolución de trona (tal como agua o un medio acuoso), el fluido 50 puede precalentarse a una temperatura predeterminada superior a la temperatura in situ de la trona para aumentar la solubilidad de la trona.
- 25 El fluido 50 puede inyectarse desde la superficie del suelo a la interfaz 20 a una temperatura superficial al menos $20\text{ }^\circ\text{C}$ más alta que la temperatura in situ de la trona.
- 30 El fluido 50 puede inyectarse desde la superficie del suelo a la interfaz a una temperatura superficial que está cerca de la temperatura ambiental de la trona (la temperatura in situ) a la profundidad de inyección. La temperatura superficial del fluido 50 puede estar dentro de $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ o dentro de $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ de la temperatura in situ del estrato de trona 5. Como la temperatura in situ del estrato de trona 5 se estima en aproximadamente $30\text{-}36\text{ }^\circ\text{C}$ ($86\text{-}96,8\text{ }^\circ\text{F}$), preferiblemente $31\text{-}35\text{ }^\circ\text{C}$ ($87,8\text{-}95\text{ }^\circ\text{F}$), la temperatura superficial del fluido 50 puede estar entre aproximadamente 25 y aproximadamente $41\text{ }^\circ\text{C}$ (aproximadamente $77\text{-}106\text{ }^\circ\text{F}$).
- Ahora se describe cómo el sistema de la Fig. 1 opera en el contexto de la presente invención para levantar el estrato de trona y hacer el intersticio 42 para crear una cavidad mineral naciente 142.
- 35 El fluido 50 se inyecta a través de la zona de inyección 40 del pozo de inyección 30 en la interfaz 20 entre el estrato de trona 5 y el estrato de pizarra bituminosa subyacente 10 hasta que se alcanza una presión hidráulica de elevación objetivo. La presión hidráulica de elevación aplicada inyectando el fluido en la interfaz 20 es preferiblemente superior a la presión de sobrecarga. La aplicación de presión hidráulica mediante la inyección de fluido en la interfaz 20 eleva el estrato de trona 5 suprayacente y la sobrecarga, creando así una fractura horizontal principal (intersticio 42).
- 40 La aplicación de presión hidráulica de elevación de la presente invención es significativamente diferente que la fracturación hidráulica disponible en el mercado usando presiones muy altas en formaciones profundas de petróleo y gas como en la fracturación de pizarras donde la intención es la creación de numerosas fracturas verticales en la masa rocosa real a mucha mayor profundidad ($> 1219\text{ m} = 4000\text{ pies}$) bajo una presión de sobrecarga mucho mayor.
- 45 Es por eso que los Solicitantes se refieren al actual paso de elevación utilizado en el método de extracción en solución como un "desplazamiento litológico" para distinguirlo, como proceso menos invasivo, de la fracturación hidráulica a alta presión utilizada en campos de petróleo y gas. La técnica actual de "desplazamiento litológico" consiste en aplicar una presión hidráulica baja para realizar una separación en un plano de debilidad natural de poca profundidad entre un estrato de evaporita soluble de capas casi horizontales (por ejemplo, trona) y un estrato diferente (por ejemplo, pizarra bituminosa) con el fin de crear una gran superficie libre de minerales que un solvente adecuado (por ejemplo, agua o solución acuosa) pueda contactar para iniciar la extracción en solución in situ.
- 50 Para que este desplazamiento litológico se lleve a cabo en trona mineral, la profundidad de la interfaz trona/pizarra es suficientemente superficial (por ejemplo, a profundidades de interfaz de menos de 1000 m) para fomentar el desarrollo bajo presión hidráulica de una fractura principal horizontal o casi horizontal que se extiende lateralmente lejos de la zona de inyección in situ en esta interfaz entre el estrato de trona y el estrato de pizarra bituminosa subyacente.
- 60 Durante el desplazamiento litológico del bloque objetivo del estrato de trona 5 en el paso de elevación, el pozo de producción 45 debe estar tapado. El pozo de inyección 30 también debe estar tapado, pero permitirá que el fluido se inyecte a través del mismo.
- 65 Una fractura se abrirá en la dirección perpendicular a la tensión principal mínima. Para propagar una fractura en un medio isotrópico en dirección horizontal, la tensión principal mínima debe ser vertical. La tensión vertical en la

interfaz trona/pizarra 20 coincide con la presión de sobrecarga. En general, es prudente seleccionar un gradiente de fractura para que el desplazamiento litológico sea ligeramente superior al gradiente de sobrecarga para propagar una fractura horizontal iniciada en la zona de inyección 40 a lo largo de la interfaz de separación 20.

5 El gradiente de fractura utilizado se estimará en función del campo local de tensión subterránea y la resistencia a la tracción de la interfaz trona/pizarra. El gradiente de fractura utilizado para estimar la presión de elevación objetivo para el desplazamiento litológico es igual o superior a 20,4 kPa/m (0,9 psi/pie), o igual o superior a 21,5 kPa/m (0,95 psi/pie), preferiblemente igual o superior a 22,6 kPa/m (1 psi/pie). El gradiente de fractura utilizado para estimar la presión de elevación objetivo para el desplazamiento litológico puede ser de 33,9 kPa/m (1,5 psi/pie) o menos; o 10 31,7 kPa/m (1,4 psi/pie) o menos; o 29,4 kPa/m (1,3 psi/pie) o menos; o 27,1 kPa/m (1,2 psi/pie) o menos; o 24,9 kPa/m (1,1 psi/pie) o menos; o incluso 23,8 kPa/m (1,05 psi/pie) o menos. El gradiente de fractura puede estar entre 20,4 kPa/m y 34 kPa/m (0,9 psi/pie y 1,5 psi/pie); preferiblemente entre 20,4 y 29,4 kPa/m (0,90 y 1,30 psi/pie); aún más preferiblemente entre 22,6 y 28,3 kPa/m (1 y 1,25 psi/pie); lo más preferiblemente entre 22,6 y 24,9 kPa/m (1 y 1,10 psi/pie). El gradiente de fractura puede ser alternativamente de 21,5 kPa/m a 27,1 kPa/m (0,95 psi/pie a 1,2 15 psi/pie); o de aproximadamente 21,5 kPa/m (0,95 psi/pie) a aproximadamente 24,9 kPa/m (1,1 psi/pie), o de aproximadamente 22,6 kPa/m (1 psi/pie) a aproximadamente 23,8 kPa/m (1,05 psi/pie). Por ejemplo, para una profundidad de 610 m (2000 pies) para la interfaz 20, se puede aplicar una presión hidráulica objetivo mínima de 13790 Pa (2000 psi) en la interfaz 20 mediante la inyección del fluido para levantar la sobrecarga con el estrato 5 inmediatamente por encima de la zona objetivo que se va a levantar, que representa la interfaz 20 entre la trona y la 20 pizarra bituminosa.

La presión hidráulica de elevación puede ser al menos un 0,01 % superior, o al menos un 0,1 % superior, o al menos un 1 % superior, o al menos un 3 % superior, o al menos un 5 % superior, o al menos un 7 % superior, o al menos un 10 % superior a la presión de sobrecarga a la profundidad de la interfaz. La presión hidráulica durante el paso de elevación puede ser como máximo un 50 % superior, o como máximo un 40 % superior, o como máximo un 30 % superior, o como máximo un 20 % superior, a la presión de sobrecarga a la profundidad de la interfaz. La presión hidráulica de elevación puede ser del 0,01 % al 50 % superior, o del 0,1 % al 50 % superior, o incluso del 1 % al 50 % superior a la presión de sobrecarga a la profundidad de la interfaz. La presión hidráulica de elevación debería ser suficiente y preferiblemente debería estar justo por encima de la presión (por ejemplo, de aproximadamente el 30 0,01 % al 1 % superior) necesaria para superar la suma de la presión de sobrecarga y la resistencia a la tracción de la interfaz.

El bloque objetivo del estrato de trona 5 que debe levantarse se encuentra a poca profundidad donde la tensión vertical debe ser lo suficientemente baja, y se sabe que tiene una resistencia a la tracción muy baja, 35 considerablemente más débil que la trona o la pizarra bituminosa. La combinación de una tensión vertical baja y una interfaz horizontal muy débil crea condiciones muy favorables para la propagación de un desplazamiento litológico hidráulico inducido horizontalmente para crear el intersticio 42.

El intersticio 42 proporciona una superficie libre de trona 22 que es principalmente la parte inferior del bloque objetivo levantado del estrato de trona 5. El contacto con esta superficie libre de trona 22 se puede hacer con un 40 solvente cuando el intersticio 42 se llena con este solvente, y por tanto se produce la disolución de mineral agrandando el intersticio 42 en la cavidad 142.

Como se ilustra en vista en planta en la Fig. 3a, la formación del intersticio 42 en este desplazamiento litológico puede extenderse lateralmente en casi todas las direcciones lejos de la zona de inyección 40 del pozo 30 a una 45 distancia lateral considerable, dicha distancia lateral del pozo 30 es algo equivalente al radio 'R' del perímetro 55 del intersticio 42 que es de 30 metros (aproximadamente 100 pies), hasta 150 m (aproximadamente 500 pies), o hasta 300 m (aproximadamente 1000 pies), o hasta 500 m (aproximadamente 1640 pies), o incluso hasta 610 m (aproximadamente 2000 pies) del pozo 30. Como se espera que las tensiones no sean iguales en todas las direcciones, la expansión lateral no será uniforme en el plano horizontal. Así, aunque la extensión lateral del intersticio 42 se ilustra como representada por un área circular que se muestra en una vista en planta en la Fig. 3a, se entiende que el desplazamiento litológico puede crear una forma irregular. Sin embargo, el ancho (o altura) del intersticio 42 sería muy inferior a 1 cm, generalmente de aproximadamente 0,5 a 1 cm cerca de la zona de inyección in situ hasta 0,25 cm o menos en el borde extremo (perímetro 55) de la extensión lateral (intersticio 42). El ancho 50 (altura) del intersticio 42 es muy dependiente del caudal del fluido durante el desplazamiento litológico.

Idealmente, durante el desplazamiento litológico, la extensión lateral del intersticio 42 intercepta la sección perforada 47 del pozo 45. De esta manera, se establece una comunicación fluida entre los pozos 30 y 45 como se muestra en la Fig. 3a. Como se muestra en esta figura, el pozo 45 está ubicado dentro del perímetro 55 del intersticio de la 60 interfaz 42, y el radio del intersticio R desde el pozo central 30 es superior a la distancia 'd' entre el pozo inicial 30 y el segundo pozo 45.

Para crear una multitud de pozos interconectados, se puede perforar más de un pozo 45 dentro del perímetro del intersticio de la interfaz 42 y por lo tanto de la cavidad mineral 142. Ejemplos de dichas disposiciones de pozos periféricos 45 se ilustran en las Figs. 4a, 4b, 4c, 4d, 4e y 4f. 65

- Las Figs. 4a, 4b, 4c, 4d, 4e y 4f muestran en varias vistas en planta de diversas disposiciones de pozos interconectados en comunicación fluida con la cavidad 142 que se forma inicialmente a través del intersticio de la interfaz 42 por desplazamiento litológico (elevación) del estrato de trona 5 y a continuación se agranda por disolución de trona. Las Figs. 4a, 4b, 4c, 4d, 4e ilustran patrones de disposición centrada de pozos, cada patrón que comprende un pozo central (pozo inicial 30) y de 3 a 8 pozos periféricos identificados como '45x' con x que representa a, b, ..., h. La Fig. 4f ilustra una disposición multi-pozo con dos patrones centrados de pozos, cada patrón que comprende un pozo central (pozo inicial 30a) y opcionalmente pozos centrales adicionales 30b y 30c, una pluralidad de pozos periféricos ('45x', '46x') para cada patrón, y opcionalmente algunos pozos al azar 47a y 47b.
- En particular, la Fig. 4a ilustra una disposición centrada de pozos a lo largo de un patrón 60 (de forma triangular) que comprende un pozo central (pozo inicial 30) y tres pozos periféricos identificados como '45x' donde x representa a, b, c que tienen una separación entre pozos d' y que están dentro del perímetro 155 de la cavidad 142. La separación d entre el pozo central 30 y los pozos periféricos 45x es tal que $d < d' < R$, siendo R el radio perimetral de la cavidad 142.
- La Fig. 4b ilustra una disposición centrada de pozos a lo largo de un patrón 61 (mostrado como forma cuadrada pero que podría ser de cualquier otra forma oblonga) que comprende un pozo central (pozo inicial 30) y 4 pozos periféricos identificados como '45x' donde x = a, b, c, d que tienen una separación entre pozos d' y que están dentro del perímetro 155 de la cavidad 142. La separación d entre el pozo central 30 y un pozo periférico 45x puede ser tal que $d < d' < R$, siendo R el radio del perímetro 155 de la cavidad 142.
- La Fig. 4c utiliza una disposición centrada de pozos a lo largo de un patrón 62 (ilustrado como un pentágono pero podría tener cualquier otra forma poligonal con 5 lados) que comprende un pozo central (pozo inicial 30) y 5 pozos periféricos identificados como '45x' donde x = a, b, c, d, e, que tienen una separación entre pozos d' y que están dentro del perímetro 155 de la cavidad 142. La separación d entre el pozo central 30 y un pozo periférico 45x puede ser tal que $d < d' < R$ o $d' < d < R$, siendo R el radio del perímetro 155 de la cavidad 142.
- La Fig. 4d ilustra una disposición centrada de pozos a lo largo de un patrón 63 (mostrado como de forma circular pero podría ser cualquier forma ovoide tal como una forma ovalada) que comprende un pozo central (pozo inicial 30) y 8 pozos periféricos identificados como '45x' donde x = a, b, ..., h, que tienen una separación entre pozos d' y que están dentro del perímetro 155 de la cavidad 142. La separación d entre el pozo central 30 y un pozo periférico 45x puede ser tal que $d' < d < R$, siendo R el radio del perímetro 155 de la cavidad 142.
- La Fig. 4e ilustra una disposición centrada de pozos a lo largo de un patrón hexagonal 64 que comprende un pozo central (pozo inicial 30) y 6 pozos periféricos identificados como '45x' donde x = a, b, ..., f, que tienen una separación entre pozos d' y que están dentro del perímetro 155 de la cavidad 142. La separación d entre el pozo central 30 y un pozo periférico 45x puede ser tal que $d' < d < R$, siendo R el radio del perímetro 155 de la cavidad 142.
- La Fig. 4f ilustra una disposición multi-pozo que comprende dos patrones centrados concéntricos 164, 64' de pozos. Estos patrones 164, 64' se muestran como patrones hexagonales, pero podría ser de cualquier otra forma poligonal con 3+ lados o cualquier forma ovoide. Dado que el patrón 164 rodea el patrón 64' en la Fig. 4f, por esa razón, el patrón 164 puede denominarse el "patrón externo", mientras que el patrón 64' puede denominarse el "patrón interno".
- La disposición multi-pozo de la Fig. 4f comprende un pozo central 30a (que normalmente es el pozo inicial desde el cual se crea la cavidad 142 por desplazamiento litológico del estrato de trona 5) y puede comprender opcionalmente otros dos pozos centrales 30b y 30c (como se muestra) que están muy cerca del pozo central 30a. La disposición multi-pozo de la Fig. 4f comprende además 8 pozos periféricos identificados como '45x' donde x = a, b, ..., h, a lo largo del primer patrón exterior hexagonal 164 en el que la separación entre el pozo central inicial 30a y los pozos periféricos 45x es d; y 6 pozos periféricos adicionales identificados como '46x' donde x = a, b, ..., f, a lo largo del otro (segundo) patrón interno hexagonal 64', en el que la separación entre el pozo central inicial 30a y los pozos periféricos 46x es d". Los pozos periféricos '46x' están preferiblemente distribuidos de manera uniforme en los 6 vértices del patrón hexagonal 64'. Los pozos periféricos '45x' donde x = a, b, ..., f preferiblemente también se distribuyen de manera uniforme en los 6 vértices del patrón hexagonal 164, mientras que los pozos periféricos 45g y 45h están situados en dos lados del patrón hexagonal 164. Todos los pozos periféricos 45x y 46x están dentro del perímetro 155 de la cavidad 142 y $d' < d < R$.
- Los pozos centrales adicionales 30b y 30c como se ilustra en la Fig. 4f pueden crearse para complementar el requerimiento en el caudal de solvente y/o salmuera en el pozo central inicial 30a. Los pozos centrales adicionales 30b y 30c se pueden taladrar después de que el pozo 30a se haya usado para iniciar el desarrollo de la cavidad a partir del mismo. O los pozos centrales adicionales 30b y 30c pueden taladrarse antes de que el pozo 30a se use para iniciar el desarrollo de la cavidad a partir del mismo.
- En realizaciones alternativas en las que hay más de un pozo central (y que no se muestran en la Fig. 4a-f), puede haber tantos pozos centrales 30x como pozos periféricos 45x, y cada pozo central '30x' puede estar emparejado con un pozo periférico '45x' de modo que el par cambie el modo operativo, un pozo que cambie de inyección a

producción mientras que el otro cambia de producción a inyección, simultáneamente, por ejemplo, a través de una válvula de cruce.

5 Opcionalmente, el conjunto multi-pozos también puede comprender uno o más pozos aleatorios identificados como 47a y 47b en la Fig. 4f. Se llaman 'aleatorios' porque se colocan aleatoriamente dentro del perímetro 155 de la cavidad 142, es decir, no están alineados a lo largo de un patrón específico de pozos, como a lo largo de un patrón, como los patrones 60, 61, 62, 63., 64, 164 de las Figs. 4a, 4b, 4c, 4d, 4e y 4f, respectivamente. Los pozos aleatorios opcionales 47a y 47b pueden crearse para complementar el requerimiento en la entrada de flujo de solvente a la cavidad 142 y/o la salida de flujo de salmuera de la cavidad 142. Por ejemplo, un pozo aleatorio puede colocarse en una región de inmersión ascendente del estrato de trona 5, cuando dicho pozo aleatorio está destinado a ser utilizado principalmente como pozo de inyección en la cavidad 142, y/o un pozo aleatorio puede colocarse en una región de inmersión descendente del estrato de trona 5, cuando dicho pozo aleatorio está destinado a ser utilizado principalmente como pozo de producción para extraer salmuera de la cavidad 142.

15 Se describirá ahora otra realización para el desplazamiento litológico (elevación) de un estrato de trona usando un pozo perforado direccionalmente para inyección con referencia al siguiente dibujo: Fig. 2.

El método puede comprender perforar un pozo 31 perforado direccionalmente desde la superficie del suelo para viajar más horizontalmente hasta la profundidad de la interfaz 20. Se perfora una sección 32 horizontal del pozo 31 que se cruza con la interfaz 20. El borde inferior de la sección 32 puede estar por debajo de la interfaz 20.

El extremo de fondo del pozo de la sección horizontal 32 comprende preferiblemente una zona de inyección in situ, que está en comunicación fluida con la interfaz de estratos 20.

25 El fluido se inyecta en el pozo 31 perforado direccionalmente y fluye fuera del pozo 31 a través de la zona de inyección in situ que puede comprender una o más aberturas de la tubería de recubrimiento de fondo del pozo.

La sección de perforación horizontal 32 puede tener una abertura de fondo del pozo 33 que está situada en o cerca de la interfaz de separación 20. La abertura de fondo del pozo 33 puede comprender uno o más agujeros con un diámetro inferior al diámetro interno de la sección 32 y puede consistir en todo el fondo del pozo de la sección 32. La sección de pozo horizontal 32 puede tener, alternativa o adicionalmente, perforaciones 34 que están situadas en o cerca de la interfaz de separación 20. En algunas realizaciones, las perforaciones 34 pueden estar situadas a lo largo de al menos una generatriz de la tubería de recubrimiento de la sección horizontal 32, estando la generatriz alineada generalmente con la interfaz. Sin embargo, las perforaciones 34 no necesariamente deben alinearse con la interfaz 20.

La una o más aberturas de la tubería de recubrimiento se seleccionan preferiblemente del grupo que consiste en la abertura del extremo del fondo del pozo 33, las perforaciones de la tubería de recubrimiento 34 y combinaciones de las mismas. La abertura o aberturas de la tubería de recubrimiento proporcionarían una zona de inyección in situ adecuada a través de la cual el fluido puede fluir para entrar en el plano de la interfaz.

En el pozo 31 perforado direccionalmente, se puede crear el intersticio 42' como una extensión de la sección de perforación 32 donde el fluido 50 sale de su abertura o aberturas de la tubería de recubrimiento de fondo del pozo.

45 Se pueden llevar a cabo varias formas para crear el intersticio 42' por medio de inyección de fluido usando diversas realizaciones de la sección de perforación 32 del fondo del pozo, en la que una o más aberturas de la tubería de recubrimiento (por ejemplo, abertura final 33 y/o perforaciones 34 de la tubería de recubrimiento) sirven para inyectar el fluido 50 in situ en la interfaz 20 de la siguiente manera:

- 50 - inyectar el fluido de elevación 50 solamente desde la abertura del extremo del fondo del pozo 33 de la sección de perforación 32 (en la que la abertura del extremo del fondo del pozo 33 puede comprender uno o más agujeros con un diámetro inferior al diámetro interno de la sección cilíndrica 32);
- inyectar el fluido de elevación 50 a través de la abertura de fondo del pozo 33 de la sección de perforación 32 y perforar la tubería de recubrimiento 34 perforando la tubería de recubrimiento de la sección 32 a lo largo de al menos una parte de su longitud y alineándose a lo largo de al menos una generatriz de la sección 32, preferiblemente perforando toda la longitud de la sección de perforación 32, estando las perforaciones en dos generatrices de la sección cilíndrica 32 que están alineadas con la interfaz 20 para así inyectar lateralmente fluido 50 de ambas paredes laterales de la sección horizontal 32 o en una generatriz 36 que está alineada con la interfaz 20 para así inyectar lateralmente fluido 50 desde solo una pared lateral de la sección horizontal 32; o
- 60 - inyectar el fluido de elevación 50 únicamente a través de perforaciones 34 de la tubería de recubrimiento a lo largo de al menos una generatriz de al menos una parte de la sección de perforación 32 horizontal (la abertura final 33 se cierra o es impermeable al flujo de fluido en esta realización), estando dicha generatriz alineada con la interfaz 20, las perforaciones 34 que perforan preferiblemente toda la longitud de la tubería de recubrimiento de la sección de perforación 32, estando las perforaciones en dos generatrices de la sección cilíndrica 32 que están alineadas con la interfaz 20 para así inyectar lateralmente fluido 50 desde ambas paredes laterales de la sección

horizontal 32 o en una generatriz que está alineada con la interfaz 20 para así inyectar lateralmente el fluido 50 desde solo una pared lateral de la sección horizontal 32.

5 Debe observarse que la alineación de las perforaciones de la tubería de recubrimiento (perforaciones 34 para el pozo inicial perforado direccionalmente 31 o perforaciones para el pozo vertical inicial 30) con la interfaz 20 se ha descrito anteriormente en el contexto de las Figs. 1 y 2.

10 Sin embargo, debe entenderse que dicha alineación no es necesaria para levantar adecuadamente el estrato evaporítico en la interfaz 20. Además, estas perforaciones de la tubería de recubrimiento pueden ser oblongas, con su eje principal alineado en parte con la interfaz 20. Sin embargo, ranuras verticales u agujeros circulares o cualquier perforación con un eje principal desalineado con la interfaz 20 son igualmente adecuados siempre que estén ubicados en o cerca de la interfaz 20 para permitir el flujo de fluido desde estas perforaciones a la interfaz 20. Dado que las perforaciones de la tubería de recubrimiento en los pozos 30 o la porción de perforación 33 del pozo 31 deben estar cerca de la interfaz 20 y dado que la presión hidráulica actúa en todas las direcciones por igual, incluso el fluido inyectado desde una perforación vertical o cualquier perforación perfilada no alineada con la interfaz 20 debería encontrar su camino hacia la interfaz 20.

20 Del mismo modo que se ha descrito anteriormente para la Fig. 3a, la extensión lateral del intersticio 42' debe intersectar la sección perforada 47 del pozo 45 en la Fig. 3b. El pozo 45 es preferiblemente vertical pero puede estar perforado direccionalmente con una sección horizontal.

25 Para la extracción de salmuera a la superficie, uno o más pozos que se pueden perforar a una distancia del pozo inicial 31 perforado direccionalmente. A modo ilustrativo, un pozo de producción vertical 45 se ilustra en una vista lateral en la Fig. 2 y en vista en planta en la Fig. 3b.

30 Pero en algunas realizaciones de la presente invención, el conjunto de pozos utilizados para la explotación del mineral comprende al menos 4 pozos. Un pozo en el conjunto es el pozo inicial 45 que puede convertirse en un pozo central en la disposición del pozo; otro pozo en el conjunto puede ser el pozo inicial 31 a través del cual se inyecta el fluido de elevación 50 para levantar el mineral de evaporita 5 de modo que el pozo 31 se pueda usar como pozo periférico (aunque la ubicación de su extremo de superficie puede ubicarse fuera del perímetro 56 del intersticio 42'), mientras que se pueden añadir pozos adicionales como pozos periféricos dispuestos a lo largo del perímetro 56 del intersticio 42' en un patrón centrado alrededor del pozo inicial 45 como se ilustra en la Fig. 3b. Un ejemplo de una disposición de pozo adecuada dentro del perímetro de la cavidad 142' utilizada en la explotación de mineral se ilustra en la Fig. 11a.

35 En la Fig. 3b, el pozo de producción 45 puede taladrarse a una cierta distancia 'd' desde la ubicación de fondo del pozo de la zona de inyección in situ de la sección horizontal 32, de modo que el vector de fluido principal se dirige hacia el pozo de producción 45.

40 El intersticio 42' puede crearse como una extensión axial de la sección de pozo horizontal 32 de un pozo cuando el fluido 50 sale de su abertura 33 de fondo del pozo.

45 El intersticio 42' puede crearse como una extensión lateral de esta sección de perforación 32 horizontal cuando el fluido 50 sale de las perforaciones 34 de la pared lateral situadas en una o más generatrices de la sección de perforación 32.

50 El intersticio 42' puede crearse como una extensión lateral y axial de esta sección de pozo de perforación horizontal 32 cuando el fluido 50 sale de la abertura de extremo 33 y las perforaciones de pared lateral 34 situadas en una o más generatrices de la sección de perforación 32.

55 Para crear una multitud de pozos interconectados, se puede taladrar más de un pozo 45 dentro del perímetro 56 del intersticio de la interfaz 42' que se agranda en la cavidad 142' mediante disolución mineral. Un ejemplo de dichas disposiciones de pozos periféricos para un intersticio desplazado litológicamente desde el pozo 31 perforado direccionalmente se ilustra en la Fig. 11a. Los pozos periféricos 45y (con $y = i, ii, \dots, vii$) en la Fig. 11a se puede perforar antes del desplazamiento litológico tal como se describe a continuación para el pozo 45 en la Fig. 1. Pero algunos de los pozos periféricos 45y pueden taladrarse después de que se haya creado el intersticio de la interfaz 42' y se haya ampliado mediante la disolución de mineral para formar la cavidad mineral 142'.

60 La Fig. 11a ilustra un conjunto de 9 pozos con un patrón de disposición centrada 65 (ilustrado como una forma ovalada pero podría ser cualquier forma ovoide), el conjunto de pozos que comprende un pozo central (pozo 45) y 8 pozos periféricos identificados como pozos 31 (el pozo inicial perforado direccionalmente a través del cual el mineral de trona se desplaza litológicamente) y los pozos 45y donde $y = i, ii, \dots, vii$. Los pozos 45 y 45y están dentro del perímetro 156 de la cavidad 142', pero el pozo 31 puede estar dentro o fuera del perímetro 156.

65

Pozos

Los pozos se pueden establecer inicialmente por perforación convencional, instalación de la tubería de recubrimiento, cementación entre la tubería de recubrimiento y el agujero de perforación, e instalación de la cadena de tuberías de inyección o la cadena de tuberías de producción o ambas en cada pozo con espaciadores apropiados.

Durante la extracción en solución, estos pozos interconectados se pueden alternar periódicamente como pozos de inyección y producción, con un solvente insaturado flotante dirigido desde un pozo de inyección a un pozo de producción. Este procedimiento debería reducir la configuración de la cavidad de campana o la configuración de estrechamiento de la cavidad o de la barra como resultado de inyectar una solución menos saturada moviendo los puntos de inyección y los puntos de extracción alrededor de la cavidad.

Los pozos se pueden emparejar, y se pueden proporcionar y controlar válvulas de cruce para que los dos pozos puedan servir alternativamente como pozos de inyección y producción. Esto promueve el crecimiento uniforme de la cavidad y previene el taponamiento en las cadenas de tuberías de inyección y producción.

Periódicamente, para pares de pozos, se puede abrir la válvula de cruce para permitir la inversión del flujo de líquido a través de las cadenas de tuberías del pozo. El cruce por lo general se logra mediante un par de válvulas, una en cada una de las líneas de cruce. Esto debería promover una disolución más uniforme del mineral en la cavidad y evitar el taponamiento de la cadena del tubo de producción.

Los pozos tienen preferiblemente el mismo diámetro interno, generalmente de 5 a 50 pulgadas, preferiblemente de 7 a 40 pulgadas.

El pozo de inyección y el pozo de producción pueden ser verticales, pero no es necesario. Los pozos pueden estar separados por una distancia de al menos 50 metros, o al menos 100 metros, o al menos 200 metros. Los pozos pueden estar separados por una distancia de como máximo 1000 metros, o como máximo 800 metros, o como máximo 600 metros. La separación preferida puede ser de 100 a 600 metros, preferiblemente de 100 a 500 metros.

Los pozos pueden completarse o modificarse tanto para inyectar como para producir, aunque preferiblemente no de forma simultánea. Para estos pozos de doble propósito, la instalación de cadenas de tuberías de inyección y producción se puede hacer con los espaciadores apropiados.

Un tipo de extremo de pozo adecuado de un pozo de inyección/producción doble 45' se ilustra en la Fig. 5a durante la inyección de un solvente de producción 70 y en la Fig. 5a durante la extracción de una salmuera 75 a la superficie. El pozo de inyección/producción doble 45' tiene una cadena de tubos de inyección uno al lado del otro 80a y una cadena de tubos de producción 85a. El extremo de fondo del pozo de las cadenas de tuberías 80a no entra en contacto con el nivel de líquido en la cavidad 142 o 142', pero el extremo de fondo del pozo de las cadenas de tuberías de producción 85a está sumergido en el líquido dentro del sumidero 49 ubicado en el extremo de fondo del pozo de inyección/producción 45' doble.

Como se ilustra en la Fig. 5a, durante el paso de inyección (b), el solvente de producción 70 se inyecta a través de la cadena de tuberías 80a. Como se ilustra en la Fig. 5b, después de que la operación del pozo 45' se cambie desde el modo de inyección al modo de producción, la salmuera 75 se extrae a la superficie del suelo a través de la cadena de tuberías 85a.

Otro tipo de fondo de pozo adecuado de un pozo de inyección/producción 45" doble se ilustra en la Fig. 6a durante la inyección del solvente de producción 70 y en la Fig. 6a durante la extracción de salmuera 75 a la superficie. El pozo de inyección/producción 45" doble tiene una cadena de tuberías de inyección 80b y una cadena de tuberías de producción 85b concéntricas. Al igual que para el pozo 45', el extremo del fondo de las cadenas de tuberías 80b no entra en contacto con el nivel del líquido en la cavidad 142 o 142', pero el extremo de fondo del pozo de las cadenas de tuberías 85b está sumergido en el líquido dentro del sumidero 49 situado en el extremo de fondo del pozo de inyección/producción 45" doble.

Como se ilustra en la Fig. 6a, durante el paso de inyección (b), el solvente de producción 70 se inyecta a través de la cadena de tuberías 80b y la salmuera 75 se extrae a la superficie del suelo a través de la cadena de tuberías 85a. Como se ilustra en la Fig. 6b, después de que la operación del pozo 45" se cambie del modo de inyección al modo de producción, la salmuera 75 se extrae a la superficie del suelo a través de la cadena de tuberías 85b.

Pueden instalarse cabezales y colectores para permitir tanto la inyección como la producción en cada pozo de doble propósito.

No todos los pozos tienen que ser pozos de doble propósito, pero al menos el 67 %, o al menos el 80 %, o al menos el 90 % de los pozos en el conjunto son pozos de doble propósito.

En algunas realizaciones, el conjunto de pozos puede contener dos o más pozos de doble propósito y al menos un pozo de un solo propósito. Un pozo 'de un solo propósito' está diseñado para realizar solo inyección o producción, pero no ambas.

5 En algunos casos donde el estrato mineral puede tener una caída, un pozo o pozos dentro del perímetro de la cavidad que están cerca del punto más bajo del estrato mineral (es decir, caída inferior) puede ser un pozo de un solo propósito dedicado exclusivamente a la producción.

10 Aún en estos casos donde el estrato mineral puede tener una caída, un pozo o pozos dentro del perímetro de la cavidad que están cerca del punto más alto del estrato mineral (es decir, caída superior) puede ser un pozo de un solo propósito dedicado exclusivamente a la inyección.

15 El conjunto de pozos puede comprender un número 'n' de pozos con $n > 4$, y un número inferior a 'n' pozos, preferiblemente un número (n-1) de pozos, son pozos periféricos que pueden disponerse en uno o más patrones centrados alrededor de al menos un pozo central.

Los pozos periféricos están preferiblemente centrados alrededor de un pozo central.

20 El conjunto de pozos puede disponerse en un patrón único o dos o más patrones concéntricos o pseudo-concéntricos centrados alrededor de al menos un pozo central.

El patrón puede comprender o consistir en al menos un polígono con desde 3 hasta 12 lados, una forma de panal de abeja, o al menos una forma ovoide, preferiblemente un círculo, un óvalo o un polígono con 4 a 6 lados.

25 El conjunto de pozos puede comprender de 4 a 100 o más pozos, preferiblemente comprende de 4 a 40 pozos; más preferiblemente comprende de 4 a 20 pozos.

30 El conjunto de pozos dispuestos en un solo patrón o un patrón concéntrico centrado alrededor de un pozo central también puede comprender uno o más pozos dispuestos aleatoriamente.

Durante la extracción en solución, estos pozos interconectados se pueden alternar periódicamente como pozos de inyección y producción, con un solvente insaturado flotante dirigido desde un pozo de inyección a un pozo de producción.

35 Los pozos se pueden emparejar, y se pueden proporcionar y controlar válvulas de cruce para que los dos pozos puedan servir alternativamente como pozos de inyección y producción.

40 El paso de conmutación (d) puede promover incluso el crecimiento de la cavidad (incluso la disolución en la cavidad) y/o evitar la formación de incrustaciones y/o el taponamiento de las cadenas de tuberías de inyección y producción (85a, 85b en las Figs. 5b, 6b).

45 De hecho, este paso debería reducir la configuración de la cavidad de campana o la configuración de estrechamiento de la cavidad o de la barra al variar los puntos de inyección y los puntos de extracción dentro de la cavidad.

Periódicamente, para pares de pozos, se puede abrir la válvula de cruce para permitir la inversión del flujo de solvente de producción a través de las cadenas de tuberías del pozo. El cruce por lo general se logra mediante un par de válvulas, una en cada una de las líneas de cruce.

50 Una zona de recolección de salmuera (por ejemplo sumidero 49 en las Figs. 1 y 2) se puede crear en un extremo de fondo del pozo de los pozos de producción o pozos de doble propósito (generalmente debajo del suelo del estrato de trona) para facilitar la recuperación de la salmuera de la cavidad minada del mineral. La formación de la zona de recogida puede ser por medios mecánicos (tal como perforación más allá de la interfaz 20) y opcionalmente por medios químicos (tales como extracción en solución con una aplicación localizada de solvente insaturado en la base del estrato mineral).

55 Una región de la zona de recolección puede tener una elevación menor (mayor profundidad) que la parte inferior del estrato de mena de mineral.

60 Un pozo de inyección vertical inicial, tal como el pozo 30 en la Fig. 1, puede modificarse para convertirse en un pozo de inyección/producción doble, perforando el tapón 35 (ilustrado en la Fig. 1) en la parte inferior de este pozo para hacer un sumidero para recolectar salmuera.

65 Un pozo de inyección inicial perforado direccionalmente, como el pozo 31 en la Fig. 2, puede modificarse para convertirse en un pozo de inyección/producción doble, extendiendo la porción vertical perforada más allá de la interfaz trona/pizarra bituminosa 20 para formar en el fondo de este pozo un sumidero para recoger salmuera.

Se puede instalar un sistema de bombeo (no ilustrado) para que la salmuera pueda bombearse a la superficie para recuperar los productos valiosos. El sistema de bombeo adecuado se puede instalar en el fondo del pozo de pozos de producción y pozos de doble propósito o en el extremo superficial de estos pozos. Este sistema de bombeo puede ser un sistema "en la mina" en el sumidero 49 (a veces denominado "bomba de sumidero" o "bomba de fondo del pozo") o un sistema "terranean" en la superficie del suelo (a veces denominado "bomba de superficie"). Un tubo de retorno de salmuera (tal como las cadenas de tuberías 85a, 85b en las Figs. 6a, 6b) se puede colocar en la zona de recolección de fondo del pozo (sumidero 49 en las Figs. 6a, 6b) en comunicación fluida con dicho sistema de bombeo (no ilustrado) para permitir que la salmuera sea extraída o empujada a la superficie.

10 Explotación de la cavidad mineral

Para llevar a cabo el método según la presente invención, se ha formado al menos una cavidad mediante un desplazamiento litológico del estrato mineral como se ha descrito anteriormente. El desplazamiento litológico se realiza cuando el estrato mineral se encuentra inmediatamente encima de un estrato insoluble en agua de una composición diferente con una interfaz de separación débil definida entre los dos estratos y por encima de la cual se define una sobrecarga hasta el suelo, dicho desplazamiento litológico que comprende la inyección de un fluido en la interfaz de separación para elevar el estrato de evaporita a una presión hidráulica de elevación superior a la presión de sobrecarga, formando así un intersticio de la interfaz que es una cavidad mineral naciente en la interfaz y que crea dicha superficie libre de mineral. El intersticio de la interfaz puede abrirse o no abrirse mediante la inyección de un material apuntalante adecuado.

Una vez que está formada al menos una cavidad por desplazamiento litológico del estrato mineral y el conjunto de pozos está en comunicación fluida con dicha cavidad, puede comenzar la operación de explotación por disolución mineral con el uso de un solvente de producción y extracción de salmuera a la superficie.

25

El método comprende así:

- b) inyectar un solvente (de producción) en al menos una cavidad a través de un primer subconjunto de pozos operados en modo de inyección para que el solvente contacte con la cara libre de minerales a medida que el solvente fluye a través de al menos una cavidad y disolver in situ al menos una porción del mineral desde la cara libre hacia el solvente para formar una salmuera;
- c) extraer al menos una porción de dicha salmuera a la superficie del suelo a través de un segundo subconjunto de pozos operados en modo de producción;
- d) cambiar el modo de operación de al menos un pozo del conjunto después de un período de tiempo adecuado;
- y
- (e) repetir los pasos (a) a (d).

En un modo continuo, el solvente de producción se inyecta en la cavidad a través del primer subconjunto de pozos durante el paso (b) para que la presión hidráulica en la cavidad alcance la presión de funcionamiento deseada; luego, el solvente de producción que fluye disuelve el mineral de la superficie libre mineral expuesta al solvente y se impregna con mineral disuelto y forma una salmuera, y la cavidad se agranda, mientras que al mismo tiempo al menos una porción de la salmuera resultante es extraída continuamente a la superficie a través del segundo subconjunto de pozos durante el paso (c) de tal manera que se mantenga la presión de operación deseada en la cavidad. La salmuera extraída puede reciclarse en parte y reinyectarse en la cavidad para obtener un enriquecimiento adicional en el mineral.

Los pasos (b) a (d) se pueden llevar a cabo en la cavidad a una presión inferior a la presión hidráulica de elevación (que se utiliza durante el desplazamiento litológico del mineral para crear el intersticio de la interfaz) por debajo de la presión de la cabeza hidrostática.

En particular, la disolución debida al contacto del mineral con el solvente que fluye dentro de la cavidad se puede llevar a cabo a una presión hidráulica desde menos que la presión de elevación hasta la presión de la cabeza hidrostática (a la profundidad a la que se agranda la cavidad de la solución), en la que la cavidad está llena de solvente. Al inundar la cavidad, el solvente de producción entra en contacto con el techo de la cavidad y, al contacto con el mineral, lo disuelve. Preferiblemente, la disolución se puede llevar a cabo a una presión hidráulica ligeramente por encima de la presión de la cabeza hidrostática (preferiblemente de un 0,01 % a un 10 % más alta que la presión de la cabeza hidrostática).

Debido a que el estrato mineral no es puro (contiene materia insoluble), se puede depositar una capa de insolubles durante la disolución en la cavidad minada. Esta capa de insolubles separa el suelo y el techo de la cavidad minada, al mismo tiempo que soporta mecánicamente el techo de la cavidad y mantiene la superficie libre del mineral en el techo de la cavidad accesible para el solvente de producción. Dicha capa insoluble se vuelve más gruesa a medida que se disuelve más y más mineral del techo de la cavidad, y proporciona, a través de su porosidad, un canal a través del cual puede pasar el solvente de producción.

65

- 5 Cuando la cavidad minada es autosoportada por escombros minerales fracturados del techo de la cavidad y/o por una capa de material insoluble en agua, la disolución mineral se puede llevar a cabo a una presión hidráulica por debajo de la presión de la cabeza hidrostática. Esto se realiza preferiblemente cuando el desarrollo de la cavidad minada está maduro, es decir, cuando la cavidad mineral creada durante al menos una semana o semanas de disolución es ahora autosoportada sin tener que aplicar una presión hidráulica superior a la presión de sobrecarga para mantenerla abierta. Debido al peso demasiado alto de la sobrecarga en un espacio de techo sin soporte de la cavidad mineral, los bloques de escombros minerales se fracturan en el techo de la cavidad y, como resultado, se acumulan escombros minerales dentro de la cavidad mineral. En este caso, la cavidad no solo contiene una capa de insolubles sino también escombros minerales, ambos que ahora soportan el nuevo techo de la cavidad. En esta situación, no es necesario inundar la cavidad con el solvente de producción para acceder a la superficie libre mineral del techo de la cavidad, porque los escombros minerales ahora dentro de la cavidad proporcionan muchas superficies libres de minerales para que el solvente de producción entre en contacto y se disuelva para formar la salmuera. Los pasos (b) y (c) generalmente se facilitan con una bomba.
- 10
- 15 Cuando el pozo cambia al modo de operación en el paso (d), la inyección de solvente y la producción de salmuera para este pozo pueden realizarse con la misma bomba (bomba de fondo o bomba de superficie), preferiblemente con la misma bomba de superficie cuando se opera desde la presión de la cabeza hidrostática hasta la presión hidráulica de elevación en la cavidad; o por una misma bomba de fondo del pozo cuando la presión hidráulica en la cavidad se mantiene desde la presión de la cabeza hidrostática a la presión de la cabeza sub-hidrostática durante la operación de extracción en solución.
- 20
- En algunas realizaciones cuando un pozo pasa del modo de inyección al modo de producción, una válvula que controla el flujo de solvente dentro de dicho pozo de doble propósito puede cerrarse para detener la inyección, mientras que otra válvula que controla el flujo de salmuera dentro de dicho pozo de doble propósito se abre para comenzar la producción.
- 25
- En algunas realizaciones cuando un pozo pasa del modo de producción al modo de inyección, se cierra una válvula que controla el flujo de salmuera dentro de dicho pozo de doble propósito, mientras que otra válvula que controla el flujo de solvente dentro de dicho pozo de doble propósito puede abrirse para iniciar la inyección.
- 30
- Según algunas realizaciones del presente método, el paso (d) puede comprender cambiar el modo de operación de al menos un pozo del primer subconjunto y también cambiar el modo de operación de al menos un pozo del segundo subconjunto después de un período de tiempo adecuado.
- 35
- De acuerdo con algunas realizaciones del presente método, el paso (d) puede comprender cambiar el modo de operación de un par de pozos con válvulas de cruce.
- El paso (d) puede comprender cambiar el modo de operación de dos o más pozos desde el primer subconjunto de la inyección a la producción y también cambiar el modo de operación de dos o más pozos del segundo subconjunto de producción a inyección después de un período de tiempo adecuado.
- 40
- El flujo del solvente en la cavidad es preferiblemente no unidireccional, sino que más bien el paso de conmutación (d) del pozo permite que el solvente circule a través del espacio de la cavidad, y que el flujo del solvente tenga varias orientaciones de vectores de flujo.
- 45
- El período de tiempo adecuado para cambiar el modo de operación en el paso (d) es de 1 hora a 1 semana, preferiblemente de 2 horas a 4 días, más preferiblemente de 3 horas a 2 días, lo más preferiblemente de 4 horas a 1 día.
- 50
- El método comprende además (e) cambiar al menos un pozo del conjunto a un modo inactivo. El paso (e) puede ser temporal (y el flujo de entrada o salida puede reanudarse en este pozo inactivo); o el paso (e) puede ser permanente y este pozo permanece inactivo durante el resto del período de explotación.
- 55
- En algunas realizaciones, cuando en el paso (e) el pozo pasa del modo de inyección al modo inactivo, la válvula que controla el flujo de solvente dentro del pozo se cierra para detener la inyección.
- En algunas realizaciones, cuando en el paso (e) el pozo pasa del modo de producción al modo inactivo, la válvula que controla el flujo de salmuera dentro del pozo se cierra para detener la producción.
- 60
- Según cualquiera de o todas las realizaciones de acuerdo con el método, cuando se cambia el modo de operación de un pozo de doble propósito, se prefiere detener primero el flujo de líquido en una cadena de tuberías antes de comenzar el flujo en la otra cadena de tuberías.
- 65
- Ejemplos de varias técnicas para cambiar el modo de operación de uno o más pozos adecuados para el paso (d) y/o el paso opcional (e) se ilustran en las Figs. 7a-7d, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 a-d; y Fig. 11a-b, en las que un pozo en modo de producción ('pozo de producción') se identifica como un círculo de puntos; un pozo en modo de inyección

('pozo de inyección') se identifica como un círculo negro; y un pozo no operativo ('pozo inactivo') se identifica como un círculo blanco.

5 A continuación, se hará referencia a la cavidad 142 o 142' en la descripción de las Figs. 7-19. Dicha cavidad 142 (142') se crea mediante el agrandamiento del intersticio 42 (42') mediante disolución mineral.

10 Las Figs. 7a, 7b, 7c y 7d muestran vistas en planta de varias realizaciones del paso (d) que comprende modos de funcionamiento alternos de algunos pozos en un conjunto de 7 pozos dispuestos en un patrón hexagonal 164 que comprende un pozo central (identificado como '0') en modo de producción (P) y 6 pozos periféricos en las posiciones W1 a W6 en comunicación fluida entre sí, todo dentro del perímetro 155 de la cavidad 142 formado por desplazamiento litológico de un estrato de trona, en el que a intervalos de tiempo adecuados el flujo de inyección se desplaza de forma circular desde un pozo periférico al siguiente pozo periférico adyacente alrededor del perímetro de la cavidad, inyectando desde cada pozo periférico sucesivo en sentido horario (como se muestra) o en sentido contrario a las agujas del reloj (no mostrado) mientras se cierran los otros, y la salmuera se recupera del pozo central (W0) como pozo de producción. En la Fig. 7a, el pozo W6 se cambia de inyección (I) a cerrado, mientras que el pozo periférico W1 se cambia de cerrado (C) a inyección. En la Fig. 7b, el pozo periférico W1 se cambia del modo de inyección (I) al modo cerrado mientras que W2 se cambia de cerrado (C) a inyección (I). En la Fig. 7c, el pozo periférico W2 se cambia de inyección (I) a cerrado, mientras que el pozo periférico W3 se cambia de cerrado (C) a inyección. En la Fig. 7d, el pozo periférico W3 se cambia de inyección (I) a cerrado (C), mientras que el pozo periférico W4 se cambia de cerrado (C) a inyección (I).

25 Y estos pasos de conmutación se pueden repetir en todo el perímetro 155 de la cavidad 142. El cambio de pozo en las Figs. 7a-d se ilustra en el sentido de las agujas del reloj, pero podría muy bien ser en sentido contrario a las agujas del reloj, o alternarse entre sentido antihorario y sentido horario. En algunas realizaciones, puede ser deseable operar los modos (inyección, producción o inactivo) de los pozos en parejas o en grupos de tres o más en muchos patrones posibles diferentes, hasta e incluyendo patrones aleatorios, que mejor logren los requisitos objetivo. Las disposiciones de los pozos en operación en las Figs. 7b-7d de hecho representan patrones derivados del patrón inicial en la Fig. 4a, ya que estos patrones derivados se crean por rotación de la Fig. 4a alrededor del pozo de producción central (posición 0). Como tal, el patrón en la Fig. 4a tiene cinco patrones derivados (2 de los cuales no están ilustrados). La Fig. 8 muestra en una vista en planta otra realización del cambio del modo de operación en un conjunto de 7 pozos también con un patrón hexagonal que comprende un pozo central en modo de producción (P) y 6 pozos periféricos (W1-W6) en comunicación fluida con la cavidad 142 formada por desplazamiento litológico de un estrato de trona, en el que a intervalos de tiempo adecuados, el operador de la mina cambia simultáneamente tres de los pozos periféricos (W2, W4, W6) de modo cerrado (inactivo) a modo de inyección, mientras que los otros pozos perimetrales (W1, W3, W5) que estaban en modo inyección se cierran (inactivos). Esta operación de conmutación se puede llevar a cabo cambiando un par de pozos periféricos adyacentes, tales como W2 y W3 desde el modo de inyección al modo inactivo y viceversa.

40 La Fig. 9 muestra en una vista en planta otra realización más del cambio del modo de operación en un conjunto de 7 pozos con un patrón hexagonal que comprende un pozo central y pozos periféricos (W1-W6) en comunicación fluida con una cavidad formada por desplazamiento litológico de la capa de trona, en la que a intervalos de tiempo apropiados, el operador de la mina cambia el pozo interno de producción a inyección y cambia un pozo periférico del pozo de inyección al de producción; la reversión de este paso; y la realización de un cambio doble similar en el pozo periférico inmediatamente adyacente, "disparando" de este modo cada pozo periférico sucesivo W1 a W6 alrededor del perímetro de la cavidad. El cambio de pozo se ilustra en el sentido de las agujas del reloj en la Fig. 9, pero podría ser en sentido antihorario.

50 Las Figs. 10a, 10b, 10c y 10d muestran en varias vistas en planta otra realización del cambio del modo de operación en el mismo conjunto de 7 pozos dispuesto en el patrón 164 de forma hexagonal dentro del perímetro 155 de la cavidad 142 formado inicialmente mediante el agrandamiento del intersticio de la interfaz 42 creado por desplazamiento litológico de un estrato de trona como se muestra en las Figs. 7a-d, este conjunto de pozos que comprende un pozo central W0 y pozos periféricos W1-W6 en comunicación fluida, en los que a intervalos de tiempo apropiados el operador de la mina cambia los modos de operación de pares de pozos de manera aleatoria.

55 Las Figs. 11a y 11b muestran en dos vistas en planta una realización de un modo de operación alterna en un conjunto de 9 pozos dispuesto en un patrón 65 en forma ovalada y que comprende un pozo central 45 y pozos periféricos (31, 45y con y = I, ii,... wii) en comunicación fluida con la cavidad 142' formada inicialmente mediante el agrandamiento del intersticio de la interfaz 42' creado por desplazamiento litológico del estrato de trona a través del pozo 31 perforado direccionalmente (como se describe en la Fig. 2). A intervalos de tiempo apropiados, el operador de la mina cambia los modos de operación de los pares de pozos periféricos adyacentes.

60 La Fig. 12 muestra en una vista en planta la explotación de una cavidad principal 142 que se extrae en solución con un conjunto de 7 pozos dispuesto en un patrón 164 de forma hexagonal y que comprende un pozo central 30 y 6 primeros pozos periféricos 45x con x = a, b,... f, esta cavidad principal que está interconectada hidráulicamente con una pluralidad de cavidades periféricas 100x con x = a, b,... f, cada una que está formada por desplazamiento litológico desde su propio pozo central 30x con x = a, b,...f. Los modos de operación de un pozo desde la cavidad

principal 142 y un pozo desde la cavidad periférica adyacente más cercana se alternan entre la producción y la inyección. El par de acoplamiento ilustrado en la Fig. 12 es el siguiente: 45a/30a; 45c/30c; y 45e/30e.

5 Las Figs. 13a, 13b, 13c y 13d ilustran el desarrollo progresivo de otra disposición de una pluralidad de pozos en comunicación fluida con una pluralidad de cavidades interconectadas de acuerdo con otra realización de la presente invención. Se perfora un número inicial de pozos de inyección, preferiblemente en un patrón preseleccionado, determinándose dicho número y patrón en base al volumen mineral por debajo del que se va a extraer, así como las restricciones geológicas y físicas para la perforación y la inyección/producción.

10 En la Fig. 13a, siete pozos iniciales 30 están situados en los vértices y el centro de un hexágono con la distancia d entre los pozos iniciales inmediatamente adyacentes 30 que generalmente está entre 500 y 1500 pies, o entre 800 y 1300 pies, o incluso entre 1000 y 1250 pies.

15 En la Fig. 13b, se inyecta un fluido de elevación en cada pozo 30 por separado, es decir, no todo al mismo tiempo, o simultáneamente, es decir, todo al mismo tiempo para realizar un desplazamiento litológico para crear intersticios interfaciales que dan lugar por la disolución del mineral a la formación de cavidades 142 con un tamaño y perímetro característicos (mostrados en el presente documento como una forma circular idealizada) suficientemente grandes para que las cavidades 142 desplazadas litológicamente se solapen (es decir, el perímetro de dos cavidades 142 adyacentes se cruzan en dos puntos). Las cavidades 142 interconectadas globales crean una zona globalmente desplazada litológicamente (megacavidad 143) con un límite exterior 155. Cada pozo de inyección 30 así normalmente está en o cerca del centro de la cavidad 142 desplazada litológicamente. Como se ha descrito anteriormente, las cavidades 142 que se han creado a través del desplazamiento litológico pueden o pueden no mantenerse abiertas durante la fase de desplazamiento mediante la introducción de material o materiales apuntalantes adecuados.

25 Como se muestra en la Fig. 13c, pozos adicionales (periféricos) 45 (que se muestran con ●) se puede perforar en una disposición siguiendo un patrón de pozo deseado (como el patrón hexagonal 164 mostrado con líneas débiles en esta figura) mientras que cada pozo 30 (pozo de inyección inicial) está dentro de dicho patrón, de modo que algunos pozos 45 ubicados en el patrón hexagonal 164 rodean un pozo 30 para formar conjuntos de pozos individuales, pero interconectados. Estos pozos 45 se pueden perforar antes del desplazamiento litológico o se pueden perforar después de que se crean los intersticios interfaciales por desplazamiento litológico y se agrandan por disolución de la mena de mineral para crear las cavidades interconectadas 142. Generalmente hay de 3 a 6 pozos 45 como pozos periféricos utilizados para cada cavidad 142, preferiblemente ubicados en los vértices de cada forma hexagonal 164, aunque no necesariamente. Los patrones hexagonales 164 están conectados entre sí, de modo que dos patrones adyacentes 164 comparten un lado. La combinación de estos patrones hexagonales 164 crea un patrón global en forma de panal para formar un campo de pozo, en el que los pozos recién añadidos 45 (periféricos) están en los vértices de dos o tres patrones 164 mientras que los pozos 30 están en o cerca del centro de cada patrón 164.

40 Los pozos 30 y 45 deben estar en comunicación fluida con al menos una cavidad 142. Cada pozo (30, 45) se conecta a un colector para solvente y comprende una válvula que permite que el fluido fluya hacia adentro (para modo de inyección) o fluya hacia fuera por flujo inverso (para el modo de producción), o detiene el flujo de fluido (para el modo inactivo).

45 Como se muestra en la Fig. 13d, la explotación del mineral que utiliza el campo multi-pozos proporciona la interconexión de las cavidades y la combinación para formar la 'megacavidad' 143. Esta 'megacavidad' 143 puede tener una extensión W de 1000 a 3000 pies, de 1600 a 2600 pies, o de 2000 a 2500 pies.

50 Como se muestra en la Fig. 13d, cuando se inicia la explotación de las cavidades, el método comprende inyectar un solvente en un primer conjunto de pozos seleccionados como pozos de inyección, mientras se retira una salmuera de un segundo subconjunto de pozos seleccionados como pozos de producción.

55 La Fig. 14 ilustra el "Método I" que es una realización del paso de conmutación (d) de pozos que utiliza la disposición de campo multi-pozos ilustrada en la Fig. 13d. Cada conjunto de pozos compuesto por 6 pozos periféricos y 1 pozo central puede operarse como se ha descrito anteriormente para un único conjunto de pozos para una única cavidad 142 en el que algunos de los pozos de cada conjunto se cambian periódicamente para conseguir una disolución más uniforme del recurso mineral para cumplir con los requisitos de explotación y producción.

60 La Fig. 15 ilustra el "Método II" que es otra realización del paso de conmutación (d) de pozos que utiliza la disposición de campo multi-pozos ilustrada en la Fig. 13d. Este Método II implica la técnica de conmutación de "secuencia concéntrica", en la cual los pozos externos en la periferia (en el anillo 144) de la megacavidad 143 se usan como pozos de inyección para que el solvente fluya hacia los pozos internos en la porción central 145 de la megacavidad 143 utilizada como pozos de producción, evitando a veces los pozos inactivos intercalados entre pozos activos en el anillo 144 y la región central 145. Periódicamente, las operaciones de los pozos exteriores en el anillo externo 144 y los pozos interiores en la región central 145 se cambian de inyección de solvente a la producción de salmuera y viceversa.

65

La Fig. 16 ilustra el "Método III" que es otra técnica más del paso de conmutación (d) de pozos que utiliza la disposición de campo multi-pozos ilustrada en la Fig. 13d. Este Método III incluye la técnica de conmutación de "secuencia rotacional", en la que el paso de conmutación (d) del modo de operación se realiza en pozos periféricos del conjunto para impartir un movimiento giratorio de solvente alrededor de un pozo centrado del conjunto. Los pozos en una porción (cuadrante 146) de la megacavidad 143 se operan en modo de inyección y los pozos en la porción opuesta (cuadrante 147) de la megacavidad 143 se operan en modo de producción, mientras que los pozos restantes en los conjuntos en las porciones opuestas (cuadrantes 148 y 149) de la megacavidad 143 están inactivos. Para la conmutación giratoria, el modo de los pozos en el cuadrante 146 se cambia de modo de inyección a inactivo, mientras que los pozos en el cuadrante adyacente 148 se cambian de modo inactivo a modo de inyección; y al mismo tiempo, el modo de los pozos en el cuadrante 147 cambia de modo de producción a inactivo, mientras que los pozos en el cuadrante adyacente 149 se cambian de modo inactivo a modo de producción. Aunque el Método III de conmutación giratoria en el conjunto multi-pozos en comunicación fluida con la megacavidad 143 se ilustra en el sentido de las agujas del reloj, también se aplica una técnica de rotación en sentido antihorario. Una alternativa para cambiar todo el cuadrante de pozos sería cambiar parcialmente conjuntos de pozos en cada cuadrante para rotar los cuadrantes en incrementos más pequeños. En realizaciones alternativas o adicionales de este Método III de conmutación giratoria en el conjunto multi-pozos en comunicación fluida con la megacavidad 143, una vez que el movimiento giratorio del solvente se establece alrededor del pozo de producción centrado (desencadenando varios eventos de inyección de solvente) para formar una masa lentamente giratoria de salmuera casi homogénea a o próxima a saturación en el pozo de producción centrado, el Método III de conmutación giratoria puede incluir además invertir el movimiento giratorio del disolvente alrededor del mismo pozo de producción centrado (tal como desencadenar los diversos eventos de inyección de disolvente como se ha descrito anteriormente en los diversos cuadrantes pero en orden inverso).

La Fig. 17 ilustra una realización alternativa del paso de conmutación (d) de pozos identificada como 'Método IV' que utiliza la disposición de campo multi-pozos ilustrada en la Fig. 13d. Este Método IV incluye la técnica de conmutación de "secuencia en banco". Los pozos en dos cuadrantes adyacentes 150a y 150b (así en una sección media) de la megacavidad 143 se operan en modo de inyección y los pozos en los dos cuadrantes adyacentes opuestos 151a y 151b (en la otra media sección) de la megacavidad 143 se operan en modo de producción. En una realización, el modo de los pozos en la mitad de la sección 150a + 150b se cambia de inyección a producción, mientras que al mismo tiempo, los pozos de la otra mitad de la sección 151a + 151b se cambian del modo de producción al de inyección. En una realización alternativa, el modo de los pozos en el cuadrante 150a se cambia de inyección a producción, mientras que al mismo tiempo, los pozos en el cuadrante opuesto 151a se cambian de modo de producción a inyección, de modo que los pozos en la mitad de la sección 150b + 151a son todos operados bajo modo de inyección, y los pozos en la mitad de la sección 150a + 151b se operan en modo de producción.

La Fig. 18 ilustra otra realización más del paso de conmutación (d) de pozos identificada como 'Método V' que utiliza la disposición de campo multi-pozos ilustrada en la Fig. 13d. Este Método V incluye la técnica de conmutación de "secuencia aleatoria". El modo operativo no necesariamente sigue un marco de tiempo específico o periódico y/o un orden específico de las operaciones del modo de conmutación entre el conjunto multi-pozo. Por el contrario, en esta realización, la selección de los pozos que están en modo de inyección, producción o inactivo puede realizarse basándose en restricciones específicas determinadas a partir de los requisitos de producción o seleccionadas al azar dentro de las limitaciones de los requisitos de flujo. Por ejemplo, el cambio de pozo (d) puede tener lugar en respuesta a la medición de parámetros seleccionados que son indicadores clave del rendimiento de la extracción en solución de mineral. Por otro lado, el cambio de pozo (d) puede tener lugar en marcos temporales y ubicaciones de pozos aleatorios que están definidos por un algoritmo apropiado diseñado para este propósito.

En aún otras realizaciones (no ilustradas) del paso de conmutación (d) de pozos identificadas como 'Método VI' que utilizan la disposición de campo multi-pozos ilustrada en la Fig. 13d, el conjunto de pozos comprende los pozos más exteriores, estos pozos que preferiblemente rodean los pozos más internos que incluyen uno o más pozos centrados. En dichas realizaciones, el cambio del modo de operación en el paso (d) para algunos o todos estos pozos más externos se puede hacer con más frecuencia que para los pozos más internos. En realizaciones preferidas, el cambio del modo de operación en el paso (d) para los pozos más externos en el conjunto se realiza preferiblemente dos veces más a menudo, más preferiblemente tres veces más a menudo, que para los pozos más internos.

Las Figs. 19a y 19b ilustran otras dos disposiciones de una pluralidad de pozos en comunicación fluida con una pluralidad de cavidades interconectadas de acuerdo con una realización de la presente invención, cada cavidad que se forma a partir de al menos un pozo central por desplazamiento litológico.

La disposición en la Fig. 19a para el conjunto multi-pozos es similar a la disposición en la Fig. 3c porque las diversas cavidades 142 se inician desde un pozo central 30 por desplazamiento litológico, pero en lugar de tener cavidades completamente solapadas 142, las cavidades 142 en las Figs. 19a y 19b no se superponen por completo, y en la mayoría de los casos solo intersecan entre sí en el borde de las cavidades 142 (una intersección de un punto entre dos cavidades adyacentes). En general, estas cavidades 142 son tangentes en un empaquetamiento compacto circular, ya sea en un campo de pozos algo circular como se muestra en la Fig. 19a, en el cual los pozos centrales 30 están ubicados en los vértices y el centro de un hexágono 165 (similar a la Fig. 13a) o en un campo de pozos

algo paralelepípedo como se muestra en la Fig. 19b, en el que los pozos centrales 30 de las cavidades 142 están ubicados en los vértices de los paralelogramos 166 (preferiblemente rombos).

En estas disposiciones de 'empaquetamiento compacto circular' en la Fig. 19a y 19b, hay una porción del mineral que permanece en forma de pilares 170 de mineral de forma algo triangular. Algunos (o todos) los pilares 170 de mineral pueden disolverse cambiando los pozos, preferiblemente los más cercanos a los pilares 170, entre modos de inyección y producción. Como alternativa, algunos (o todos) los pilares 170 de mineral pueden dejarse en su lugar, dependiendo del estado mecánico de la sobrecarga. Con los pilares 170 de mineral en su lugar, la relación de extracción teórica del mineral en el perímetro 155 de la megacavidad 143' como se muestra en la Fig. 19b es del 90,6 %.

En vista de las diversas configuraciones del conjunto multi-pozos y sus diferentes técnicas disponibles para llevar a cabo la explotación de la mena de mineral, se prevé que cualquiera de las realizaciones descritas anteriormente pueda usarse en cualquier combinación.

Solvente de producción y salmuera resultante

El solvente de producción utilizado para la disolución mineral evaporítica en el paso (b) puede ser agua o puede comprender una solución acuosa que comprende un soluto deseado (por ejemplo, al menos un componente mineral de evaporita tal como al menos un valor alcalino).

El solvente de producción empleado en dicho método de extracción en solución de trona in situ puede contener o puede consistir esencialmente en agua o una solución acuosa saturada en soluto deseado en el que el soluto deseado se selecciona del grupo que consiste en sesquicarbonato de sodio, carbonato de sodio, bicarbonato de sodio, y mezclas de los mismos.

El agua en el solvente de producción puede originarse a partir de fuentes naturales de agua dulce, como ríos o lagos, o puede ser un agua tratada, como una corriente de agua que sale de una instalación de tratamiento de aguas residuales. El solvente de producción puede ser cáustico. Una solución acuosa en el solvente de producción puede contener un compuesto soluble, tal como hidróxido de sodio, sosa cáustica, cualquier otra base, uno o más ácidos, o cualquier combinación de dos o más de los mismos.

En el caso del estrato de trona, el solvente de producción puede ser una solución acuosa que contiene una base (tal como sosa cáustica) u otro compuesto que puede potenciar la disolución de la trona en el solvente. El solvente de producción puede comprender al menos en parte una solución acuosa que está insaturada en el soluto deseado, por ejemplo, una solución que está insaturada en carbonato de sodio y que se recicla a partir del mismo lecho de trona diana minado en solución y/o a partir de otro lecho de trona minado en solución que puede estar adyacente o debajo del lecho de trona diana.

El solvente de producción puede precalentarse a una temperatura predeterminada para aumentar la solubilidad de la mena de mineral.

El solvente de producción empleado como solvente en el paso de minería de la solución de trona in situ puede comprender o puede consistir esencialmente en una solución cáustica débil para que dicha solución pueda tener una o más de las siguientes ventajas. La disolución de los valores de sodio con una solución cáustica débil es más efectiva, por lo que requiere menos tiempo de contacto con el mineral de trona. El uso de la solución cáustica débil también elimina el efecto de "cegamiento de bicarbonato", ya que facilita la conversión in situ de bicarbonato de sodio a carbonato de sodio (en lugar de realizar la conversión ex situ en la superficie después de la extracción a la superficie). También permite una mayor disolución de bicarbonato de sodio de lo que normalmente se disolvería con agua sola, lo que proporciona un aumento en la tasa de producción. Además, puede dejar en la cavidad minada un carbonato insoluble tal como carbonato de calcio que puede ser útil durante la operación minera.

Debe observarse que la composición del solvente utilizado como solvente de producción puede modificarse durante el curso de la operación de extracción en solución de trona. Por ejemplo, se puede usar agua como solvente de producción para formar inicialmente una cavidad minada en la cara libre de la trona, mientras que puede añadirse hidróxido de sodio al agua en un momento posterior para efectuar, por ejemplo, la conversión de bicarbonato en carbonato durante el paso de producción de extracción en solución, lo que resulta en una mayor extracción de los valores alcalinos deseados del estrato de trona 5.

La temperatura de la superficie del solvente de producción inyectado puede variar de 0 °C (32 °F) a 121 °C (250 °F), preferiblemente hasta 104 °C (220 °F).

La temperatura del solvente de producción puede estar entre 17,7 °C (0 °F) y 104 °C (200 °F), o entre 40 y 80 °C (104 y 176 °F), o entre 60 y 80 °C (140 y 176 °F), o entre 37,8 y 65,6 °C (100 y 150 °F). Cuanto mayor sea la temperatura del solvente inyectado, mayor será la velocidad de disolución en el punto de inyección y cerca del mismo.

Mientras el solvente de producción se inyecta a través del primer subconjunto de pozos operados en modo inyección en al menos una cavidad en el paso (b), el solvente contacta la cara libre de minerales a medida que el solvente fluye a través de al menos una cavidad y se disuelve in situ en al menos una porción del mineral de la cara libre en el solvente para formar una salmuera. La salmuera contiene minerales disueltos.

5 Para la extracción en solución de trona, la salmuera preferiblemente comprende carbonato de sodio, bicarbonato de sodio o combinaciones de los mismos.

10 En realizaciones preferidas en las que se disuelve trona, la disolución dentro de la cavidad puede ser suficiente para obtener una salmuera saturada en carbonato de sodio y/o bicarbonato de sodio. La disolución de trona dentro de la cavidad puede ser suficiente para obtener un contenido de AT en la salmuera de al menos el 8 % en peso, preferiblemente de al menos el 10 %, más preferiblemente de al menos el 15 %.

15 La disolución de la mena de mineral en el espacio o cavidad interfacial se puede llevar a cabo a la presión de la cabeza hidrostática (a la profundidad a la que se agranda la cavidad minada en solución), en la que el espacio o cavidad interfacial se llena con solvente. Al inundar el intersticio de la interfaz o la cavidad, el solvente de producción entra en contacto con el techo del intersticio de la interfaz o cavidad y, al contacto con la mena de mineral, lo disuelve.

20 Debido a que el estrato mineral no es puro (contiene materia insoluble), se puede depositar una capa de insolubles durante la disolución en la cavidad minada. Esta capa de insolubles separa el suelo y el techo de la cavidad minada, al mismo tiempo que soporta mecánicamente el techo de la cavidad y mantiene la superficie libre del mineral en el techo de la cavidad accesible al solvente de producción. La capa de insolubles en el fondo de la cavidad minada en solución puede proporcionar un canal de flujo (poroso) en la cavidad para que la salmuera fluya a su través. Dicha
25 capa insoluble se vuelve más gruesa a medida que se disuelve más y más mineral del techo de la cavidad, y proporciona, a través de su porosidad, un canal a través del cual puede pasar el solvente de producción.

30 Cuando la cavidad minada es autosoportada por escombros minerales fracturados del techo de la cavidad y/o por una capa de material insoluble en agua, la disolución mineral se puede llevar a cabo a una presión hidráulica por debajo de la presión de la cabeza hidrostática. Esto se realiza preferiblemente cuando el desarrollo de la cavidad minada está maduro, es decir, cuando la cavidad mineral creada por varias rondas de disolución es ahora autosuficiente sin tener que aplicar una presión hidráulica superior a la presión de sobrecarga para mantenerla abierta. Debido al peso excesivo de la sobrecarga en un espacio del techo sin soporte de la cavidad mineral, los bloques de escombros minerales se fracturan y ahora se encuentran dentro de la cavidad mineral. En este caso, la
35 cavidad no solo contiene una capa de insolubles sino que también contiene escombros minerales que ahora soportan el techo de la cavidad. En esta situación, no es necesario inundar la cavidad con el solvente de producción para acceder a la superficie libre de mineral del techo de la cavidad, porque los escombros minerales ahora dentro de la cavidad proporcionan una gran cantidad de superficies libres de mineral para que el solvente de producción entre en contacto y se disuelva para formar la salmuera.

40 En el paso (c), al menos una porción de dicha salmuera se extrae a la superficie del suelo a través del segundo subconjunto de pozos operados en modo de producción. La salmuera extraída a través del segundo subconjunto de pozos (en modo de producción) puede reciclarse en parte y reinyectarse en la cavidad para un enriquecimiento adicional en el mineral, especialmente cuando el contenido del soluto mineral deseado de la salmuera no es
45 suficientemente alto.

La salmuera que se retira a la superficie puede tener una temperatura superficial generalmente inferior a la temperatura superficial del solvente de producción en el momento de la inyección. La temperatura superficial en la salmuera extraída puede ser al menos 3 °C inferior, o al menos 5 °C inferior, o al menos 8 °C inferior, o incluso al
50 menos 10 °C inferior, que la temperatura superficial del solvente de producción inyectado.

La salmuera extraída preferiblemente tiene un contenido de cloruro que es igual o inferior al 0,5 % en peso.

55 La temperatura del solvente de producción inyectado generalmente cambia desde su punto de inyección a medida que se expone a la trona. Debido a que la temperatura del solvente en el momento de la inyección generalmente es más alta que la temperatura in situ del estrato de trona, la salmuera pierde algo de calor a medida que fluye a través de la cavidad minada hasta que la salmuera se extrae a la superficie.

60 El flujo de solvente de producción puede depender del tamaño de la cavidad, tal como la longitud de su trayectoria de flujo dentro de la cavidad, el tiempo de contacto deseado con el mineral para disolver el mineral de la cara libre, así como la fase de desarrollo de la cavidad si es incipiente para la formación continua o madura para la producción en curso. Por ejemplo, el caudal de fluido inyectado en los pozos de inyección puede variar de 9 a 477 metros cúbicos por hora (m³/h) [42-2100 galones por minuto o 1 a 50 barriles por minuto]; de 11 a 228 m³/h [50-1000 GPM o 1,2-23,8 BBL/min]; o de 13 a 114 m³/h (60-500 GPM o 1,4-11,9 BBL/min); o de 16 a 45 m³/h (70-200 GPM o 1,7-4,8
65 BBL/min); o de 20 a 25 m³/h (88-110 GPM o 2,1-2,6 BBL/min).

La disolución del soluto deseado se puede llevar a cabo a una presión inferior a la presión de la cabeza hidrostática, o se puede llevar a cabo a la presión de la cabeza hidrostática. La presión puede variar según la profundidad del lecho de mineral diana. La disolución del soluto deseado se puede llevar a cabo a una presión inferior a la presión de la cabeza hidrostática (a la profundidad a la que se forma la cavidad minada en la solución) durante el desplazamiento hidráulico. La disolución del soluto deseado se puede llevar a cabo a la presión de la cabeza hidrostática después de que se forme una cavidad minada, por ejemplo, durante una fase de producción en la que el espacio vacío en el estrato de trona que contiene insolubles se llena con solvente líquido.

El método de extracción en solución puede comprender además inyectar un fluido de manto, tal como gas comprimido (aire, N₂) en la cavidad de extracción para evitar la disolución del techo de mineral en el solvente de producción.

Con respecto a cualquiera o todas las realizaciones de la presente invención, en el caso de que aparezca un fenómeno de "canalización" durante la extracción en solución, uno de los posibles remedios podría conseguirse de manera efectiva fluctuando periódicamente los flujos del solvente a través de los diversos pozos interconectados en el primer subconjunto. De esta forma, el solvente insaturado se forzaría desde los canales de derivación y el mineral fresco estaría expuesto al solvente de producción.

Otro posible remedio se puede conseguir de manera efectiva introduciendo relaves insolubles cuando se inyecta el solvente de producción para alterar la ruta de flujo de estos canales de derivación así formados y exponer el solvente a mineral fresco. Se prevé que los relaves puedan inyectarse periódicamente, de manera intermitente o de manera continua. En general, este desarrollo de cavidades puede proporcionarse efectivamente a las áreas deseadas mediante el uso de relaves para dirigir los flujos y las velocidades de flujo, la temperatura y los niveles de saturación variables del solvente de producción inyectado. Los relaves también pueden actuar para formar una barrera desde el suelo subyacente (piso de pizarra) y contaminantes que potencialmente pueden caer desde las áreas superiores del estrato de trona. El solvente de producción puede incluir relaves que luego se depositan sobre el suelo de la cavidad minada. Los relaves depositados cambian las trayectorias de flujo mediante efectos de represamiento y dirigen el flujo de disolvente para complementar el impacto de los modos de operación de conmutación de algunos o todos los pozos desde la producción a la inyección y viceversa de acuerdo con la presente invención.

En otra realización más de la presente invención, el método de extracción en solución para mineral de trona usa la capa de roca insoluble que se deposita en la cavidad minada formada por la disolución de la trona. Esta capa de insolubles separa el suelo y el techo de la cavidad minada, mientras soporta mecánicamente el techo de la cavidad, siendo esta última la interfaz inferior para los escombros de la trona y el estrato de trona por encima de ella. Dicha capa insoluble se vuelve más gruesa a medida que se disuelve más y más de la sobrecarga de trona, y proporciona, a través de su porosidad, un canal a través del cual puede pasar el solvente.

Con respecto a cualquiera o todas las realizaciones de la presente invención, en el caso de que aparezca un fenómeno de "cegamiento de bicarbonato" durante la extracción en solución, la conmutación del modo de operación de al menos un pozo según el paso (d) desde la producción a la inyección arrojaría el solvente de producción (insaturado) cerca del bicarbonato de sodio que se deposita cerca del fondo del pozo cuando se opera en modo de producción. La inyección de solvente en esta área se dirige a una disolución más rápida del bicarbonato de sodio depositado y minimiza la obstrucción de la cara del mineral.

En otro aspecto, la presente invención también se refiere a un proceso de fabricación para fabricar uno o más productos basados en sodio a partir de un estrato mineral evaporítico que comprende un mineral soluble en agua seleccionado del grupo que consiste en trona, nahcolita, wegecheiderita y combinaciones de las mismas, dicho proceso que comprende:

- llevar a cabo cualquier aspecto o realización del método de acuerdo con la presente invención para minar el estrato de trona y disolver la trona de la superficie libre de mineral principal creada en la interfaz de los estratos en un solvente para obtener una salmuera que comprende carbonato de sodio y/o bicarbonato de sodio, y
- pasar al menos una porción de dicha salmuera a través de una o más unidades seleccionadas del grupo que consiste en un cristalizador, un reactor y una unidad de electrodiálisis, para formar al menos un producto a base de sodio.

En la extracción en solución de trona, la salmuera extraída a la superficie puede usarse para recuperar los valores de álcali.

Pueden encontrarse ejemplos de recuperación adecuada de valores de sodio tales como ceniza de sosa, sesquicarbonato de sodio, decahidrato de carbonato de sodio, bicarbonato de sodio y/o cualquier otro producto químico a base de sodio de una salmuera extraída en solución en las divulgaciones de Patente de Estados Unidos n.º 3.119.655 de Frint et al.; Patente de Estados Unidos n.º 3.050.290 de Caldwell et al.; Patente de Estados Unidos 3.361.540 de Peverley et al.; Patente de Estados Unidos n.º 5.262.134 de Frint et al.; y Patente de Estados Unidos n.º 7.507.388 de Ceylan et al., y estas divulgaciones se incorporan en la presente solicitud por referencia.

Otro ejemplo de recuperación de los valores de sodio es la producción de hidróxido de sodio a partir de una salmuera extraída en solución. La Patente de Estados Unidos n.º 4.652.054 de Copenhague et al. desvela un proceso de extracción en solución de un yacimiento subterráneo de mineral de trona con hidróxido de sodio acuoso preparado electrodiálíticamente en una celda de tres zonas en la que se recupera la ceniza de sosa de la solución de extracción extraída. La Patente de Estados Unidos n.º 4.498.706 de Ilardi et al. desvela el uso de coproductos de unidades de electrodiálisis, cloruro de hidrógeno e hidróxido de sodio, como solventes acuosos separados en un proceso de extracción en solución integrada para la recuperación de ceniza de sosa. El hidróxido de sodio acuoso producido electrodiálíticamente se utiliza como solvente de extracción en solución primaria y el cloruro de hidrógeno acuoso coproducido se usa para minar en solución yacimientos de minerales contaminados con NaCl para recuperar una alimentación de salmuera para la operación de la unidad de electrodiálisis. Estas patentes se incorporan en el presente documento como referencia por sus enseñanzas relativas a la extracción en solución con una solución acuosa de un álcali, tal como hidróxido sódico y con respecto a la preparación de un solvente acuoso que contiene hidróxido sódico mediante electrodiálisis.

El proceso de fabricación puede comprender: pasar al menos una porción de la salmuera que comprende carbonato de sodio y/o bicarbonato de sodio:

- a través de un cristizador de sesquicarbonato de sodio bajo condiciones de cristalización que promueven la formación de cristales de sesquicarbonato sódico;
- a través de un cristizador de monohidrato de carbonato de sodio bajo condiciones de cristalización que promueven la formación de cristales de monohidrato de carbonato de sodio;
- a través de un cristizador de carbonato de sodio bajo condiciones de cristalización que promueven la formación de cristales de carbonato de sodio anhidro;
- a través de un cristizador de hidrato de carbonato de sodio bajo condiciones de cristalización que promueven la formación de cristales de decahidrato o heptahidrato de carbonato de sodio;
- a una planta de sulfito de sodio donde el carbonato de sodio se hace reaccionar con dióxido de azufre para formar una corriente que contiene sulfito de sodio que se alimenta a través de un cristizador de sulfito de sodio bajo condiciones de cristalización que promueven la formación de cristales de sulfito de sodio; y/o
- a través de un reactor/cristizador de bicarbonato sódico bajo condiciones de cristalización que promueven la cristalización que comprende el paso de dióxido de carbono para formar cristales de bicarbonato sódico.

En cualquier realización de la presente invención, el proceso además puede incluir pasar al menos una porción de la salmuera a través de una o más unidades de electrodiálisis para formar una solución que contiene hidróxido de sodio. Esta solución que contiene hidróxido de sodio puede proporcionar al menos una parte del fluido de elevación que se inyectará en el intersticio para el paso de elevación y/o puede proporcionar al menos una parte del solvente de producción que se inyectará en la cavidad para el paso de disolución.

En cualquier realización de la presente invención, el proceso puede comprender además el tratamiento previo y/o el enriquecimiento con un mineral sólido y/o la purificación (eliminación de impurezas) de la salmuera extraída antes de fabricar dicho producto.

La presente invención se refiere además a un producto a base de sodio obtenido mediante el proceso de fabricación de acuerdo con la presente invención, seleccionándose dicho producto del grupo que consiste en sesquicarbonato sódico, carbonato sódico monohidratado, carbonato sódico decahidratado, carbonato sódico heptahidratado, carbonato sódico anhidro, bicarbonato de sodio, sulfito de sodio, bisulfito de sodio, hidróxido de sodio y otros derivados.

Habiéndose descrito en general la presente invención, los siguientes ejemplos se dan como realizaciones particulares de la invención y para demostrar la práctica y ventajas de la misma. Se entiende que los ejemplos se dan a modo de ilustración y no están destinados a limitar de ninguna manera la memoria descriptiva o las reivindicaciones siguientes.

Ejemplos

Ejemplo 1:

Se investigó la disolución del mineral en un conjunto de 7 pozos, como se ilustra en la Fig. 4e (patrón hexagonal para la disposición del pozo), que está en comunicación fluida con una cavidad creada por desplazamiento litológico, a través de modelos informáticos para encontrar los patrones de flujo de inyección/producción óptimos.

Cada pozo en el conjunto puede ser un pozo de inyección, un pozo de producción o un pozo inactivo. Las restricciones aplicadas en el conjunto de 7 pozos fueron las siguientes: cada conjunto de 7 pozos tenía al menos un pozo de producción y al menos un pozo de inyección, y por lo tanto podría tener de 0 hasta 5 pozos inactivos.

Para este patrón de 7 pozos y restricciones, hay 1932 posibles patrones de inyección/producción. De los 1932 patrones posibles, solo 255 patrones de flujo fundamentales son únicos después de considerar las simetrías de

reflexión y rotación de la forma hexagonal, y el resto de los patrones se derivan de las simetrías de reflexión y rotación. Un patrón de flujo fundamental de 7 pozos podría tener desde 0 patrones derivados hasta 11 patrones derivados. Por ejemplo, las Figs. 4b a 4d ilustran tres de los patrones de flujo derivados del patrón de flujo fundamental ilustrado en la Fig. 4a.

5 Se estima que la combinación del uso de todos los 1932 patrones de flujo de 7 pozos en el paso de conmutación proporcionaría aproximadamente un 60 % de uniformidad de disolución de la cavidad. Sin embargo, los patrones de flujo específicos (fundamentales + derivados) pueden proporcionar una mejor uniformidad de disolución que los patrones seleccionados al azar. Las selecciones de patrones óptimos pueden proporcionar al menos un 70 % de uniformidad de disolución, preferiblemente al menos un 75 % de uniformidad de disolución, más preferiblemente al menos un 80 % de uniformidad de disolución, lo más preferiblemente al menos un 85 % de uniformidad de disolución. Se espera además que mediante la aplicación de conmutación repetitiva entre los diversos patrones de flujo (fundamentales + derivados) que producen los niveles más altos (por ejemplo, más del 85 %) de uniformidad de disolución, sea posible conseguir una uniformidad de disolución cercana al 100 %.

15 La TABLA 2 proporciona la uniformidad de disolución estimada para 18 ejemplos de patrones de 7 pozos (pozos que cambian en los patrones de flujo fundamentales y derivados) usando la configuración hexagonal en la Fig. 4e con un pozo central 30 y seis pozos periféricos 45x (x es de a a f). El modo de operación para cada uno de los 7 pozos en el patrón de flujo fundamental en los Ejemplos 1A-1R se identifica en la TABLA 2 como 'I' para pozo de inyección, 'P' para pozo de producción y 'C' para pozo inactivo (o cerrado).

TABLA 2

Ej. N.º	Posición del pozo en el patrón hexagonal de la Fig. 4e							N.º de patrones derivados	Uniformidad estimada de disolución (%)
	30	45a	45b	45c	45d	45e	45f		
1A	P	C	C	I	c	I	I	11	89,27
1B	P	C	I	P	I	C	P	5	88,92
1C	P	C	C	C	I	P	I	5	88,81
1D	P	C	C	C	I	P	P	11	88,73
1E	P	C	C	I	C	P	I	11	88,71
1F	P	C	I	C	I	P	P	11	88,68
1G	P	C	C	C	I	C	P	5	88,25
1H	P	C	C	I	C	I	P	11	88,22
1I	P	C	I	P	I	P	P	11	87,97
1J	C	C	C	I	P	P	P	11	87,82
1K	C	C	C	I	P	C	P	11	87,61
1L	P	C	C	I	C	C	I	2	87,57
1M	P	C	I	C	I	C	P	5	87,41
1N	P	C	I	C	I	I	I	5	87,15
1O	P	C	I	C	I	P	I	5	87,03
1P	I	C	I	I	C	P	P	5	Pobre
1Q	I	C	I	I	I	P	P	11	Pobre
1R	I	I	I	I	P	P	P	5	Pobre

25 Los Ejemplos 1A a 1O demuestran una disolución uniforme superior al 85 % de la cavidad (del 87 al 90 %). Las Figs. 20a, 21a, 22a, 23a, 24a ilustran los patrones de flujo fundamentales de 7 pozos de los Ejemplos 1A, 1D, 1G, 1J y 1M, respectivamente, mientras que las Figs. 20b, 21b, 22b, 23b, 24b ilustran la disolución de la cavidad resultante estimada cambiando el modo de operación del pozo para cada patrón fundamental respectivo y sus patrones derivados, el color más oscuro indica áreas de mayor disolución vertical. La mayoría de los patrones de flujo fundamentales de 7 pozos con una disolución relativamente uniforme (> 85 %) parecen tener un pozo de producción o inactivo en el pozo central 30.

30 En el otro extremo, los Ejemplos 1P a 1R proporcionan una disolución pobre e irregular de la cavidad. Las Figs. 25a, 26a, 27a ilustran los patrones de flujo fundamentales de 7 pozos de los Ejemplos 1P, 1Q, 1R, respectivamente, mientras que las Figs. 25b, 26b, 27b ilustran la disolución de la cavidad desigual resultante estimada mediante el cambio del modo de operación del pozo usando cada patrón fundamental respectivo y sus patrones derivados, el

color más claro indica áreas de disolución vertical pobre. La mayoría de los patrones de flujo fundamentales de 7 pozos con disolución relativamente desigual parecen tener un pozo de inyección en el pozo central 30.

5 Los Ejemplos 1A a 1R anteriores muestran los resultados del modelado para la uniformidad de disolución cuando se usa cada patrón de flujo fundamental con sus patrones derivados (basados en la simetría y la rotación); sin embargo, pueden emplearse diversos patrones de flujo fundamentales y los patrones derivados respectivos para el paso de conmutación (d), y el resultado en la uniformidad de disolución excedería lo que se puede conseguir con un patrón de flujo fundamental único.

10 Ejemplo 2:

15 Se investigó la disolución del mineral en un conjunto de 31 pozos, como se ilustra en la Fig. 13c (un conjunto con 1 patrón hexagonal central y 6 patrones hexagonales periféricos contiguos), que está en comunicación fluida con una cavidad creada por desplazamiento litológico a través de modelos informáticos para encontrar los patrones de flujo de inyección/producción óptimos. Un conjunto de pozos así de grande debería ser capaz de producir volúmenes suficientes de salmuera de sodio extraída en solución para proporcionar una porción sustancial de una alimentación de mineral para una planta de escala comercial. Por lo tanto, un conjunto de 31 pozos se consideraría un "campo de pozos" en aplicaciones prácticas.

20 Para este patrón de 31 pozos, hay más de 617 billones de posibles patrones de operación del pozo. Para limitar el número de experimentos de modelado, los patrones de 31 pozos se limitaron al uso inicial en cada patrón hexagonal, un pozo de inyección en la posición 30 (pozo central en cada patrón hexagonal) y pozos de producción en las posiciones 45 (pozos periféricos en cada patrón hexagonal).

25 La alternancia entre los modos de inyección y producción en cada par de pozos adyacentes proporciona una buena uniformidad de disolución, especialmente en la región cubierta desde el pozo centrado del campo de 31 pozos hasta alrededor de los pozos centrales 30 de las 6 formas hexagonales periféricas. Sin embargo, se estima que la disolución es más pobre cerca del borde anular externo del campo de 31 pozos en la región cubierta desde aproximadamente los pozos centrados 30 de los 6 patrones hexagonales periféricos hasta los pozos periféricos más exteriores 45.

35 Sorprendentemente, el solicitante ha encontrado mediante estas simulaciones que al aumentar la frecuencia de conmutación en el modo de operación en estos pares de pozos exteriores del patrón de 31 pozos en comparación con la conmutación en el modo de operación de los otros pares de pozos, la disolución se volvería más uniforme cerca de la región más externa del campo de 31 pozos. Además, estos estudios han indicado claramente que mediante el uso de patrones óptimos de conmutación de pozos, incluida la reinyección de salmueras insaturadas de ciertos pozos, se podría crear una salmuera de producción completamente saturada mientras se desarrollan perfiles de disolución altamente uniformes en áreas muy grandes. Alcanzar al menos entre un 85 % y casi un 100 % de uniformidad en la disolución de la cavidad, que se acerca o alcanza la saturación total de la salmuera (incluido el uso de reinyección de al menos una parte de la salmuera insaturada), y la operación de extracción y producción a gran escala se cree que son tres de los atributos clave en el éxito de un método de extracción en solución de trona in situ.

45 La divulgación de todas las solicitudes de patente, y las publicaciones citadas en este documento se incorporan en el presente documento por referencia, en la medida en que proporcionan detalles a modo de ejemplo, de procedimiento u otros detalles adicionales a los expuestos en el presente documento.

50 Si la divulgación de cualquiera de las patentes, solicitudes de patente y publicaciones que se incorporan en el presente documento como referencia entraran en conflicto con la presente memoria descriptiva en la medida en que pudiera dejar un término poco claro, tendrá prioridad la presente memoria descriptiva.

Por consiguiente, el alcance de protección no está limitado por la descripción expuesta anteriormente, sino que está limitado solo por las reivindicaciones que siguen, ese alcance que incluye todos los equivalentes del objeto de las reivindicaciones.

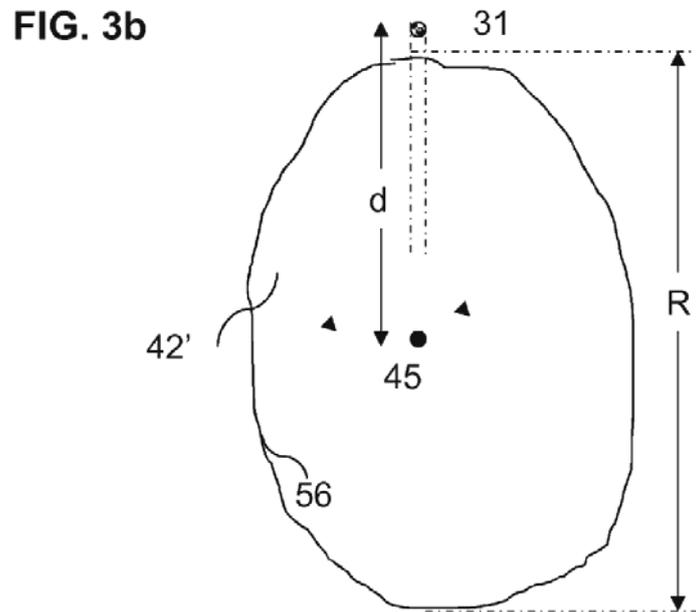
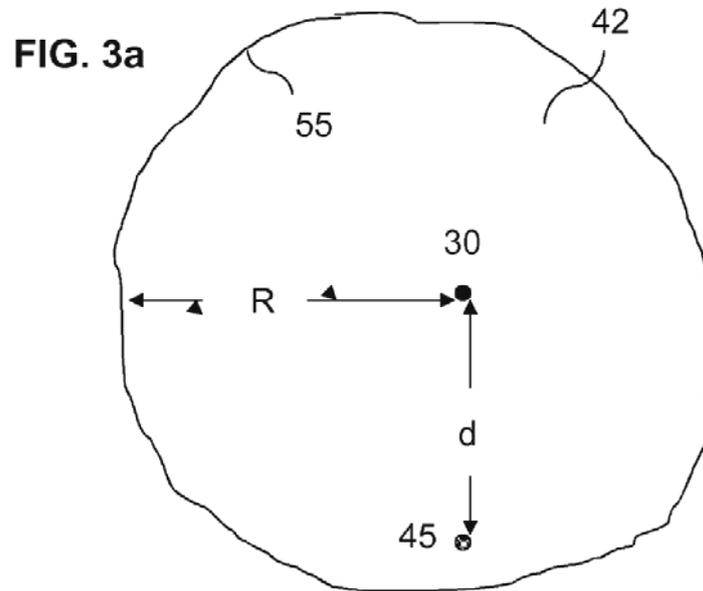
55 Todos y cada uno de las reivindicaciones se incorporan en la memoria descriptiva como una realización de la presente invención. Por lo tanto, las reivindicaciones son una descripción adicional y son una adición a las realizaciones preferidas de la presente invención.

60 Aunque se han mostrado y descrito realizaciones preferidas de esta invención, los expertos en la técnica pueden realizar modificaciones de la misma sin apartarse de las enseñanzas de esta invención. Las realizaciones descritas en este documento son solo a modo de ejemplo y no son limitantes. Muchas variaciones y modificaciones de sistemas y métodos son posibles y están dentro del alcance de la invención. Reivindicamos:

REIVINDICACIONES

1. En una formación subterránea que comprende un estrato mineral evaporítico que comprende trona, nahcolita, wegscheiderita, o combinaciones de las mismas, un método para la extracción en solución de un mineral evaporítico desde al menos una cavidad que tiene una cara libre de minerales, dicho método que comprende:
- (a) proporcionar un conjunto de al menos 3 pozos en comunicación fluida con al menos una cavidad, dicho conjunto que comprende un primer subconjunto de pozos de uno o más pozos operados en modo de inyección (I), un segundo subconjunto de pozos separados de uno o más pozos operados en modo de producción (P);
- (b) inyectar un solvente en la al menos una cavidad a través del primer subconjunto operado en modo de inyección (I) para que el solvente contacte con la cara libre de minerales a medida que el solvente fluye a través de al menos una cavidad y disolver in situ al menos una porción del mineral desde la cara libre hacia el solvente para formar una salmuera;
- (c) extraer al menos una porción de dicha salmuera a la superficie del suelo a través del segundo subconjunto de pozos operados en modo de producción (P);
- (d) cambiar el modo de operación de al menos un pozo del conjunto después de un período de tiempo adecuado; y
- (e) repetir los pasos (a) a (d);
- caracterizado por que:
- el conjunto de pozos comprende pozos más exteriores que rodean los pozos más interiores, y caracterizado por que el cambio del modo de operación en el paso (d) para al menos algunos de estos pozos más externos es más frecuente que para los pozos más interiores.
2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado por que el conjunto de pozos comprende un número 'n' de pozos con n igual o superior a 4, y caracterizado por que varios pozos que están por debajo de 'n' están dispuestos en uno o más patrones centrados en al menos un pozo central.
3. El método de acuerdo con la reivindicación 2, caracterizado por que el patrón tiene la forma de al menos un polígono con desde 3 hasta 16 lados, una forma de panal de abejas, o al menos una forma ovoide, preferiblemente un círculo, un óvalo, o un polígono con 4 a 6 lados.
4. El método de acuerdo con la reivindicación 2 o 3, caracterizado por que los pozos en el conjunto están emparejados, y caracterizado por que se proporcionan válvulas de cruce y se controlan de manera que los dos pozos emparejados sirven alternativamente como pozos de inyección y producción.
5. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que cuando se repite el paso (d) en el método, la conmutación del modo de operación en el paso (d) no se lleva a cabo en el mismo pozo(s) en el conjunto.
6. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que, cuando uno de los pozos cambia el modo de operación en el paso (d), la inyección de solvente y la producción de salmuera para este pozo se llevan a cabo mediante la misma bomba, preferiblemente por una misma bomba de superficie.
7. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el paso (d) comprende cambiar el modo de operación de al menos un pozo del primer subconjunto y también cambiar el modo de operación de al menos un pozo del segundo subconjunto después del período adecuado de tiempo.
8. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el estrato mineral evaporítico comprende también un mineral seleccionado del grupo que consiste en: shortita, northupita, pirssonita, dawsonita, silvita, carnalita, halita y combinaciones de las mismas.
9. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la al menos una cavidad está formada inicialmente por un desplazamiento litológico del estrato mineral, dicho desplazamiento litológico que se realiza cuando dicho estrato mineral está situado inmediatamente encima de un estrato insoluble en agua de una composición diferente con una interfaz de separación débil definida entre los dos estratos y sobre la que define una sobrecarga hasta el suelo, dicho desplazamiento litológico que comprende inyectar un fluido en la interfaz de separación para elevar el estrato evaporítico a una presión hidráulica de elevación superior a la presión de sobrecarga, formando así un intersticio de la interfaz que es una cavidad mineral naciente en la interfaz y creando dicha superficie libre de mineral.
10. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la al menos una cavidad está formada inicialmente por un desplazamiento litológico del estrato mineral, y en la que formar al menos una cavidad por desplazamiento litológico del estrato mineral comprende aplicar una presión hidráulica de elevación caracterizada por un gradiente de fractura entre 20,4 kPa/m (0,9 psi/pie) y 34 kPa/m (1,5 psi/pie).

11. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizado por que la al menos una cavidad está formada inicialmente a partir de al menos una sección no cubierta, preferiblemente a partir de al menos una sección horizontal no cubierta, de un pozo perforado direccionalmente a través del estrato mineral.
- 5 12. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el solvente inyectado en el paso (b) comprende una solución acuosa insaturada que comprende carbonato de sodio, bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio, hidróxido de calcio o combinaciones de los mismos.
- 10 13. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el método comprende además:
- llevar a cabo el paso (e): cambiar al menos un pozo del primer o segundo subconjunto desde un modo de inyección (I) o producción (P) a un modo inactivo (C); o
- 15 llevar a cabo el paso (e'): cambiar al menos un pozo del conjunto de un modo inactivo (C) a un modo de inyección (I) o de producción (P); o
- llevar a cabo los pasos (e) y (e') simultáneamente en al menos dos pozos diferentes del conjunto.
14. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el período de tiempo adecuado para el cambio del modo de operación en el paso (d) es de 1 hora a 1 semana.
- 20 15. Un proceso de fabricación para fabricar uno o más productos basados en sodio a partir de un estrato mineral evaporítico que comprende una mena de mineral soluble en agua seleccionada del grupo que consiste en trona, nahcolita, wegscheiderita y combinaciones de las mismas, preferiblemente a partir de un estrato mineral evaporítico que comprende trona, caracterizado por que el proceso comprende:
- 25 - llevar a cabo el método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores para disolver la mena de mineral soluble en agua de una cavidad en dicho estrato mineral evaporítico para obtener una salmuera que comprende carbonato de sodio y/o bicarbonato de sodio, y
- 30 - pasar al menos una porción de dicha salmuera a través de una o más unidades seleccionadas del grupo que consiste en un cristalizador, un reactor y una unidad de electrodiálisis, para formar al menos un producto a base de sodio,
- el al menos un producto a base de sodio que se selecciona del grupo que consiste en ceniza de sosa, bicarbonato de sodio, hidróxido de sodio, sulfito de sodio, sesquicarbonato de sodio, cualquier hidrato de carbonato de sodio y
- 35 cualquier combinación de los mismos.



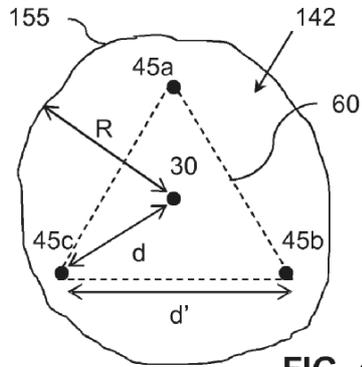


FIG. 4a

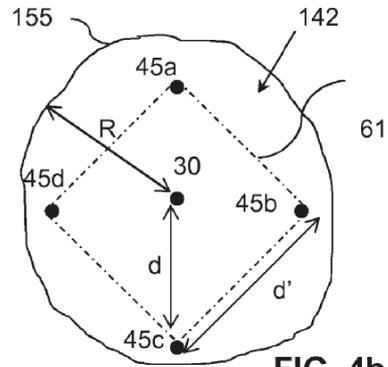


FIG. 4b

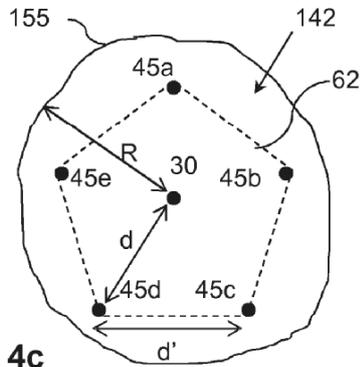


FIG. 4c

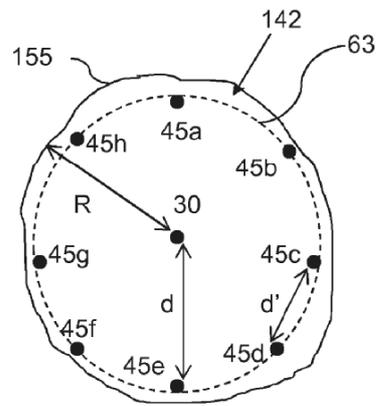


FIG. 4d

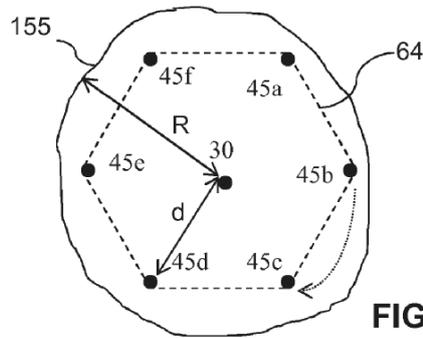


FIG. 4e

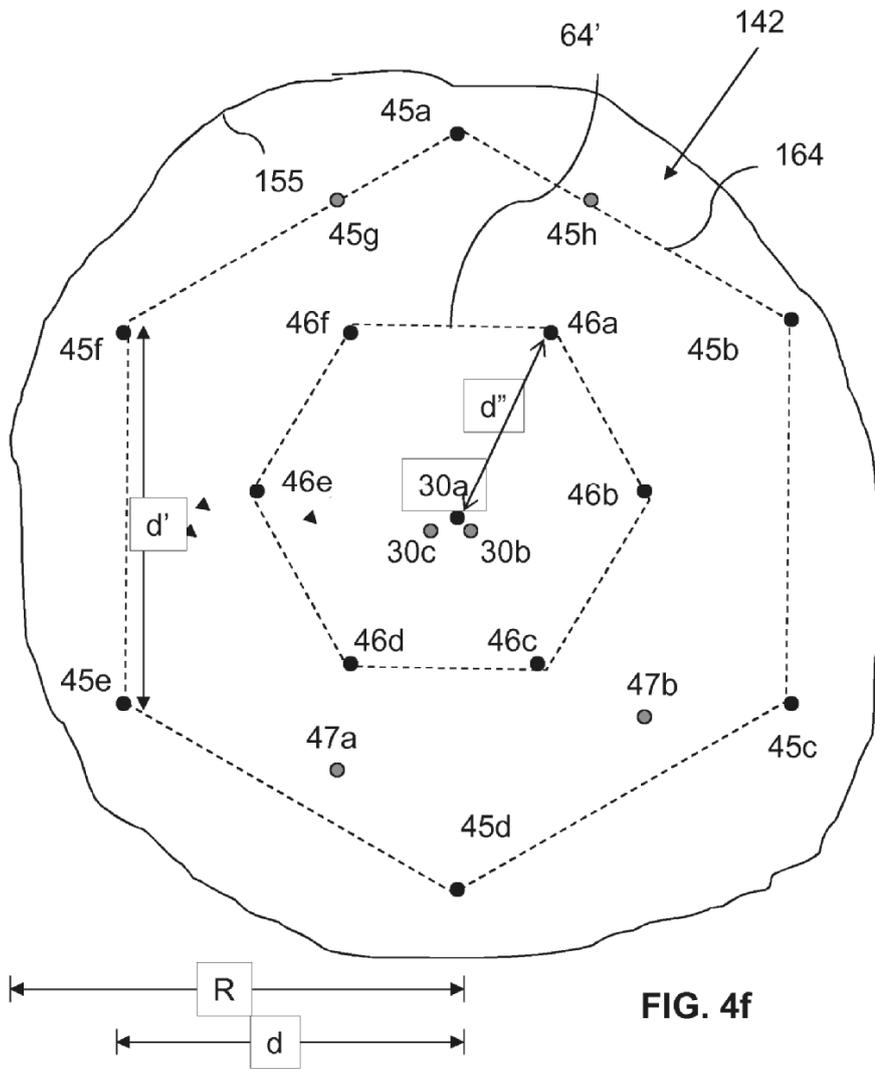
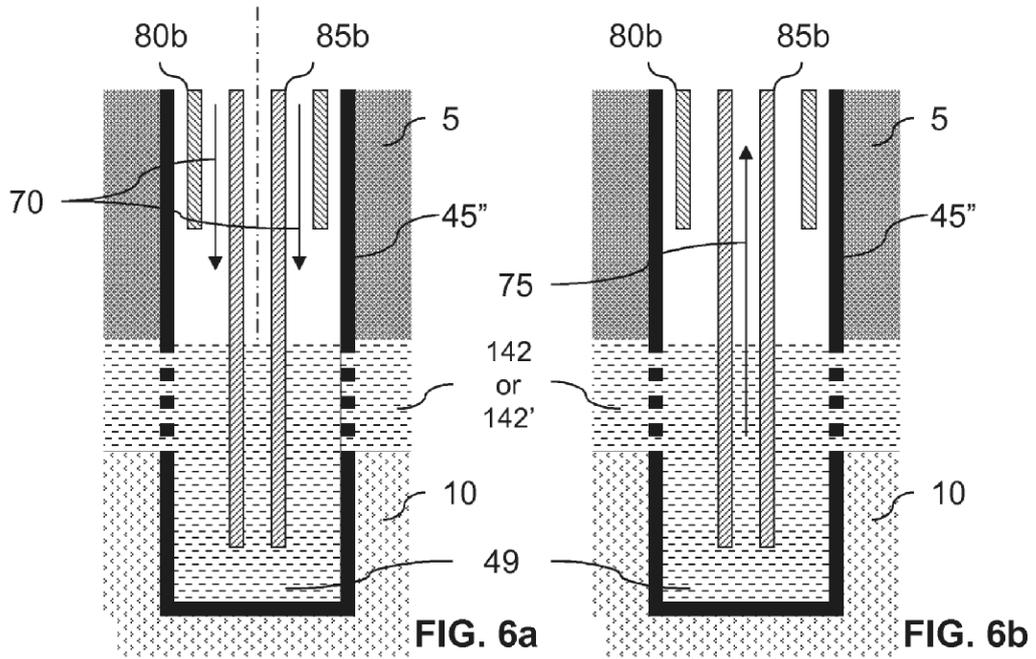
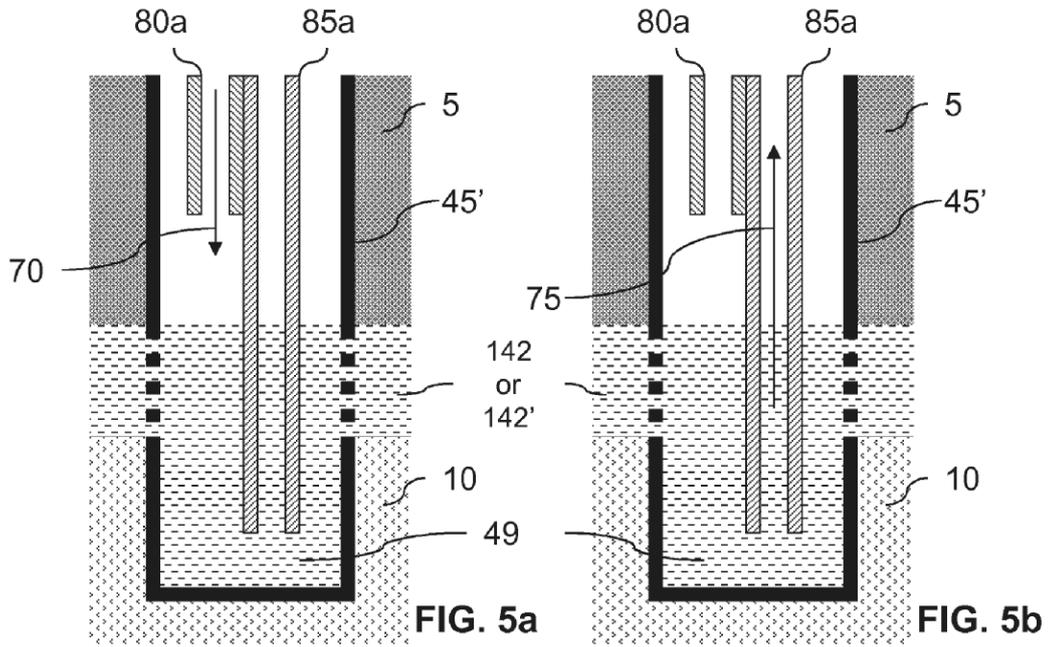
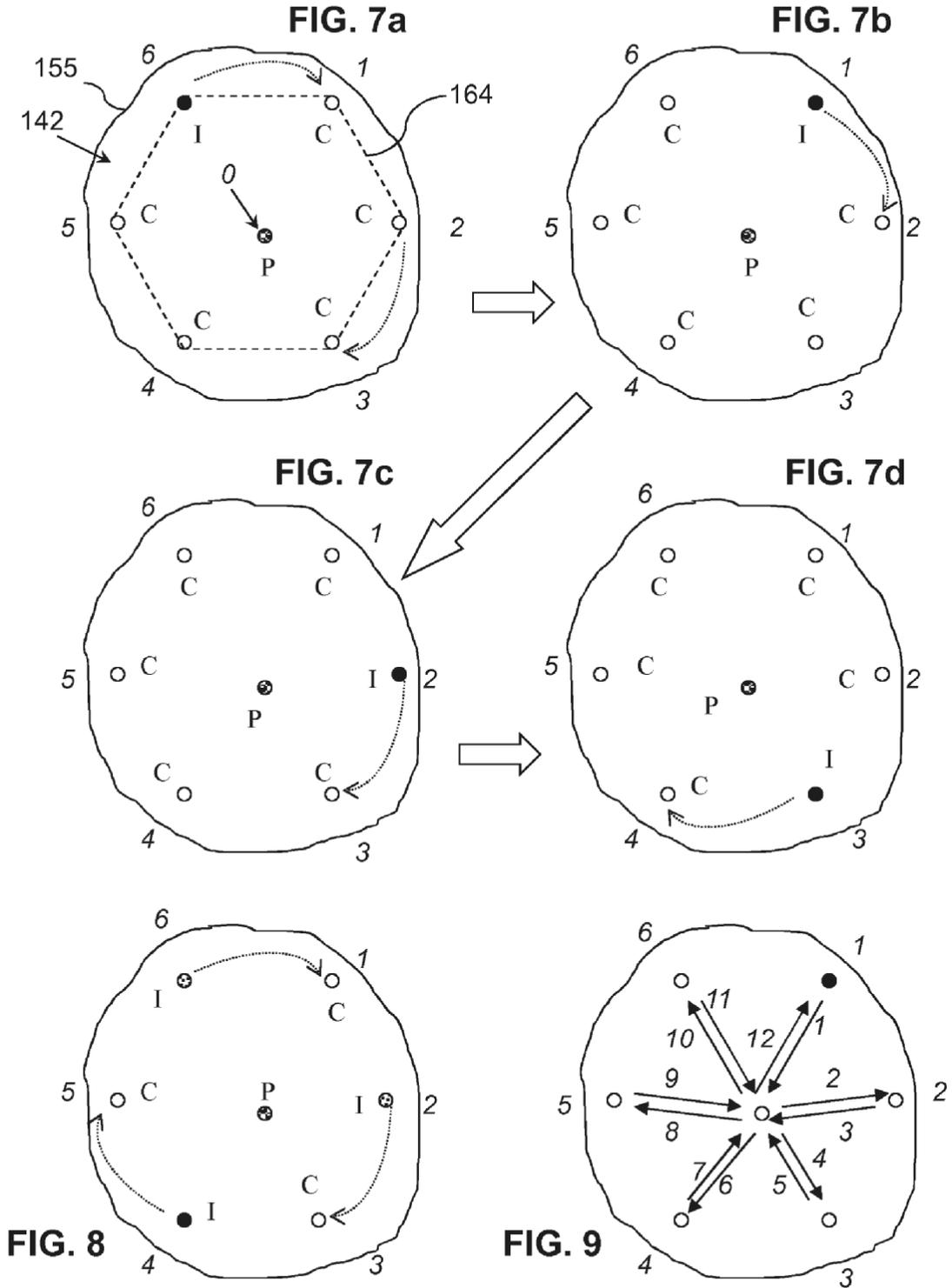
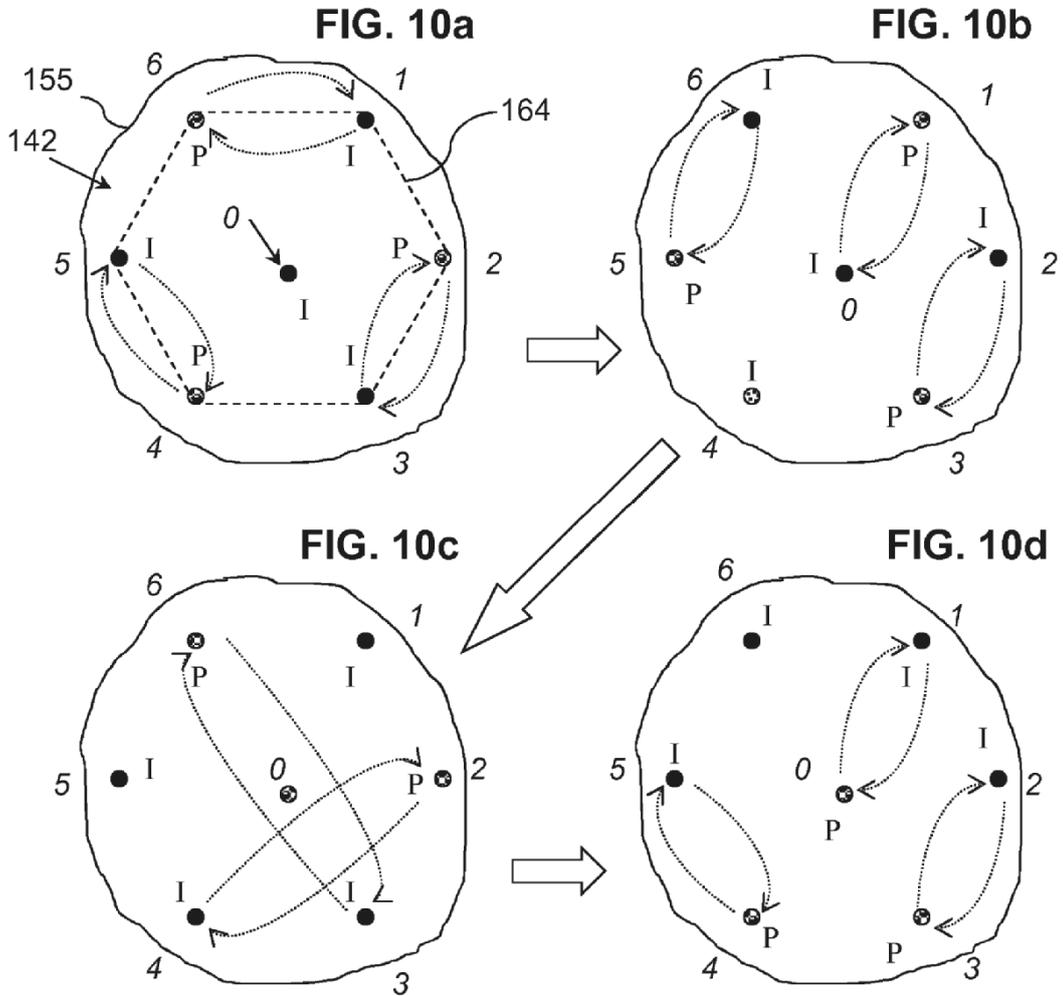


FIG. 4f







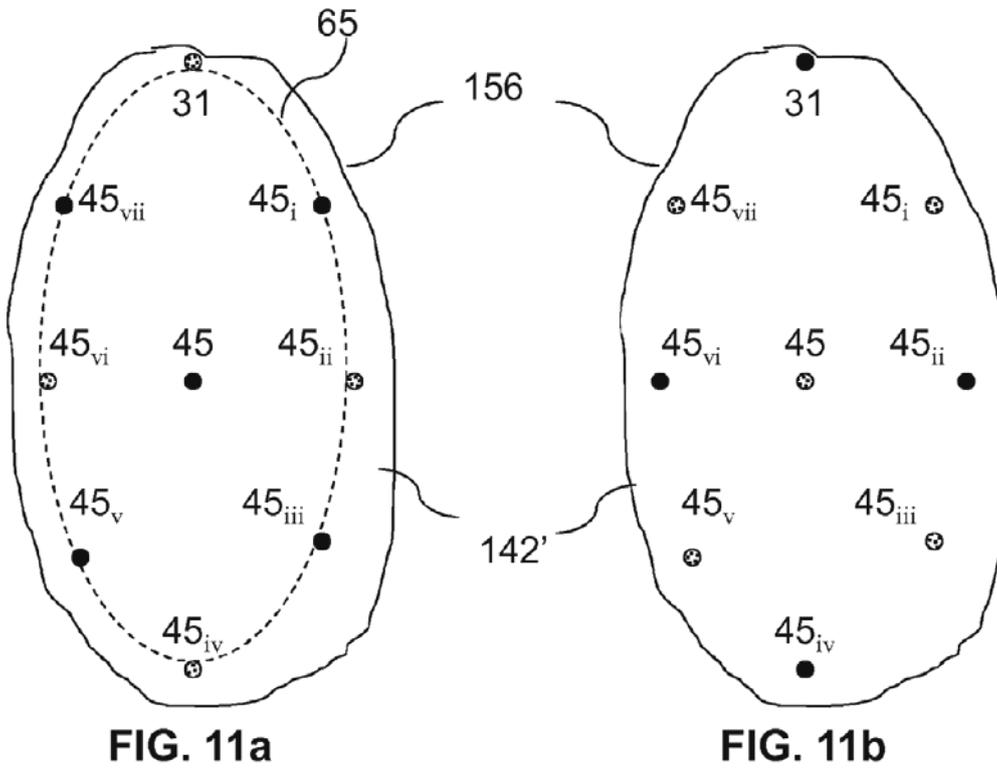


FIG. 11a

FIG. 11b

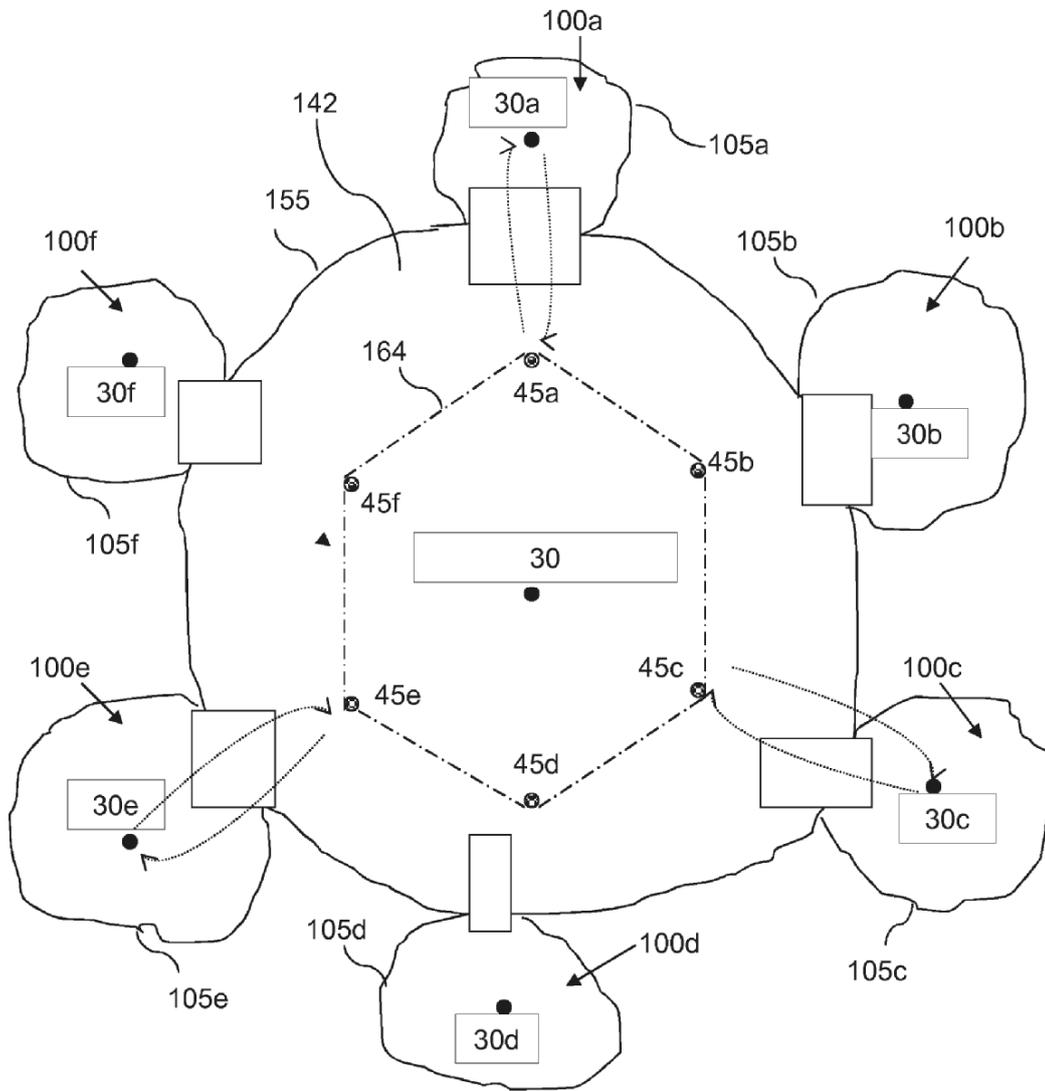
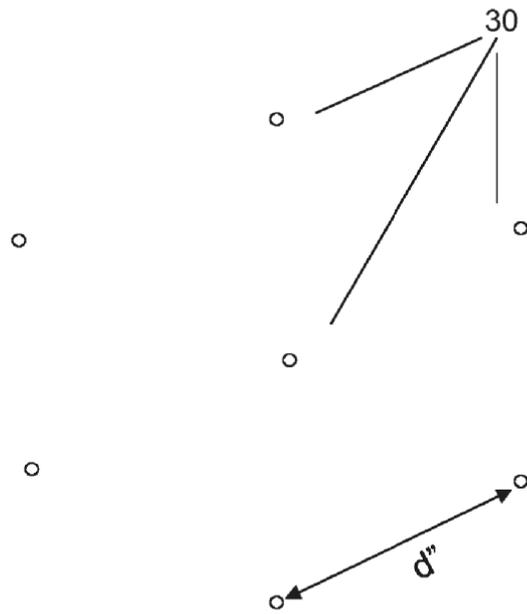


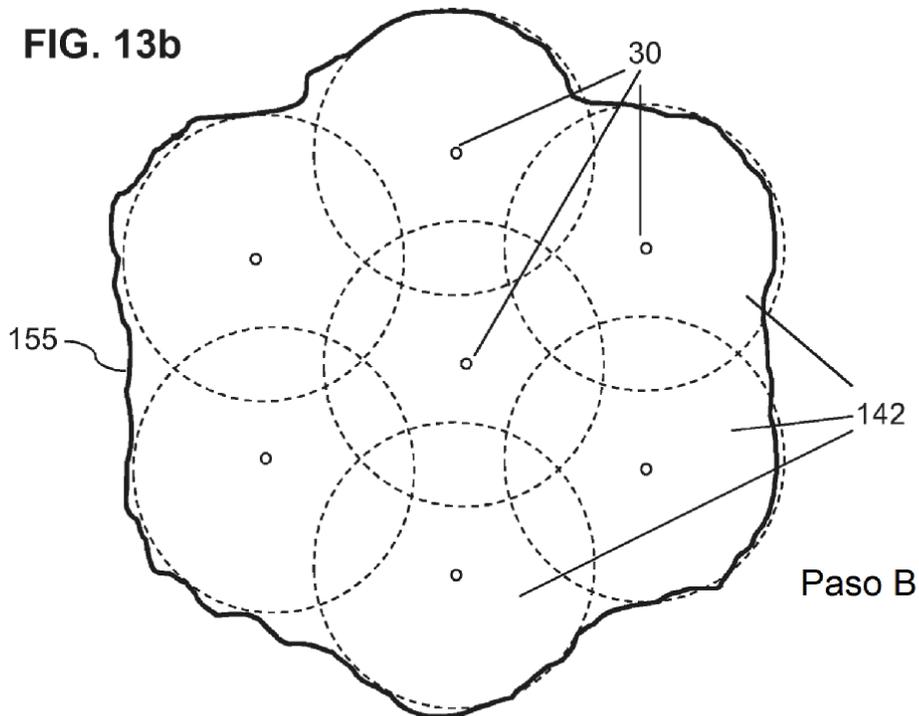
FIG. 12

FIG. 13a



Paso A

FIG. 13b



Paso B

FIG. 13c

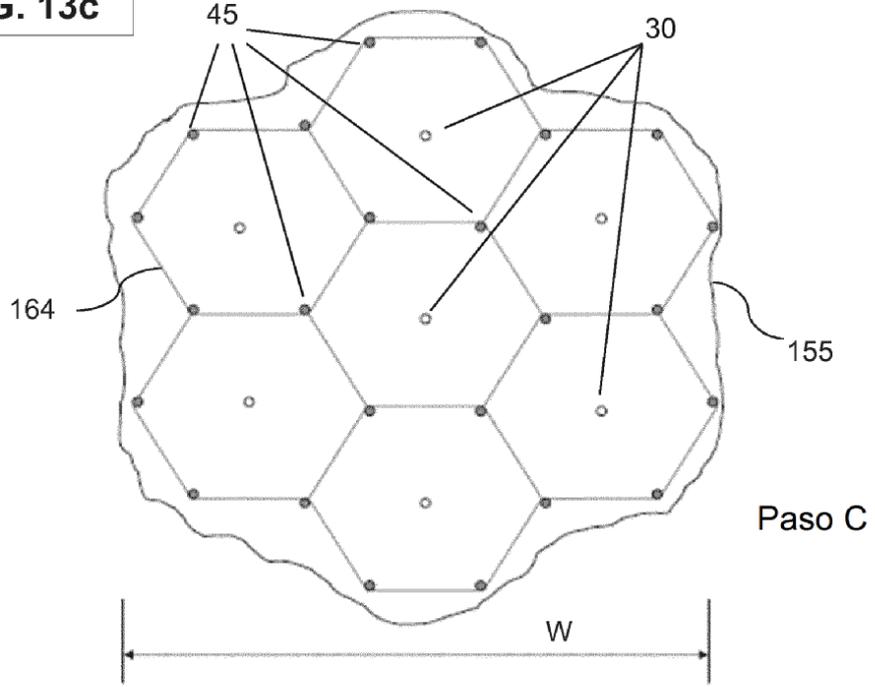


FIG. 13d

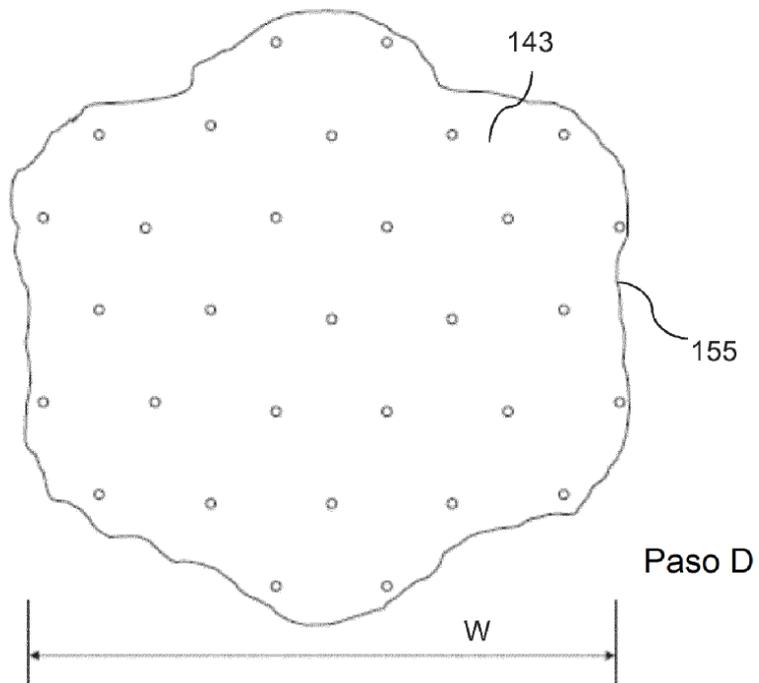


FIG. 14

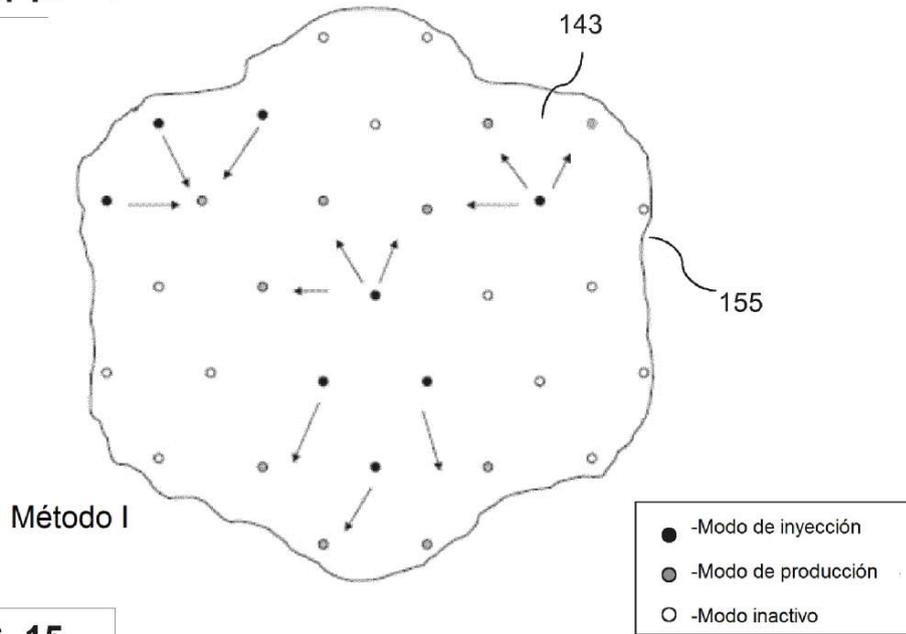
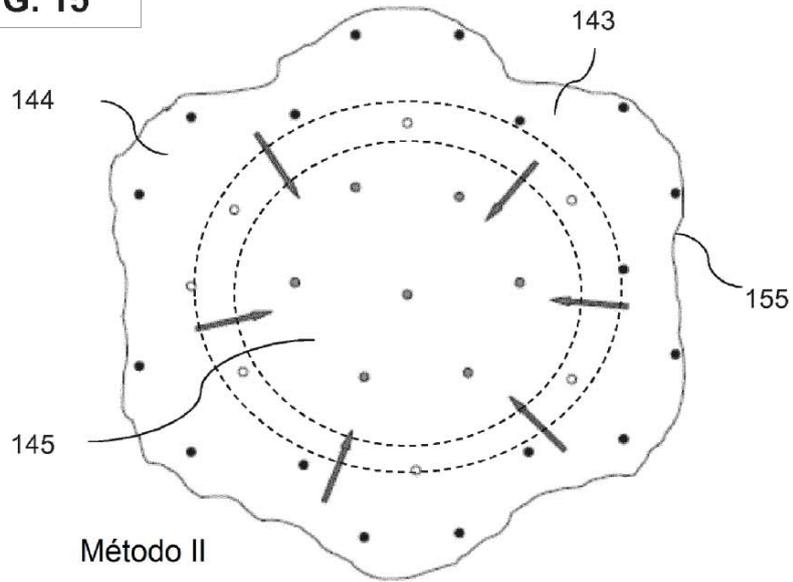


FIG. 15



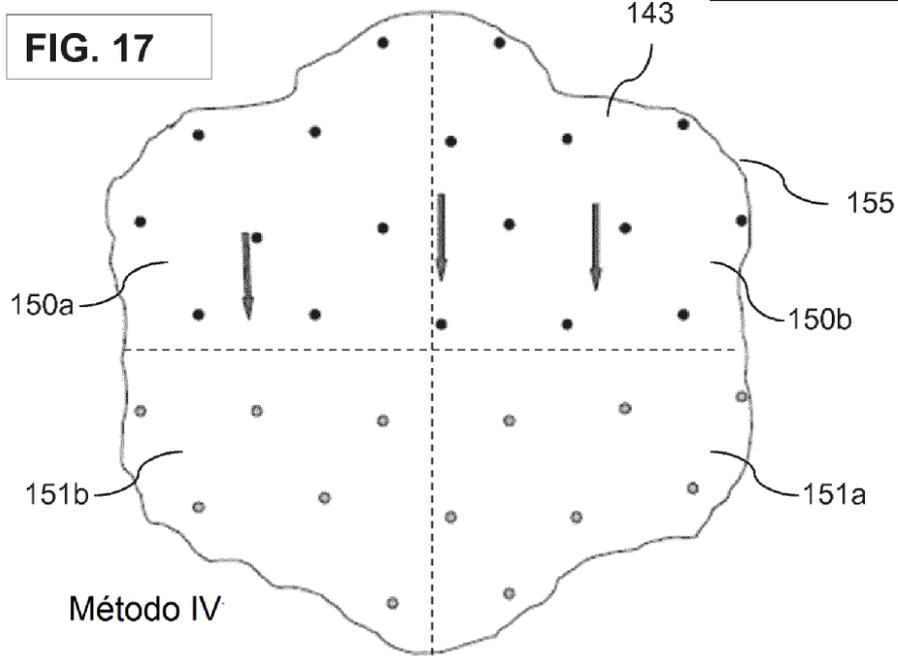
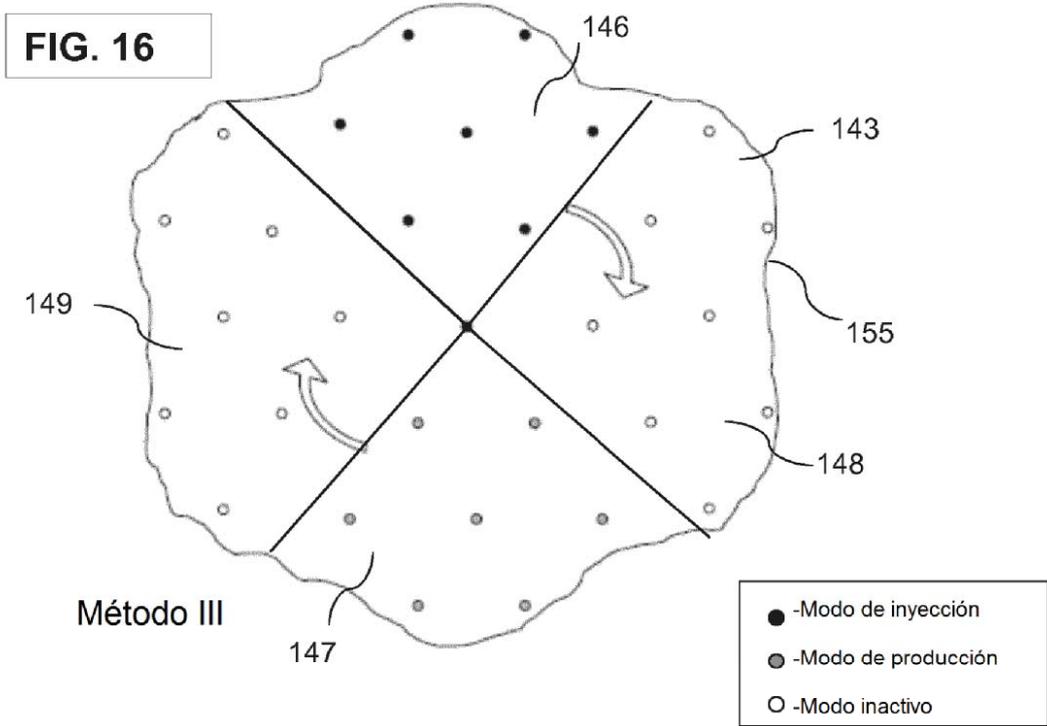


FIG. 18

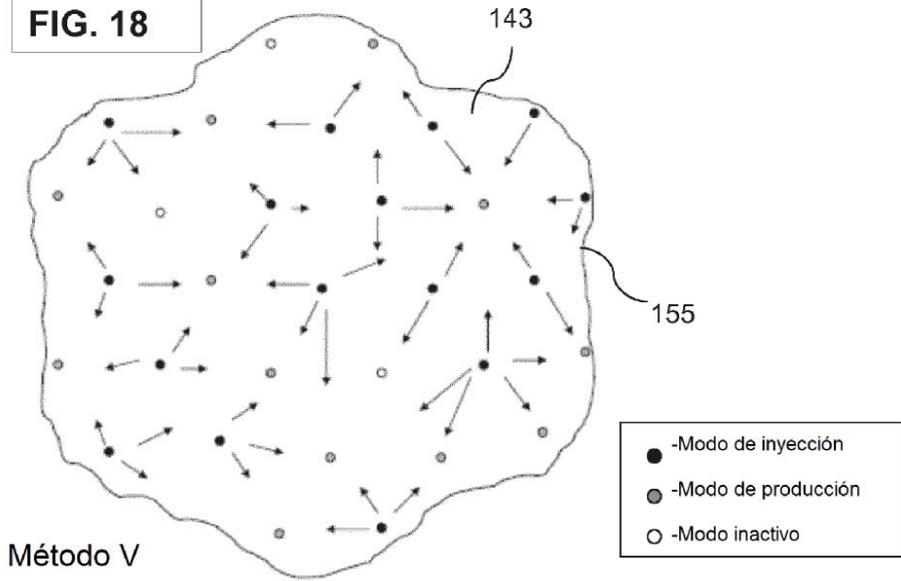
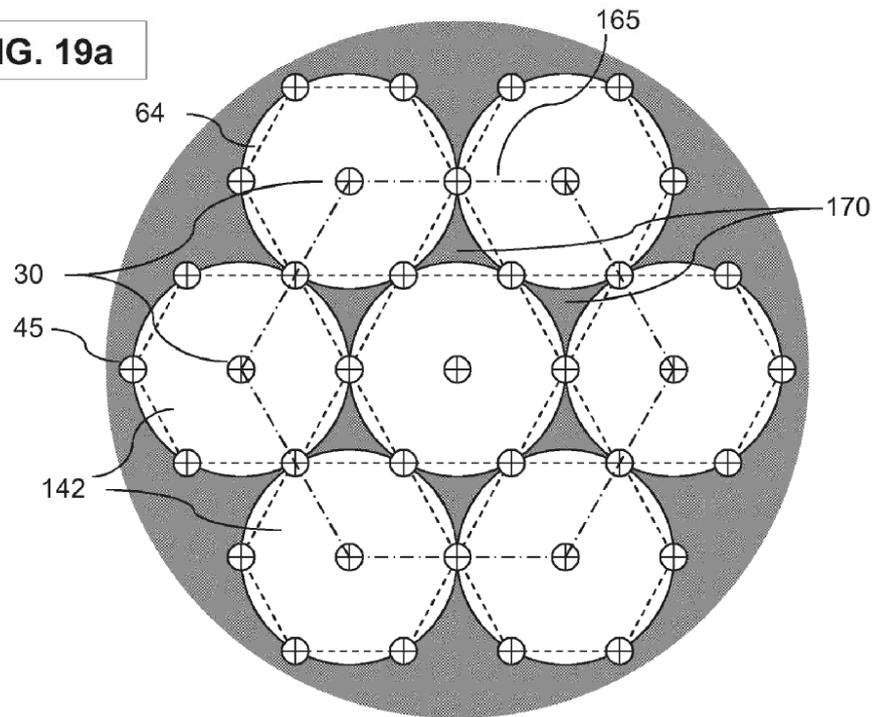


FIG. 19a



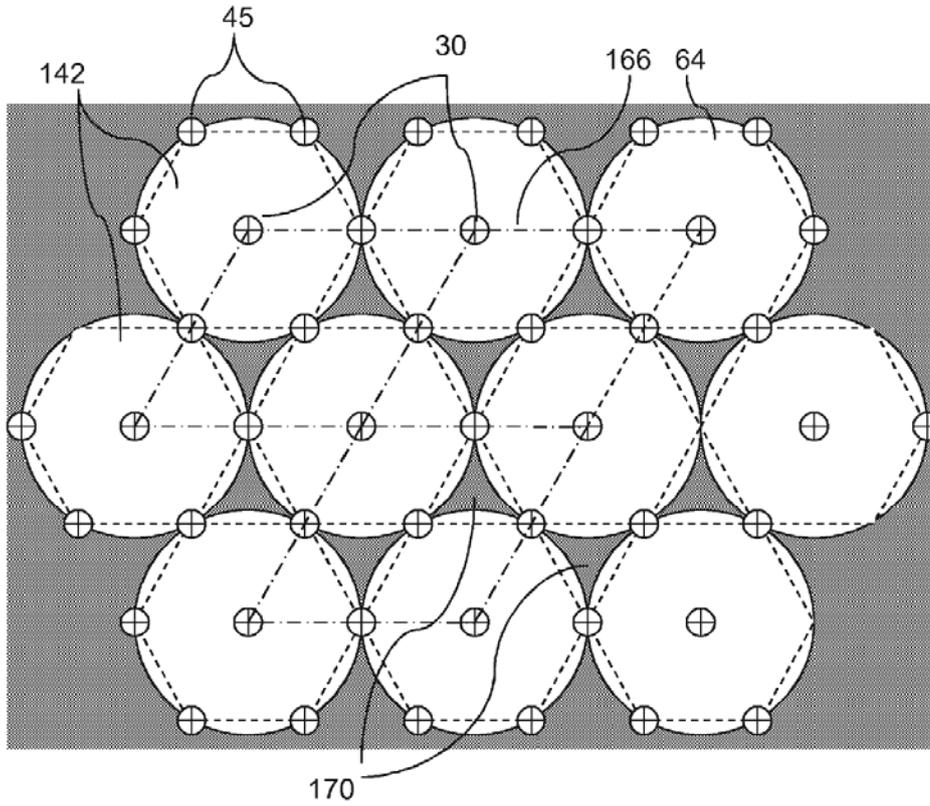


FIG. 19b

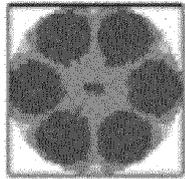
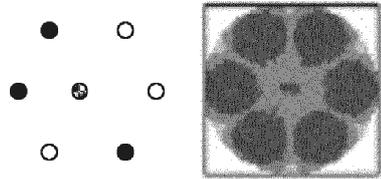


FIG. 20a FIG. 20b

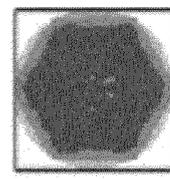
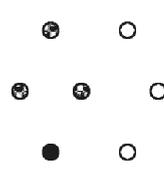


FIG. 21a FIG. 21b

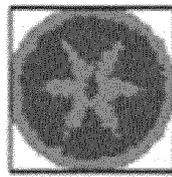
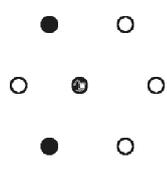


FIG. 22a FIG. 22b

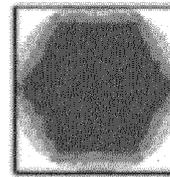
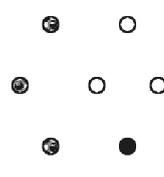


FIG. 23a FIG. 23b

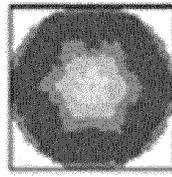
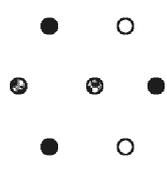


FIG. 24a FIG. 24b

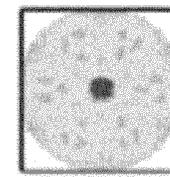
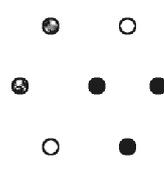


FIG. 25a FIG. 25b

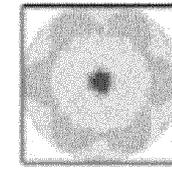
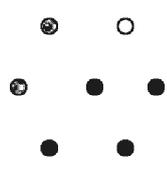


FIG. 26a FIG. 26b

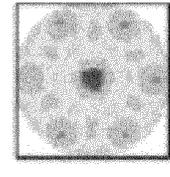
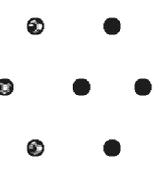


FIG. 27a FIG. 27b

- -Modo de inyección
- ⊗ -Modo de producción
- -Modo inactivo