

Plan a Largo Plazo de Salton Sea

Anexo G: Investigación de Métodos de Desalinización

Abril de 2024

Rev 1.01



PROGRAMA DE GESTIÓN DE SALTON SEA



CALIFORNIA
NATURAL
RESOURCES
AGENCY



Esta página se dejó en blanco intencionalmente.

Índice

Anexo G: Investigación de Métodos de Desalinización	1
1.1. Ósmosis Inversa	1
1.2. Propuesta de Reciclaje de Agua de Salton Sea (Sephton Water Technology).....	2
1.3. Referencias.....	19

Lista de Figuras

Figura 1. Proceso de Separación de Sales Propuesto por Sephton Water Technology (Fuente: Referencia 1).....	4
Figura 2. Costo del Equipo y Año de Construcción de Concentradores de Salmuera (fuente de datos: M. Mickley)	7

Lista de Tablas

Tabla 1. Resumen de componentes de costos de planta	9
Tabla 2. Componentes del costo operativo y costo total del agua.....	12
Tabla 3. Capacidad del proyecto	15
Tabla 4. Criterios de diseño	16
Tabla 5. Estimación de costos de capital	16
Tabla 6. Estimación de costos operativos.....	17
Tabla 7. Estimación del costo total del sistema.....	18

Siglas

AF	acres-pies (acre-feet)
AFY	acres-pies por año (acre-feet per year)
BTU	unidad térmica británica (British thermal unit)
Cu-Ni	cuproníquel
ft	pies (feet)
gpd	galones por día
gpm	galones por minuto
HDPE	polietileno de alta densidad (high-density polyethylene)
kgalón	kilogalón
kW	kilovatios (kilowatts)
kWh	kilovatios por hora (kilowatts per hour)
lb	libra
lb/h	libra por hora
LRP	Plan a Largo Plazo (Long-Range Plan)
MED	destilación de múltiple efecto (multi-effect distillation)
MGD	millones de galones por día
NaCl	cloruro de sodio
NDP	presión neta de trabajo (net driving pressure)
NF	nanofiltración
ppb	partes por mil millones (parts per billion)
ppm	partes por millón
Psi	libras por pulgada cuadrada (pounds per square inch)
RO	ósmosis inversa (reverse osmosis)
SHC	Complejo de Hábitats Salinos (Saline Habitat Complex)
TDS	sólidos totales disueltos (total dissolved solids)
TVC	compresor de vacío térmico (thermal vacuum compressor)
UF	ultrafiltración
VTE-MED	evaporadores de tubo vertical – destilación de múltiple efecto (vertical tube evaporators – multi-effect distillation)
ZLD	descarga cero de líquidos (zero liquid discharge)

Anexo G: Investigación de Métodos de Desalinización

Como parte del Plan a Largo Plazo (LRP), se están investigando métodos de desalinización para reducir la salinidad de Salton Sea y restablecer la diversidad y abundancia de vida silvestre en el Lago. Se han considerado dos enfoques:

- **Ósmosis Inversa (RO) convencional u otros procesos similares.**
- **El proceso de Reciclaje de Agua de Salton Sea propuesto por Sephton Water Technology,** que incluye la reducción de la salinidad a través de la destilación y otros componentes para crear un concepto de restauración completo para Salton Sea (incluido el suministro adicional de agua subterránea, el transporte de agua tratada y estanques de salmuera para la evaporación de salmueras residuales del sistema de desalinización).

Cada una de estas dos alternativas se analiza a continuación. Los análisis de costos descritos en este anexo fueron preparados por ingenieros de Tetra Tech, que trabajaron bajo contrato con el Departamento de Recursos Hídricos de California.

1.1. Ósmosis Inversa

En el proceso de RO, la alta presión del agua de alimentación impulsa el agua a través de membranas semipermeables, lo que produce agua permeada y deja las sales como un concentrado en el lado de alimentación de las membranas. La concentración de sales en el concentrado de RO depende de la tasa de conversión del agua de alimentación en permeado (tasa de recuperación). Los sistemas de RO de agua de mar suelen operar a una tasa de recuperación de ~50%. A esta tasa de recuperación, la tasa de flujo del concentrado es aproximadamente el 50% de la tasa de flujo del flujo de alimentación, y la concentración de sal será aproximadamente el doble de la concentración de sales en el agua de alimentación.

La producción de agua permeada de baja salinidad a partir de agua de alimentación de alta salinidad requiere que la presión de alimentación, en cualquier punto de la unidad de membrana de RO, sea mayor que la presión osmótica del agua en el lado de alimentación de la membrana. Para una operación efectiva de un sistema de RO de agua de mar, la presión de la corriente de concentrado que sale de la unidad de membrana de RO debe ser, como mínimo, 50 libras por pulgada cuadrada (psi) más alta que la presión osmótica de la corriente de concentrado. Este diferencial de presión, entre la presión de alimentación y la presión osmótica, se denomina presión neta de trabajo (NDP). La presión osmótica de la solución de agua es directamente proporcional a la concentración de sales disueltas. Se informa que la salinidad del agua de Salton Sea es de aproximadamente 75,000 partes por millón (PPM). Esta salinidad corresponde a una presión osmótica de alrededor de 800 psi.

El funcionamiento de un sistema de RO de agua de mar comercial convencional está limitado por la presión de alimentación permitida, que no supera las 1,200 psi. Teniendo en cuenta la NDP requerida de 50 psi, a la salida del concentrado de la unidad de RO, la salinidad del concentrado

no debe ser superior a 110,000 PPM, aproximadamente. Esto es para mantener la presión osmótica del concentrado por debajo de 1,150 psi.

Comenzando con agua de mar de alimentación con una salinidad de 75,000 PPM, el límite de 110,000 PPM de salinidad de la corriente de concentrado (que corresponde a una presión osmótica de 1,150 psi) limitaría la tasa de recuperación del proceso de RO, que trata el agua de alimentación de Salton Sea, a un 30%, aproximadamente.

Con el aumento esperado de la salinidad del agua en Salton Sea, la tasa de conversión del agua de alimentación de Salton Sea en permeado debería reducirse en el futuro.

Se están introduciendo en el mercado nuevos módulos de membrana de RO semicomerciales de ultra alta presión. Estos elementos de membrana tienen un límite de presión de alimentación de alrededor de 1,700 psi. La operación de la unidad de RO a una presión de alimentación de 1,700 psi permitiría una salinidad de la corriente de concentrado de hasta 150,000 PPM, aproximadamente. Este límite más alto de concentración de concentrado permitiría la operación de la unidad de RO, con una salinidad del agua de alimentación de 75,000 PPM, a una tasa de recuperación de alrededor del 50%. Con una salinidad de alimentación de 100,000 PPM, la tasa de recuperación debería reducirse a alrededor del 35%, y si la salinidad fuese más alta, la tasa de recuperación debería reducirse a un valor aún más bajo.

La tasa de recuperación del proceso de desalinización afecta en gran medida la economía de la producción de agua. Una tasa de recuperación más baja daría como resultado una tasa de flujo proporcionalmente más alta de agua de alimentación bombeada desde el Lago, lo que aumentaría el tamaño del sistema de pretratamiento, el consumo de energía, el uso de productos químicos para el tratamiento del agua y el tamaño del sistema requerido para tratar las aguas residuales. La planta de desalinización de agua de mar por RO en Carlsbad, CA, que opera con una tasa de recuperación del 50%, trata el agua de mar con una salinidad de alrededor de 35,000 PPM de sólidos totales disueltos (TDS), produce agua potable a un precio de alrededor de \$2,000/(acre-pie) AF.

El agua producto de un sistema de RO que trataría el agua de Salton Sea con una salinidad de 75,000 a 100,000 PPM a una tasa de recuperación de ~30% sería significativamente más costosa que la producida por la planta desalinizadora de Carlsbad. Por lo tanto, la aplicación de la tecnología de RO para desalinizar el agua salina de Salton Sea no parece ser viable desde el punto de vista económico. Además, con la posibilidad de que las entradas al Lago se reduzcan aún más debido a las sequías y el cambio climático, la salinidad del agua de alimentación podría superar las 110,000 PPM, lo que superaría el límite técnico aceptado del proceso de RO.

Por lo tanto, no se recomienda la consideración de la desalinización por RO del agua de Salton Sea como concepto de restauración a menos que haya mejoras tecnológicas en el proceso de RO que posibiliten el tratamiento de agua con una salinidad muy alta.

1.2. Propuesta de Reciclaje de Agua de Salton Sea (Sephton Water Technology)

Sephton Water Technology desarrolló una propuesta completa para la restauración de Salton Sea, que utiliza la desalinización como componente central. La evaluación de esta propuesta se realizó de la siguiente manera:

- El proceso de tratamiento de agua altamente salina de Salton Sea para producir agua de muy baja salinidad se describió conceptualmente en la propuesta (1)
- Algunos pasos del proceso, necesarios para la operación de la planta, fueron omitidos de la descripción del proceso, al igual que algunos parámetros del proceso. Esta evaluación proporciona una revisión y una estimación independiente del costo del sistema, y se agregan pasos al proceso que se considerarían esenciales para completar un sistema de desalinización completo. El análisis se centró principalmente en el componente de desalinización de la restauración, reconociendo que el concepto general de restauración propuesto incluye otros componentes relacionados con la gestión de Salton Sea.
- La estimación del costo del equipo de desalinización que se presenta aquí se preparó con base en los precios de las cotizaciones de equipos recibidas recientemente, los parámetros de costo derivados de los precios de los equipos de proyectos de desalinización recientes y la información económica publicada por la Oficina de Reclamación de EE. UU. para procesos similares. Los valores del costo del sistema y el costo del agua producto provistos en la descripción del proceso en la Referencia (1) fueron significativamente más bajos que esta estimación.
- La estimación del costo general proporcionada por Sephton Water Technology incluye una partida para una tubería de distribución de agua de \$240 millones. La propuesta también incluye un suministro de agua subterránea de 50,000 acres-pies por año (AFY). Se desarrolló una estimación de costos operativos y de capital utilizando estimaciones razonables para la instalación de pozos, el bombeo y el transporte, como se resume en este anexo.
- También se agregó una partida de costo para contabilizar la construcción de los estanques de evaporación de salmuera que serían necesarios para administrar el flujo de salida del sistema de desalinización.

La Propuesta de Reciclaje de Agua de Salton Sea de Sephton Water Technology se centra en la extracción de la sal del agua salina de Salton Sea y la recuperación de agua pura. El proceso de tratamiento descrito en la Referencia (1) de la propuesta se reproduce en la Figura 1. El objetivo del proceso de tratamiento es eliminar los iones divalentes del agua de Salton Sea, mediante el uso de membranas de nanofiltración (NF). Se propone que el permeado de NF se concentre utilizando unidades de evaporadores de tubo vertical – destilación de múltiple efecto (VTE-MED) para producir sal pura de cloruro de sodio (NaCl) y agua de muy baja salinidad como destilado. Se propone devolver el destilado a Salton Sea para crear áreas de baja salinidad en este cuerpo de agua.

El proceso consiste en una combinación de distintas tecnologías comerciales de tratamiento de agua que se espera que funcionen individualmente. Sin embargo, la combinación de estas tecnologías en un solo sistema operativo puede crear desafíos importantes para la integración de procesos. Excepto por el equipo VTE-MED que se describe más detalladamente en la propuesta de Sephton Water Technology, otros equipos de planta y procesos de tratamiento se describen en términos generales, sin los detalles de ingeniería y sin enumerar los parámetros de proceso relevantes. A algunos equipos de planta (la entrada de agua, por ejemplo) les faltaban componentes esenciales. Otras subunidades importantes de planta se omitieron por completo y no se tuvieron en cuenta en el presupuesto de la planta. Por ejemplo, el sistema de manejo de sólidos, requerido para el tratamiento del agua de retrolavado del sistema de filtración y lodos de la unidad de precipitación de cal, no se incluyó en la descripción del sistema y el costo del sistema

en el documento proporcionado para revisión. Otro ejemplo es el caudal de agua de refrigeración, esencial para el funcionamiento del sistema VTE-MED, que se indicó en el diagrama de flujo esquemático (Figura 1, Referencia 1), pero la tasa de flujo de refrigeración de agua de mar no se incluyó en el balance del flujo del proceso y el cálculo de la tasa de recuperación total. También se omitieron los sistemas de almacenamiento y dosificación de productos químicos.

Todos los precios de los equipos, enumerados en la propuesta de Sephton Water Technology en la Referencia (1), son significativamente más bajos que los precios de los equipos derivados de cotizaciones recientes e históricas o que se considerarían aceptables en el campo de la desalinización comercial.

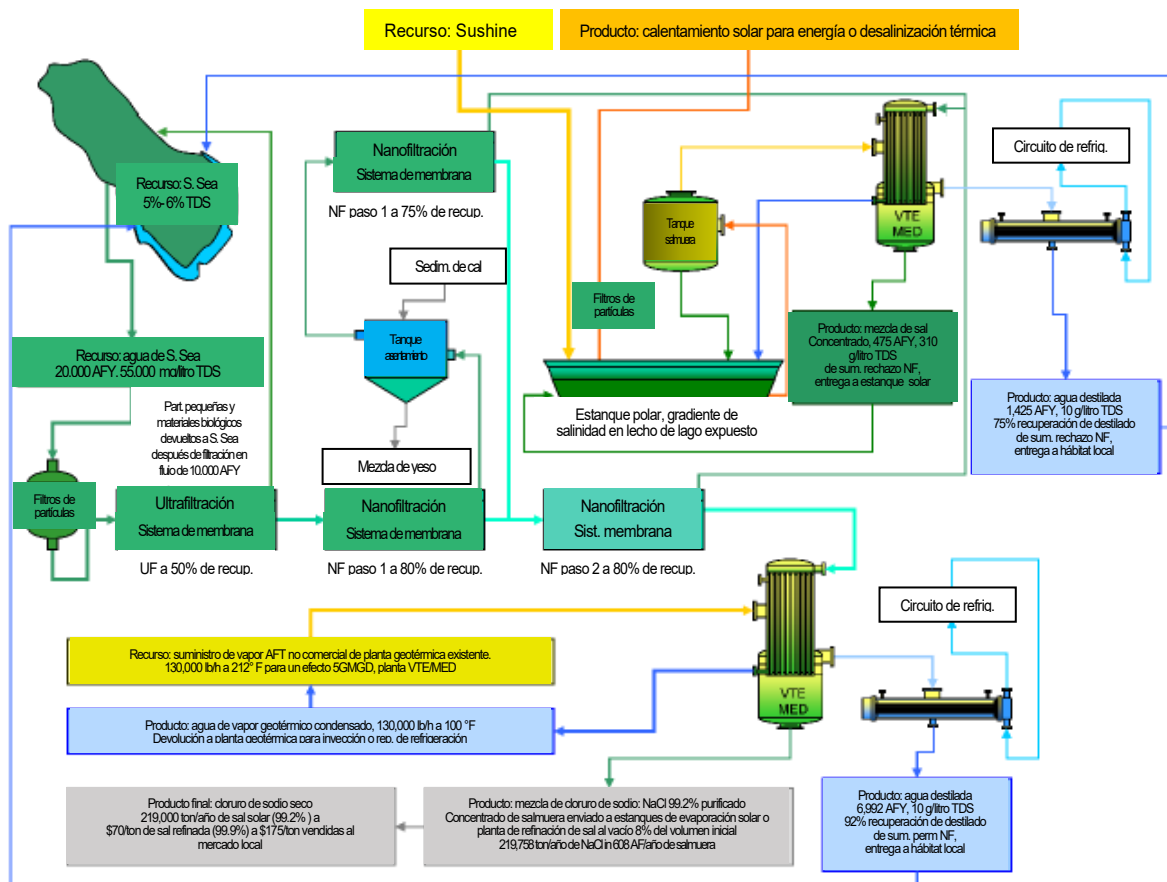


Figura 1. Proceso de Separación de Sales Propuesto por Sephton Water Technology (Fuente: Referencia 1)

1.2.1. Tasa de Recuperación del Proceso

El concepto de proceso, que muestra la tasa de flujo relevante, se incluyó en la propuesta de Sephton Water Technology (1), Figura 1. De acuerdo con este diagrama de flujo, se bombearán 20,000 AF de agua de Salton Sea para producir 6,992 AF + 1,425 AF de agua de baja salinidad, que se devolverá a Salton Sea. En consecuencia, la tasa de recuperación del proceso será de alrededor del 42%, $8,417/20,000 = 0.42085$.

Por lo tanto, según la Figura 1, un sistema que produciría 20 millones de galones por día (MGD) de agua de baja salinidad, requeriría el bombeo de 47.5 MGD de agua de Salton Sea. En esta

evaluación del proceso propuesto por Sephton Water Technology, aplicamos parámetros para procesos modernos de filtración por membrana que reducirían la tasa de agua de alimentación requerida para el proceso a 30.7 MGD (para una producción de 20 MGD de agua de baja salinidad). El resultado fue un aumento de la tasa general de recuperación del proceso al 65%. Sin tener en cuenta esta optimización de procesos, desarrollada por Tetra Tech, el requisito de energía para el proceso propuesto por Sephton Water Technology sería significativamente mayor por unidad de agua producida.

La correspondencia más reciente de Sephton Water Technology, después de la presentación de la propuesta original en abril de 2022, incluye una sugerencia de que la tasa de recuperación del proceso del sistema general debería ser la misma que la tasa de recuperación del sistema VTE-MED, la cual se propuso que fuera del 86%. Esto supondría que el VTE-MED trata el agua de Salton Sea sin ningún tratamiento previo. Sin embargo, el diagrama de flujo del proceso proporcionado por Sephton Water Technology, reproducido en la Figura 1, muestra pasos de tratamiento adicionales, antes de VTE-MED: filtración de medios y filtración de membrana. La operación de cada uno de estos pasos daría como resultado una pérdida de agua para el retrolavado de las unidades de filtración de medios y membrana, además de alguna pérdida de agua para la limpieza de la membrana. Además, habría alguna pérdida de agua en la unidad de precipitación de sulfato de calcio. Las pérdidas combinadas de agua sin tratar estarían cerca del 35%.

Otro componente del uso del agua, fundamental en los sistemas de desalinización por evaporación, es el agua de refrigeración para reducir la temperatura del vapor de agua en la última etapa de evaporación. El diagrama de proceso que se muestra en la Figura 1 indica circuitos de refrigeración, pero el agua de refrigeración no se incluyó en el cálculo de la tasa de recuperación del sistema proporcionado por Sephton Water Technology (1). Incluir el uso de agua de mar en el circuito de refrigeración reduciría el valor de la tasa de recuperación del proceso calculada.

1.2.2. Dimensionamiento de los Componentes del Equipo.

En la estimación de costos actualizada proporcionada por Sephton Water Technology, hay una reducción del tamaño de las unidades de ultrafiltración (UF) y NF de acuerdo con una tasa de recuperación supuesta más alta. En el último conjunto de cálculos proporcionado, el sistema UF produciría un flujo de filtrado de 22.7 MGD. Este flujo es la alimentación al sistema combinado que consta de unidades NF y unidades VTE-MED. De acuerdo con los flujos incluidos en la Figura 1, el sistema VTE operaría a una tasa de recuperación del 84,2% (10,000 AFY de filtrado de UF de Salton Sea convertidos en 8,417 AFY de agua de baja salinidad). En consecuencia, 22.7 MGD de filtrado de UF como alimentación al sistema VTE-MED podría producir 19 MGD de agua de baja salinidad, o solo el 95% de la capacidad de flujo diario diseñada del agua producto de baja salinidad.

1.2.3. Cálculo del Requerimiento de Energía Eléctrica y Vapor Geotérmico para el Proceso Propuesto

En la última presentación de Sephton Water Technology, el requerimiento de energía eléctrica se ajustó de acuerdo con su suposición de una mayor tasa de recuperación para el proceso. Como se explicó anteriormente, esta suposición es incorrecta y el requerimiento de energía eléctrica

debe actualizarse. En la Referencia 2, la presentación de Sephton Water Technology indica el requerimiento de vapor geotérmico para el sistema VTE-MED de 20 MGD como 120,000 libras por hora (lb/h) a una temperatura de 403°F, a un precio de \$0.0045/lb, calculado como un costo anual de \$4,493,880. Este monto se agregó al costo anual de operación. Sin embargo, el vapor a 403°F podría usarse de manera efectiva para la generación de energía eléctrica. La cantidad de vapor geotérmico, indicada como requerida por el sistema VTE-MED, tiene la capacidad de producir 67,907,520 kilovatios por hora (kWh) de electricidad al año. Al precio de la tarifa eléctrica de \$0.12/kWh, esto equivaldría a un costo anual de \$8,148,902. Si se utilizara este valor eléctrico equivalente del costo del vapor geotérmico, el costo total del agua producida por el sistema propuesto por Sephton Water Technology aumentaría en aproximadamente \$300/AF.

Otro problema es la eficiencia de rendimiento térmico muy alta supuesta por Sephton Water Technology para el sistema VTE-MED propuesto. El uso indicado de 120,000 lb/h de vapor geotérmico para producir 20 MGD de destilado (2) equivale a una relación de ganancia de producción de 58 lb de agua/lb de vapor. Dos unidades MED construidas recientemente en Marafiq (Arabia Saudita), que tienen una capacidad de 7 MGD cada una, tienen una relación de ganancia de producción de 12.4 lb de agua/lb de vapor (3). Estas unidades MED utilizan un compresor de vacío térmico (TVC) para mejorar el rendimiento térmico de las unidades MED. La unidad TVC no se incluyó en la propuesta de Sephton Water Technology. La unidad MED más grande del mundo es Shoaiba 2 (Arabia Saudita), construida por Sasakura en 2018. El sistema MED tiene una capacidad de destilado de 24 MGD con 10 efectos térmicos y una relación de rendimiento de 14.6 lb de destilado/1,000 BTU (unidad térmica británica) (3). En comparación, la energía proporcionada por el vapor geotérmico indicada por Sephton Water Technology como fuente de energía suficiente para la producción de 20 MGD de destilado (2) es equivalente a una relación de rendimiento de 69.4 lb de destilado/1,000 BTU. Las unidades MED mencionadas anteriormente (Marafiq y Shoaiba) operan con parámetros de proceso significativamente menos exigentes (menor alimentación y salinidad concentrada, menor índice de recuperación) que las condiciones de proceso diseñadas de la unidad VTE-MED, propuesta por Sephton Water Technology. Su eficiencia térmica es mucho menor que la eficiencia térmica proyectada para el futuro sistema VTE-MED, que concentrará una alimentación de Salton Sea de muy alta salinidad.

Existe una brecha significativa entre las eficiencias térmicas de las unidades comerciales de desalinización térmica modernas y el sistema VTE-MED propuesto por Sephton Water Technology.

1.2.4. Costo del Sistema Proporcionado por Sephton Water Technology

El costo total de la unidad VTE-MED de 60 efectos diseñada para producir 20 MGD de destilado se indica en \$30.64 M (en la Sección: Base de Costos de las Instalaciones de Tratamiento de Agua y Sal, Referencia 1, Figura 290). El costo total de la planta para la producción de 20 MGD de destilado (costo VTE-MED más costos adicionales relacionados con la construcción) es proporcionado por Sephton Water Technology como \$49.85 M (Referencia 1, página 37). Según la Referencia (1), esta cantidad cubrirá los equipos y la construcción de la planta.

1.2.5. Costo Revisado del Sistema VTE-MED Preparado por Tetra Tech

La estimación de costos para el sistema de desalinización se limitó al costo del equipo y los costos varios relevantes. No se incluyó el costo del desarrollo de la infraestructura del lugar y la provisión de los servicios públicos necesarios. Para estimar el costo del trabajo de preparación y

construcción del lugar de la planta, se requeriría una especificación detallada del lugar, el desarrollo del diseño de la planta y un estudio de las condiciones locales (condiciones del suelo, disponibilidad de conexiones de energía eléctrica, líneas de eliminación de desechos, etc.). Por lo tanto, las estimaciones de costos proporcionadas a continuación son un subconjunto de los costos totales que pueden ser necesarios para implementar un sistema de desalinización para la escala propuesta.

En la presentación de Sephton Water Technology, el costo de un sistema VTE-MED de 20 MGD figura en el valor inicial de \$49,849,315. En comparación, el costo del sistema estimado por Tetra Tech es de \$213,091,023. La estimación de Tetra Tech del costo del sistema VTE-MED se basa en la información de costos incluida en el “Informe de Opciones de Eliminación y Tratamiento de Concentrado de Salmuera, Manejo Regional de concentrado de Salmuera del Sur de California, Estudio – Fase I, Región del Bajo Colorado, Oficina de Recuperación de EE. UU. (octubre de 2009)”, Referencia 4. El documento de la Oficina de Recuperación indica el costo de un concentrador de salmuera de 5 MGD de capacidad. Este costo se aumentó de acuerdo con una relación empírica, incluida en el informe como una función de la capacidad del sistema y ajustada por el aumento de precios de 2009 a 2022 (6).

Según los expertos en el campo de las aplicaciones de descarga cero de líquidos (ZLD), las unidades concentradoras de salmuera más grandes que operan en los EE. UU. están en el rango de 1-1.5 MGD. Además, en su opinión, el costo de los concentradores de salmuera indicado en el informe de la Oficina de Recuperación se encuentran en el rango correcto para los precios de mercado para este tipo de equipo. El resumen de los costos de las unidades concentradoras de salmuera se muestra en la Figura 2. Esta figura fue proporcionada por Mike Mickley, Ph.D., un experto en aplicaciones ZLD reconocido a nivel internacional.

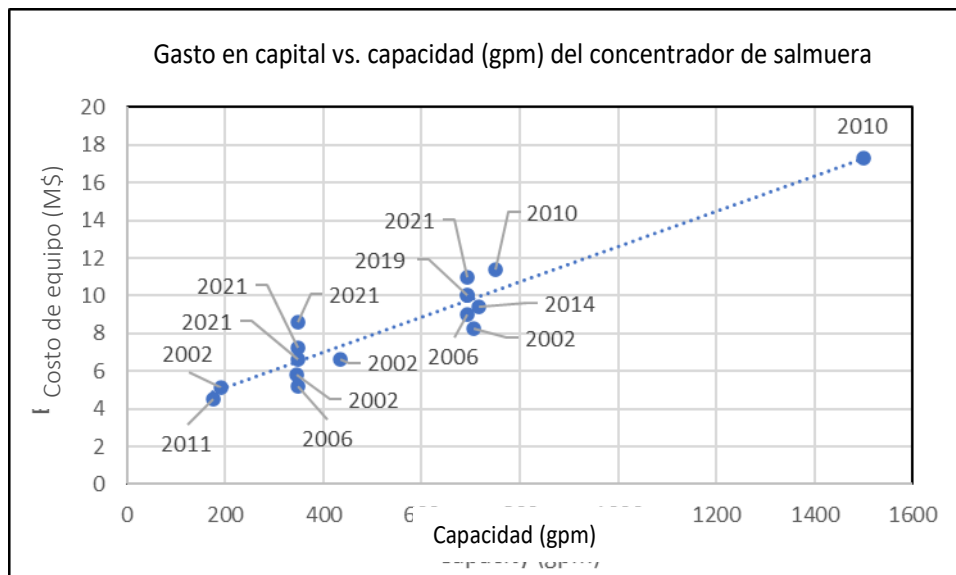


Figura 2. Costo del Equipo y Año de Construcción de Concentradores de Salmuera (fuente de datos: M. Mickley)

El costo de instalación de Sephton Water Technology para un sistema VTE-MED de 20 MGD (\$49.85 M) es similar al costo de 2009 de un concentrador de salmuera de 5 MGD, que figura en el informe de la Oficina de Recuperación (4). Aplicando el índice de aumento del costo del equipo

de 2009 a 2022, el costo propuesto de la unidad VTE-MED de 20 MGD sería aproximadamente un 60% más bajo que el costo de un concentrador de salmuera de 5 MGD, según se publicó en el informe la Oficina de Recuperación. Como alternativa, para un sistema VTE-MED de 20 MGD, el costo desarrollado por Sephton Water Technology representa solo el 22% del costo del sistema derivado de los datos del informe de la Oficina de Recuperación, aproximadamente.

Otro punto de referencia podría ser el costo de los sistemas MED regulares utilizados para la desalinización de agua de mar. El costo estimado de tales sistemas fabricados con una aleación de aluminio relativamente económica es de aproximadamente \$6/galones por día (gpd) (8). Aplicando este costo a la capacidad del sistema de 20 MGD, una unidad MED daría como resultado un costo del sistema de \$120 M. El costo estimado de los sistemas MED, que consisten generalmente en 10-15 efectos y que utilizan aluminio como material de construcción, es significativamente más alto que el costo del equipo VTE-MED, construido con acero inoxidable y aleaciones de cuproníquel (Cu-Ni), y que consta de 60 efectos, proporcionado por Sephton Water Technology.

Actualmente, la unidad MED comercial más grande es la unidad Shoiba 2, con una capacidad de 24 MGD y 10 efectos térmicos. No se ha construido ni está operativa ninguna unidad MED comercial con más de 15 efectos térmicos (9).

Otro tema relacionado tanto con el costo como con la durabilidad del sistema es la selección de los materiales de construcción. La propuesta de Sephton Water Technology incluye el acero inoxidable y la aleación de Cu-Ni como material de construcción para VTE-MED. Estos materiales de construcción son adecuados para un sistema de evaporación que produzca destilado de agua de mar con una salinidad en el rango de 35,000 a 45,000 PPM. En el caso del agua de mar de Salton Sea, la salinidad de alimentación de entrada es mucho más alta y la salinidad de la salmuera de salida está saturada. Este nivel de salinidad es muy corrosivo y se requerirían aleaciones más resistentes como material de construcción para que el sistema funcione de manera confiable durante un período de 20 a 30 años (7). Por ejemplo, en los concentradores de salmuera fabricados por un desarrollador comercial, RCC Thermal Products, que operan en un rango de salinidad similar al del sistema propuesto para tratar el agua de mar de Salton Sea, los componentes del sistema en contacto con la salmuera de alta salinidad están hechos exclusivamente de aleación de titanio. Estos componentes incluyen evaporadores e intercambiadores de calor (10, 11).

Se recibió información de respaldo adicional del Nickel Institute sobre los materiales de construcción adecuados para la aplicación propuesta (12). Para el tratamiento de agua con una salinidad en el rango de la salmuera del sistema y alimentación de Salton Sea, la aleación recomendada es titanio de grado 7 o 16. Se pueden usar algunas aleaciones de níquel, pero solo si el agua de alimentación está completamente desaireada, con una concentración de oxígeno disuelto por debajo de 20 partes por mil millones (ppb). El proceso propuesto por Sephton Water Technology no incluye un paso de desaireación.

En base a los múltiples factores anteriores, se considera justificado el costo estimado más alto para el sistema VTE-MED desarrollado por Tetra Tech, en comparación con el estimado original de Sephton Water Technology (1). Los resultados del cálculo del costo de la planta se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de componentes de costos de planta

Elemento de costo del sistema	Tasa de flujo o número de unidades	Costo del equipo o sistema	Referencias de costo
Flujo de entrada de Salton Sea, mgd	30.7		
Flujo de entrada de Salton Sea, galones por minuto (gpm)	21,296		
Cabezales de malla metálica + aire comprimido	2	657,065	Cotización de Johnson Screens 2022 (14)
Profundidad mínima requerida del agua, pies (ft)	10		Especificaciones de Johnson Screens (14)
Peso de mallas de entrada, lb	10,000		
Barcaza de entrada		659,782	Cotización de Poseidon Barge (15)
Instalación de barcasas de entrada y modificaciones para la función de entrada		500,000	
Bombas de entrada, gpm	21,296	1,991,493	De cotizaciones para la planta SWRO en Carlsbad (2009) multiplicado por CCCI 1.667 (6)
Suministro de energía eléctrica			
Tubería HDPE de entrada, diámetro, pulgadas	48		Concepto de proceso de Sephton Water Technology
Longitud de la tubería de entrada, ft	5,280		Tom Sephton, Appendix O Desal PLant Costo de entrada de agua de mar (13)
Peso de la tubería de entrada (111 psi), lb/ft	158.5		Catálogo de Jim Eagle, página 10 (16)
Peso total de la tubería de entrada lb	836,880		
Precio de polímero HDPE, \$/t	1,216		Precios globales de HPDE 2022 (17)
Componentes adicionales e instalación, \$/lb	1.0		Componentes de tubería de entrada, pesos de tubería de entrada, segmentos de tubería de conexión e instalación
Colocación y fijación de tubería, \$/lb	0.5		Colocación de tubería de entrada y fijación al fondo del lago, conexión a barcaza
Costo total de la tubería de entrada, \$/lb	2.05	1,717,331	
Cruce de playa y sifón	1.0	1,500,000	Estimación de proyectos anteriores
Entrada total	1.0	7,025,671	
Alimentación de filtración multimedia, mgd	36.9		

Anexo G: Investigación de Métodos de Desanilización

Elemento de costo del sistema	Tasa de flujo o número de unidades	Costo del equipo o sistema	Referencias de costo
Efluente de filtración multimedia, mgd	33.3	9,975,739	En base al costo del sistema de filtración de medios de \$0.3/gpd
Tasa de filtración, gpm/ft ²	3.0		
Área de filtración requerida, ft ²	8,553		
Número de celdas de filtro	12.0		
Alimentación de filtración de membrana UF, mgd	33.3		
Efluente de filtración de membrana UF, mgd	29.9	13,467,248	En base al costo del sistema de filtración por membrana de \$0.45/gpd
Flujo de filtración UF, gfd	45.0		
Número de elementos UF	1,209		
Alimentación NF de 1.º paso, mgd	29.9		
Permeado NF de 1.º paso, mgd	27.17	32,608,696	En base al costo del equipo del sistema NF de \$1.2/gpd
Tasa de flujo de permeado promedio, gfd	15		
Número de elementos de membrana (440 ft ²)	4,117		
Número de recipientes a presión (7 M)	588		
Flujo de concentrado de NF, mgd	2.75		
Sistema de siembra de concentrado NF, mgd	2.75	42,284,646	Referencia 4, factor de incremento de precio 1.667 CCCI (6)
NF de 2.º paso, alimentación, mgd	27.17		
NF de 2.º paso, permeado, mgd	21.74	26,086,957	En base al costo del equipo del sistema NF de \$1.2/gpd
Tasa de flujo de permeado promedio, gfd	20		
Número de elementos de membrana (440 ft ²)	2,470		
Número de recipientes a presión (7 M)	353		
Sistema VTE-MED	20	213,091,023	Referencia 4, factor de incremento de precio 1.667 CCCI (6)
Corrientes de retrolavado para la gestión de sólidos, mgd	3.7	6,395,746	De cotizaciones para la planta SWRO en Carlsbad (2009) multiplicado por CCCI 1.667 (6)
Sistema eléctrico, VFD, MCC, instrumentación y control	13970.1	14,557,961	De cotizaciones para la planta SWRO en Carlsbad (2009) multiplicado por CCCI 1.667 (6)

Elemento de costo del sistema	Tasa de flujo o número de unidades	Costo del equipo o sistema	Referencias de costo
Unidad de almacenamiento y dosificación de hipoclorito	1		
Tasa de dosificación de hipoclorito, ppm	3		
Unidad de almacenamiento y dosificación de bisulfito de sodio	1		
Tasa de dosificación de bisulfito de sodio, ppm	1		
Unidad de almacenamiento y dosificación de ácido (para coagulación)	1		
Tasa de dosificación de ácido, ppm	20		
Sistema de almacenamiento y dosificación de coagulantes	1		
Tasa de dosificación de coagulante, ppm	20		
Sistema de almacenamiento y dosificación de cal	1		
Tasa de dosificación de cal, ppm	50		
Unidad de almacenamiento y dosificación de ácido (para ajuste de pH)	1		
Tasa de dosificación de ácido, ppm	5		
Inhibidor de costras para unidad de dosificación NF	1		
Tasa de dosificación del inhibidor de costras, ppm	2		
Inhibidor de costras para unidad de dosificación VTE	1		
Tasa de dosificación del inhibidor de costras, ppm	2		
Costo de equipo para unidades de dosificación combinadas		491,149	Calculado a partir de la planta SWRO (RO de agua de mar) en Carlsbad (2009)
Contingencia de equipos	20%	74,503,872	
Costo total del equipo		440,488,707	
Impuestos estatales (California)	7.25%	31,935,431	Derivado del presupuesto de SWRO en Carlsbad (2009)
Ingeniería	8.00%	35,239,097	Derivado del presupuesto de SWRO en Carlsbad (2009)
Margen de beneficio del contratista	8.00%	35,239,097	Derivado del presupuesto de SWRO en Carlsbad (2009)

Elemento de costo del sistema	Tasa de flujo o número de unidades	Costo del equipo o sistema	Referencias de costo
Energía de inicio + productos químicos	2.00%	8,809,774	Derivado del presupuesto de SWRO en Carlsbad (2009)
Seguros y bonos	5.00%	22,024,435	Derivado del presupuesto de SWRO en Carlsbad (2009)
Subtotal		133,247,834	Derivado del presupuesto de SWRO en Carlsbad (2009)
Contingencia	15.00%	19,987,175	Derivado del presupuesto de SWRO en Carlsbad (2009)
Costo total de la planta, 20 MGD de producción de agua tratada, sin incluir el trabajo en el lugar		593,723,716	

1.2.6. Costos Operativos y Costo Derivado del Agua

En la Tabla 2, se incluyen los parámetros y valores calculados para los componentes del costo operativo. Los cálculos para los componentes del costo del agua se basan en los parámetros de costo que se indican en la Tabla 2.

En el cálculo de la energía eléctrica requerida para la operación de la planta de la unidad VTE, se utilizó el valor indicado en la Referencia 1. Para otros equipos de proceso, la energía eléctrica requerida se calculó de acuerdo con la práctica común de ingeniería.

Para la energía térmica requerida para operar el sistema VTE-MED, se utilizó la suposición de que habrá vapor de baja presión disponible de una planta geotérmica local (Referencia 1). Sin embargo, no existe una evaluación independiente para confirmar si habrá suficiente vapor geotérmico disponible para la operación de la unidad de evaporación para agua producto con una capacidad de 20 MGD y, finalmente, de 100 MGD.

El costo operativo derivado es de \$4.04/kilogalón (kgalón) o \$1,316/AF. Por lo tanto, el costo de capital es \$6.35 kgalón o 2,069/AF y el costo total del agua es \$10.39/kgalón o \$3,385/AF.

A modo de comparación, el costo total del agua que figura en el Informe del Proyecto de Reciclaje de Salton Sea (1) es de \$582/AF.

Tabla 2. Componentes del costo operativo y costo total del agua

Parámetro	Valor	Notas
Tasa de interés	5.0%	
Vida de la planta, año	25	
Tasa de descuento	7.10%	
Factor de carga de la planta	90%	
Producción anual de agua, kgalón	6,570,000	

Parámetro	Valor	Notas
Número de operadores	10	
Salario anual de los operadores + G&A	104,000	
Operador jefe	1	
Salario anual del operador jefe + G&A	124,800	
Personal de mantenimiento	2	
Salarios anuales del personal de mantenimiento	166,400	
Costo elementos UF, \$/elemento	1,650	
Período de garantía de las membranas UF, año	7	
Costo elementos NF, \$/elemento	650	
Período de garantía de los elementos de membrana NF, año	5	
Ácido sulfúrico, \$/t (100%)	276	
Coagulante férrico, \$/t (100%)	923	
Inhibidor de costras, \$/t (100%)	2280	
Bisulfito de sodio, \$/t (100%)	1617	
Hipoclorito de sodio, \$t (100%)	1209	
Cal, \$/t (100%)	245	
Costo de mantenimiento anual, % del equipo	2.0%	Del costo del equipo
Cumplimiento normativo, \$/año	500,000	
Eficiencia de las bombas	0.82	
Eficiencia de motores	0.96	
Eficiencia de VFD	0.98	
Eficiencia de ERD	0.96	
Tarifa de electricidad, \$/Kwh	0.12	
Entrega de agua de mar, kW	736	
Alimentación de membrana UF, kW	399	
Alimentación de membrana NF de 1.º paso, kW	2,993	
Siembra de concentrado y precipitación, kW	35	
NF de 2.º paso, alimentación	2,718	
VTE-MED	1,579	Proporcionado por Sephton Water Technology (2)
Sistema de gestión de sólidos	419	
Unidades de dosificación de productos químicos	5	
Aire acondicionado	20	
Iluminación	50	
Controles y automatización	5	

Parámetro	Valor	Notas
Otros componentes varios/Transformación de contingencia y pérdidas de cable (2%)	179	
Potencia total, kW	9,138	
Costo anual de energía eléctrica, \$/año	8,645,621	
Costo de vapor geotérmico, \$/año	4,493,880	Proporcionado por Sephton Water Technology (2) (*)
Costo reposición elementos UF, \$/año	285,021	
Costo reposición elementos NF, \$/año	535,244	
Ácido sulfúrico, \$/año	287,818	
Coagulante férrico, \$/año	770,392	
Inhibidor de costras, \$/año	283,880	
Bisulfito de sodio, \$/año	61,814	
Hipoclorito de sodio, \$/año	138,621	
Cal, \$/año	41,936	
Otros productos químicos, \$/año	264,077	
Mano de obra, \$/año	1,497,600	
Mantenimiento, \$/año	8,724,413	
Cumplimiento normativo, \$/año	500,000	
Costo total anual de operación, \$/año	26,530,317	
Costo operativo, \$/kgalón	4.04	
Costo de capital anual	41,717,981	
Costo de capital, \$/kgalón	6.35	No incluye el costo de desarrollo de la obra
Costo total del agua, \$/kgalón	10.39	
Costo total del agua, \$/AF	3,385	

(*) Costo de vapor geotérmico a 403°F, 120,000 lb/h, proporcionado por Sephton Water Technology para una capacidad de destilado de 5 MGD y 20 MGD. Sin embargo, el vapor a 403°F podría usarse para la generación de energía eléctrica. Esta cantidad de vapor geotérmico tiene la capacidad de producir 67,907,520 kWh de electricidad al año. A una tarifa eléctrica de \$0.12/kW-h, esto equivaldrá a un costo anual de \$8,148,902. Si se utilizara este valor eléctrico equivalente del costo del vapor geotérmico, el costo total del agua producida por el sistema propuesto por Sephton Water Technology aumentaría a ~\$3,600/AF.

1.2.7. Pureza del agua recolectada de Salton Sea

Según un informe presentado por Sephton Water Technology (1), así como otra información publicada sobre Salton Sea, su agua se ha degradado y está contaminada. El informe presentado por Sephton Water Technology (1) indica lo siguiente:

Página 3: “Los lugares donde se reciclará el agua de Salton Sea también producirán una corriente de salmuera concentrada de Salton Sea que contendrá una mezcla de sales y pequeñas moléculas orgánicas”.

Página 4: “En el último siglo, la calidad de la sal disuelta en Salton Sea se ha degradado por el drenaje agrícola y algunos desechos industriales. El cloruro de sodio en Salton Sea ahora se mezcla con una porción sustancial de sulfato del drenaje agrícola, cantidades

significativas de magnesio y una cantidad modesta de calcio, potasio y bicarbonato, además de pequeñas cantidades de una amplia gama de elementos. El escurrimiento de fertilizantes estimula un crecimiento masivo de microorganismos que se descomponen para liberar una amplia gama de moléculas orgánicas”.

En particular, los fertilizantes y pesticidas en el escurrimiento agrícola podrían haber causado la contaminación del agua de mar. Algunos componentes iónicos residuales de los fertilizantes y compuestos orgánicos de pequeño tamaño molecular no son bien rechazados por las membranas NF de tipo abierto, propuestas para este proceso. Existe la preocupación de que los contaminantes anteriores terminen en la sal seca, y afecten su pureza y valor de mercado. Actualmente, la posible presencia de estas impurezas se considera una incertidumbre para evaluar el valor económico futuro de esta sal.

1.2.8. Sistema de Suministro de Agua Subterránea

Hemos desarrollado esta evaluación de costos propuestos para un sistema de campo de pozos de agua subterránea para proporcionar un total de 50,000 acres-pies por año (AFY) de agua a Salton Sea. Se espera que este campo de pozos propuesto esté ubicado dentro de dos millas de un punto de descarga en Salton Sea.

Quedan por identificar varias cuestiones clave con respecto a esta posible fuente de agua de baja salinidad para Salton Sea. Estos elementos incluyen:

- Ubicación del acuífero de agua subterránea
- Valores de calidad, profundidad y producción del agua para el acuífero subterráneo
- Disponibilidad de tierra y costos para la obra de pozos, tuberías, servicio de energía, etc.
- Permisos requeridos, derechos de agua y aprobaciones ambientales.

Las siguientes secciones describen nuestros criterios de diseño asumidos en base a proyectos anteriores que nuestro personal ha realizado en el sur de California. Se requeriría un estudio adicional extenso para desarrollar un costo total estimado más preciso para tal proyecto.

CRITERIOS DE DISEÑO. La Tabla 3 contiene la capacidad propuesta del proyecto utilizado para desarrollar nuestros criterios de diseño. Nuestros criterios de diseño propuestos se incluyen en la Tabla 4.

Tabla 3. Capacidad del proyecto

Parámetros	Capacidad
Producción anual	50,000 AFY
Flujo máximo	31,000 GPM
Tiempo de funcionamiento	24 horas por día
Operaciones en el año	365 días

Tabla 4. Criterios de diseño

Parámetros	Cantidades
Número de pozos	22 (20 + 2 de reserva)
Flujo de pozo	1500 GPM
Nivel de agua estático	60 ft
Reducción	40 ft
Elevación total	100 ft
Pérdida de carga de la tubería	14 ft
Presión mínima de tubería	23 ft
Carga dinámica total	137
Motor de bomba	75 HP
Consumo de energía a 1,500 GPM	43 KW
Longitud de tubería	10,560 ft
Diámetro de tubería	54 In

ESTIMACIÓN DEL COSTO DE CAPITAL. Hemos supuesto que se requeriría un total de 20 pozos para producir el flujo total de 31,000 GPM. Se necesitarían dos pozos adicionales para los pozos de reserva. Se supuso que cada pozo tenía una profundidad total de 200 pies y un nivel de agua estático de 60 pies por debajo de la superficie del suelo. Los pozos deben construirse de acero inoxidable 304 con mallas de barretas. También se debe instalar un sello sanitario de 50 ft. Se incluyó una tubería conectora de 12 pulgadas de 1,000 ft de largo para conectar el pozo a la tubería de 54 pulgadas.

Los pozos estarían equipados con bombas de turbina vertical de 75 HP, tubería sobre el suelo, válvulas, electricidad e instrumentación. Todo el equipo estaría en una plataforma de concreto y resistente a la intemperie. La tubería se dimensionaría para minimizar la pérdida de carga y reducir los costos de energía. Se supone que la tubería se construiría en terreno abierto con cruces de servicios públicos menores. La profundidad promedio de la tubería sería de 4 pies por debajo de la superficie del suelo.

La Tabla 5 contiene el costo de capital estimado del proyecto en base a proyectos similares contratados en el sur de California.

Tabla 5. Estimación de costos de capital

Ítem	Costo unitario	Cantidad	Total
Campo de pozos			
Perforación de pozos	\$403,000	22	\$8,866,000
Equipamiento de pozos	\$628,000	22	\$13,160,000
Movilización, permisos, puesta en marcha	\$92,000	22	\$2,024,000
Subtotal			\$24,050,000
Tubería de 54 pulgadas	\$865	10,560	\$9,134,000
Tubo conector de pozo de 12 pulgadas	\$85	22,000	\$1,870,000

Ítem	Costo unitario	Cantidad	Total
Válvulas y accesorios	Suma global	1	\$200,000
Subtotal			\$11,204,000
		Total	\$35,254,000
		Contingencia 25%	\$8,814,000
		Total general	\$44,068,000

ESTIMACIÓN DE COSTOS OPERATIVOS. Los costos operativos se basan en los costos de energía calculados a una tasa de \$0.12 KWH para que los pozos produzcan 50,000 AFY. Hemos supuesto que los pozos necesitarán ser renovados cada 5 años a un costo de \$225,000 para retirar las bombas, limpiar las mallas y bombear el empaque de grava. También se han incluido mano de obra, permisos y obtención de muestras de la calidad del agua. Los costos operativos para la mano de obra y el mantenimiento de las tuberías se calcularon con base en los costos por pie para operar los sistemas de tuberías en el sur de California. Los costos operativos se incluyen en la Tabla 6.

Tabla 6. Estimación de costos operativos

Ítem	Costo unitario	Cantidad	Total
Campo de pozos			
Energía de bombeo de pozos	\$0.12 KWH	7,534,000 KWH	\$904,000
Rehabilitación de pozos	\$45,000/pozo	22	\$990,000
Mano de obra operativa, permisos, obtención de muestras	\$40,000/pozo	22	\$880,000
Subtotal			\$2,774,000
Mano de obra de tuberías de 54 pulgadas	\$8/ft	10,560	\$84,000
Mano de obra de tubo conector de pozo de 12 pulgadas	\$6/ft	22,000	\$132,000
Válvulas y accesorios	Suma global	1	\$50,000
Subtotal			\$266,000
		Total	\$3,040,000
		Contingencia 25%	\$760,000
		Total general	\$3,800,000

1.2.9. Resumen de Costos del Sistema para el Concepto de Sephton Water Technology

Los costos totales del sistema que se muestran en la Tabla 7 se estimaron con base en la necesidad de cinco plantas desalinizadoras, cada una con una producción de agua de 20 MGD, estanques de evaporación de salmuera, tubería de distribución de agua tratada y un sistema de pozos de agua subterránea para proporcionar 50,000 AFY adicionales de agua a Salton Sea.

Tabla 7. Estimación del costo total del sistema

Costos de capital del sistema de desalinización	2022 \$	\$M
Costo de capital por planta excluyendo el trabajo de obra	\$593,723,716	\$594 M
Número de plantas		5
Factor suponiendo una economía de escala del 10%		90%
Costo total de cinco plantas		\$2,672 M
Costos de operación del sistema de desalinización		
Costo por 1,000 galones	\$4.04	
Costo MGD	\$4,040	
MGD	100	
Costo por día	\$404,000	
Días por año	365	
Costo por año	\$147,460,000	\$147 M
AFY	112,000	
Costo por AF	\$1,317	
Costos operativos y de capital de los estanques de salmuera		
Flujo anual de salmuera (10.7 MGD por planta)	71,969	AFY
Flujo mensual de salmuera (10.7 MGD por planta)	5,997	AFM
Evaporación invernal más filtración	0.5	ft/mes
Área de estanques de salmuera (acres)	11,995	
Costo por acre de estanques de salmuera	\$33,000	En base a la estimación del DWR del Complejo de Hábitats Salinos (SHC) en dólares de 2022
Costo total de estanques (\$)	\$395,827,307	\$396 M
Descuento (20%)	0.8	Algunos elementos del SHC no son necesarios
Operaciones de estanques (5% del costo de capital)	5%	Coherente con la estimación del DWR para operar el SHC
Operaciones de estanques		\$16 M

Costos de capital del sistema de desalinización	2022 \$	\$M
Tubería de distribución		\$240 M, estimación de Sephton Water Technology
Costo de capital de pozos de agua subterránea y tuberías de transporte (50,000 AFY)		\$44 M
Costo operativo del sistema de pozos de agua subterránea		\$4 M
Costo de capital total (\$M)		\$3,272 M
OMER total (\$M)		\$167 M

1.3. Referencias

1. Salton Sea Water Recycling Project, Response to Request for Salton Sea Restoration Concepts, Offered by Sephton Water Technology, Inc., abril de 2020.
2. Tom Sephton, Appendix D_SSWRP_VTE-MED_CostCalculation_2022_v03.
3. Mark Wilf, Personal communication with thermal process desalination experts.
4. Brine-Concentrate Treatment and Disposal Options Report, Southern California Regional Brine-Concentrate Management, Study – Phase I, Lower Colorado Region, US Bureau of Reclamation (octubre de 2009)
5. Equipment quotes and desalination plant budget for the 50 MGD Seawater RO Desalination Plant, Carlsbad, CA (2009)
6. DGS California Construction Cost Index (CCCI) (años 2009–2022)
7. Michael Mickley, Membrane Concentrate Disposal: Practices and Regulation, Final Report for U.S. Department of The Interior, Bureau of Reclamation, septiembre de 2001.
8. Información proporcionada por el fabricante de grandes sistemas MED (comunicación personal).
9. Comunicación personal con expertos en desalinización de procesos térmicos.
10. GE offer for supply brine concentrators for Ft. Irwin project (2012)
11. <https://www.ge.com/in/sites/www.ge.com.in/files/GE-recycle-water-with-zero-liquid-discharge.pdf>
12. Información proporcionada por Nickel Institute

Anexo G: Investigación de Métodos de Desanilización

13. Tom Sephton, Appendix O Desalt Plant Seawater Intake Cost
14. Aqseptance Group – Cotización de Johnson Screens
15. Cotización de Poseidon Barge Ltd
16. Jim Eagle Company – Catálogo de productos HDPE
17. HDPE, precios globales: <https://www.statista.com/statistics/1171074/price-high-density-polyethylene-forecast-globally/>

©2024



PROGRAMA DE GESTIÓN DE SALTON SEA



CALIFORNIA
NATURAL
RESOURCES
AGENCY

