



SALES DE
JUJUY

GRUPO OROCOBRE



INFORME BALANCE HIDRICO DE LA CUENCA DEL SALAR DE OLAROS- CAUCHARÍ

Operación Minera Olaroz

Autor: Francisco Romero

28/12/2019

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Ubicación y accesos	3
2. CUENCA DE OLAROS CAUCHARI	4
3. PRECIPITACIONES	4
4. ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL	5
4.1. Aforo Río Archibarca	6
4.2 Río Rosario.	6
5. BALANCE HIDRICO	6
5.1 Importancia del estudio del balance hídrico	6
5.2 Desarrollo	6
5.3 Metodología	7
5.3.1 Identificación de los componentes del Balance	7
5.4 Cuantificación del Componente Individual	9
5.4.1 Precipitación	9
5.4.2 Afluencia de aguas superficiales	10
5.4.3 Agua Superficial de Inundación	11
5.4.4 Afluencia de aguas subterráneas	11
5.4.5 Evaporación	13
5.4.6 Se introdujo estos datos en la ecuación.	16
6. BIBLIOGRAFÍA	17

1. Introducción

En la Cuenca del Salar de Olaroz-Cauchari (la "Cuenca"), desde hace aproximadamente diez (10) años se encuentran en desarrollo tres (3) emprendimientos mineros (Sales de Jujuy S.A. ("SDJ") en Olaroz, South American Salars S.A en Cauchari, y Minera Exar S.A. en Olaroz Cauchari) que tienen por objetivo producir Carbonato de Litio a partir de la extracción de salmueras enriquecidas en Litio y Potasio (dos (2) con Informe de Impacto Ambiental (IIA) aprobado y otro en trámite), además de ser ella sustento de la actividad ganadera que generan los pobladores de la región. Es en razón de esas múltiples actividades que es de suma importancia estudiar y conocer el comportamiento Hidrológico e Hidrogeológico de la Cuenca. Existen diferentes investigaciones de prestigiosos estudiosos de las Universidades del Norte Argentino y de entidades públicas, que se centraron en reconocer los diferentes aspectos biológicos, geológicos y mineros que caracterizan a la Puna Argentina, sus aportes condujeron a determinar la importancia de sus Salares, pues alojan además de boratos y sulfatos, salmueras enriquecidas en Litio y Potasio, el recurso que se vislumbra como estratégico del siglo XXI.

Desde el punto de vista hidrogeológico es muy poco lo que se conoce hasta la actualidad de los Salares, pues se trata de un sistema complejo, que puede llegar a contener ciertas características similares a otros ambientes hidrogeológicos pero existen otras características que lo hacen un sistema único.

Es por esta razón que SDJ continúa centrando sus esfuerzos en investigaciones que conduzcan a conocer el funcionamiento y el potencial hidrogeológico de la Cuenca, con vistas de desarrollar una herramienta de gestión, que permita el uso, regulación y protección de recurso hídrico subterráneo, en un marco de sustentabilidad.

Una de las herramientas más eficientes y modernas de gestión es la modelación numérica donde se intenta reproducir todos aquellos fenómenos que condicionan el de transporte y flujo de las aguas subterráneas. Para ello se emplean modelos numéricos computarizados, que resuelven las ecuaciones que gobiernan el flujo del agua a través del medio poroso, tales como el definido por Betancur & Palacio (2009)

Uno de los primeros requisitos en la gestión de las aguas subterráneas es conocer el funcionamiento de las cuencas, su evolución en el tiempo, su capacidad de autorregulación y

sobre todas las cosas, establecer un balance hídrico que permita conocer las variaciones del almacenamiento, ante ciertas condiciones climáticas y/o ante ciertos escenarios de uso del recurso, tanto actual como futuro.

1.1 Ubicación y Accesos

El sector de interés "Operación Sales de Jujuy" se encuentra en el Dpto. Susques, al oeste de la Provincia de Jujuy, República Argentina; dista aproximadamente a 230 Km al noroeste de la Ciudad de San Salvador de Jujuy, a una altitud de 3900 msnm. El acceso desde la ciudad de San Salvador de Jujuy, se puede realizar por Ruta Nacional N°9, hasta la localidad de Purmamarca, donde se empalma con la Ruta Nacional N°52, se transita por esta 160 km atravesando las localidades de Puerta de Lipán, Salinas Grandes, Susques, hasta empalmar con Ruta Provincial N°70, recorreremos 3 km para llegar al Proyecto.

La zona de estudio comprende la cuenca de los salares de Olaroz y Caucharí (Fig.1), situada en una meseta en la región de la Puna, formando una depresión elongada de dirección Norte-Sur, coincidente con la orientación de las cordilleras que la flanquean al Oeste y al Este.

Fig. 1. Ubicación de la cuenca Olaroz-Caucharí (Fuente: Advantge Lithium).



SALES DE
JUJUY



2. Cuenca de Olaroz-Cauchari.

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2003), considera a esta como una subcuenca integrante de la Gran Cuenca Endorreica de la Puna, denominándola *Subcuenca Cauchari-Olaroz*, la misma está integrada por los dos (2) salares homónimos, donde su drenaje superficial se encuentra dividido en su parte media por la unidad geomorfológica "Cono de Archibarca".

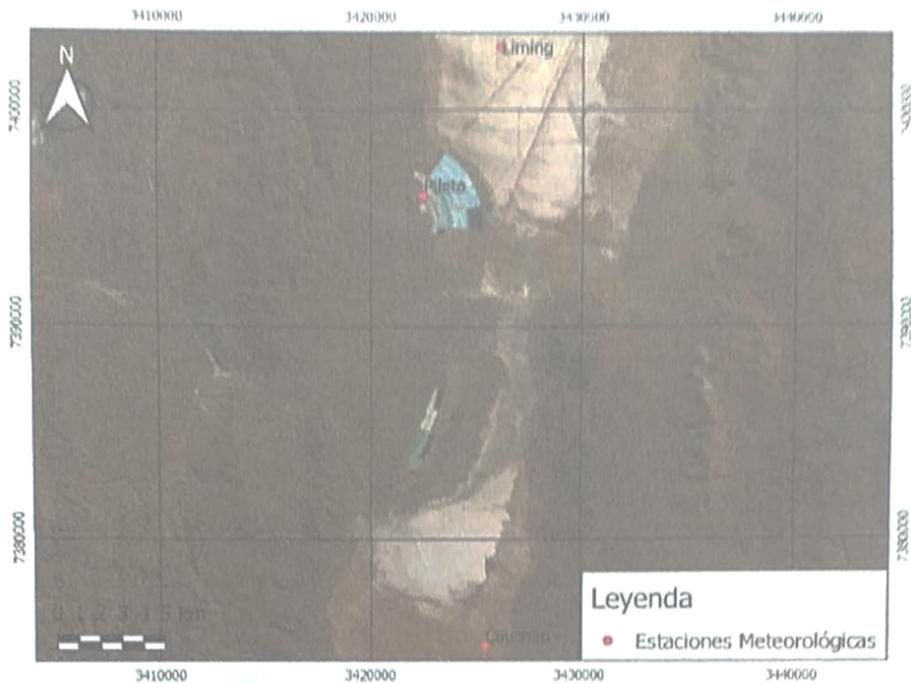
3. Precipitaciones.

En la actualidad, SDJ tiene instaladas estaciones meteorológicas en el sector denominado "Pileta y Liming", situadas directamente en el área de su operación minera para el registro de la información con una programación temporal de horas y otra ubicada en el Salar de Cauchari.

Fig. 2. Ubicación de las estaciones meteorológicas Pileta, Liming y Cauchari.



SALES DE JUJUY



,En la Tabla N° 1 se listan todas las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona aledaña. Para el presente balance sólo se ha calculado las precipitaciones directas en las superficies de los salares de Olaroz y Cauchari siendo las más representativas las estaciones de SDJ de Liming, Pileta y Cauchari, por lo que estas son las utilizadas en el presente trabajo.

Tabla 1. Ubicación y estado actual de las estaciones meteorológicas.

Estación	UTM X	UTM Y	Cota (m s.n.m.)	Fuente
Cianzo	3580172	7431371	3415	IIA2010
La Quiaca	3541197	7527139	3442	SMN
Abra Pampa	3520532	7477717	3450	IIA2010
Barrios	3546386	7540413	3500	IIA2010
Coctaca	3573936	7553226	3573	IIA2010
Abra Laite	3522183	7437108	3620	IIA2010
Susques	3448903	7409349	3675	IIA2010
Mina Concordia	3459363	7324467	3760	IIA2010
S.A. de los Cobres	3467832	7322642	3775	IIA2010
Olacapato	3426805	7333198	3820	SMN
Liming	3426177	7402921	3904	SDJ
Sey	3530820	7488773	3920	IIA2010
Olaroz	3423392	7401854	4000	IIA2010
Pileta	3422504	7396003	3942	SDJ
Cauchari	3425501	7374878	3918	SDJ

4. Esguerrimiento Superficial.

SDJ monitorea los ríos Rosario y Archibarca, los más importantes de la subcuena de Olaroz.

Los métodos aplicados para estimar los flujos de los ríos son el Volumétrico, Flotador, en la Tabla N° 2, se representan las coordenadas de los puntos de aforo. Estos métodos son de uso generalizado en la industria y su descripción puede encontrarse en Basán (2008).

Tabla N° 2. Coordenadas puntos de aforo.

Punto	X	Y	Técnica
Archibarca	3413612	7387796	Medidor de caudal-Volumétrico
Río Rosario	3432000	7443020	Medidor de caudal



4.1 Aforo Río Archibarca

Los datos usados en el presente documento de balance hídrico de la cuenca se ha realizado con los datos presentados en las actualizaciones de los IIA presentados a la Secretaría de Minería e Hidrocarburos por parte SDJ.

4.2 Río Rosario

Los datos usados en el presente documento de balance hidrico de la cuenca se ha realizado con los datos presentados en las actualizaciones de los IIA presentados a la Secretaría de Minería e Hidrocarburos por parte de SDJ.

5. BALANCE HIDRICO

5.1 Importancia del estudio del balance hídrico

A partir de un estudio del balance hídrico es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre. El conocimiento de la estructura del balance hídrico es fundamental para conseguir un uso más racional de los recursos de agua en el espacio y en el tiempo.

Para elaborar es importante crear un modelo conceptual sobre el funcionamiento del sistema, cuáles son las entradas de agua, por dónde sale, cómo circula, entre otras cuestiones.

El principal obstáculo que se presenta es por la falta de alguna información necesaria, los datos disponibles nunca son suficientes para delimitar una definición nítida y fiable de las características del sistema. Es por eso que a veces se tiene que introducir hipótesis, o usar pistas indirectas. Esto no quita que debido a la escasa falta de datos prescindir del rigor técnico o científico, sino, a evaluar exhaustivamente toda información disponible.

5.2 Desarrollo

El balance hídrico del presente trabajo se realizó mediante la ecuación de la continuidad basada en el principio de Lavoisier.

$$I-E=+/- \Delta V + Error$$

Ese principio establece que la diferencia entre el ingreso y el egreso del sistema que se ha definido debe ser igual al cambio de agua en almacenamiento (considerando cierto margen de error). La ecuación del balance hídrico tiene un componente de error, el cual incluye errores en

la determinación de los parámetros, errores en los cálculos realizados y errores debido a componentes no considerados.

5.3 Metodología

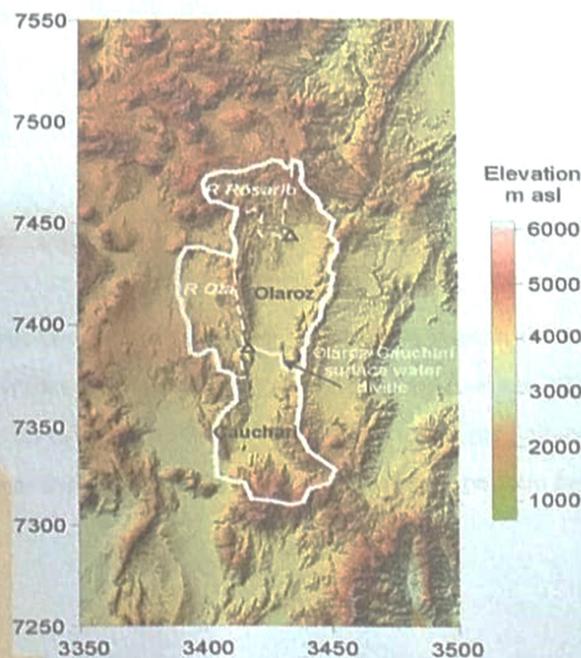
5.3.1 Identificación de los componentes del Balance

El Salar de Olaroz es una cuenca cerrada (endorreica), es decir que no hay orificios de salida de aguas subterráneas. En consecuencia, todas las aguas que ingresan al Salar desde las cuencas circunvecinas deben perderse, bajo condiciones normales, por evaporación. Para la finalidad de evaluación del balance hídrico, se considera que el Salar incluye tanto el núcleo como las zonas marginales circundantes.

Varias fuentes de aguas superficiales se escurren al Salar, siendo la de mayor importancia el Río Rosario y otra a través del Río Ola (Río Archibarca), que ingresa vía el abanico fluvial Archibarca.

En la Figura N° 4 se identifican las captaciones de aguas superficiales basadas en el modelo de cota digital USGS SRTM. Los triángulos sombreados en color blanco en la figura N° 4 indican los puntos de medición del caudal para los dos (2) drenajes mayores donde la mayor parte de su caudal se infiltra a los sedimentos de la cuenca.

Figura N° 4



El balance hídrico para el Salar de Olaroz está dado mediante la siguiente ecuación:

$$P + ISW + IGW = E$$

Ingresos

Donde P es la precipitación que se descarga dentro del Salar y sus márgenes, ISW es el componente de ingreso del agua superficial, IGW es el componente de entrada del agua subterránea.

Egresos

E representa la evaporación desde el agua abierta y suelos dentro del Salar y sus zonas marginales. El balance hídrico se puede calcular para cualquier intervalo de tiempo.

Los balances hídricos para valores medios se calculan para un ciclo anual (año calendario o año hidrológico), aunque también pueden hacerse para cualquier estación o mes.

La determinación del balance hídrico para un (1) año medio es el caso más simple, ya que se puede despreciar la variación del volumen de agua almacenada en la cuenca (ΔV), que es difícil de medir y calcular. Para un largo período los incrementos del agua almacenada, positivos y negativos, a escala anual, tienden a equilibrarse y su valor neto al final puede considerarse igual a cero.

Donde podemos decir:

$$I = E$$

I=Ingreso; E=Egreso

5.4 Cuantificación del Componente Individual

5.4.1 Precipitación

Los datos que se consideran en este balance hídrico para la zona del Salar, pertenecen a las precipitaciones registradas en nuestras estaciones de SDJ desde el año 2010 hasta el 2018 (tabla 3), debido a que son las estaciones más representativas de las precipitaciones ocurridas en los salares. El valor de la precipitación media anual para para este período fue de 155 mm.



Tabla N° 3. Caudales Aforados.

Año	Precipitación (mm)
2010	123
2011	247
2012	356
2013	140
2014	85
2015	106
2016	38,38
2017	106,2
2018	188,8

5.4.2 Afluencia de aguas superficiales

Para el cálculo de la afluencia de las aguas superficiales de los ríos Rosario y Archibarca se han usado los datos presentados en las actualizaciones de los IIA de SDJ y que se resumen en la tabla 4.

Tabla N° 4. Caudales Aforados.

Mes	Caudal Archibarca (L/s)				Caudal Rosario (L/s)				
	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019
Enero	3,88	4,61	5,89	4,30	189,00	80,90	426,30	159,60	288,71
Febrero	5,34	5,52	8,27	8,68	205,00	187,45	598,20	2.352,60	200,90
Marzo	4,92	7,28	4,92	5,96	1.734,00	100,83	864,40	677,15	579,50
Abril	6,71	7,14	7,33	8,76	1.226,00	338,45	208,90	419,77	435,15
Mayo	8,60	11,05	12,44	9,50	464,94	133,85	242,55	349,53	523,48
Junio	10,26	13,46	9,03	12,66	462,00	343,20	621,25	631,62	469,70
Julio	16,44	13,40	12,77	12,89	374,00	324,98	938,14	576,23	409,98
Agosto	12,69	13,89	13,01	14,62	566,00	321,35	483,00	235,43	392,53
Septiembre	10,09	9,97	11,54	13,88	239,00	239,25	275,97	338,00	239,36
Octubre	6,75	6,12	6,20	8,43	97,35	109,90	122,83	170,73	133,43
Noviembre	5,49	4,70	4,67	6,07	87,01	75,00	85,28	92,40	131,50
Diciembre	4,73	4,09	4,04	5,60	55,03	81,16	88,12	82,35	64,38
Promedio	8,51				382,41				

El río Rosario entra a la cuenca de Olaroz desde el norte. Forma un delta en abanico de poca profundidad y en declive donde emerge a partir de rocas basamento de su captación que finaliza en el Salar. Pese a su relativamente pequeña área de captación de aproximadamente 600 km²,



su importante relieve que varía desde casi 5.000 msnm de su nacimiento en las laderas del volcán Toma, a 4.000 msnm en el Salar, hace que atraiga importante precipitación y, en consecuencia, también un importante correntada. El promedio del caudal intrínseco es 382,41 l/s equivalentes a 12.059.682 m³/a.

El Río Archibarca ingresa a los Salares de Olaroz y Cauchari a través del abanico aluvial Archibarca desde el sudoeste. Su área de captación es doble del tamaño que aquel que corresponde al Río Rosario con aproximadamente 1200 km², pero el relieve es mucho menor con una cota máxima de 4.400 msnm. El promedio del caudal intrínseco es 8,51 l/s equivalentes a 268.371 m³/a.

Para el aporte de las cuencas del borde del Salar de las que SDJ no tiene datos en la actualidad se han usado los datos presentados por las compañías Advantge Lithium Ltd. y Lithium Americas Ltd. en sus respectivos IIAs presentados para sus controladas South American Salars S.A. y Minera Exar S.A. respectivamente.

5.4.3 Agua Superficial de Inundación

Los caudales de inundación, como una consecuencia del caudal por tierra directo, no tamponado (unbuffered) fueron estimados en base al método del área de la pendiente (Benson, 1968). Los perfiles cruzados y longitudinales fueron estudiados desde un radio de alcance uniforme del canal, hasta el nivel más elevado de los depósitos recientes sobre la rivera). El perfil cruzado fue dividido en secciones y coeficientes de resistencia estimados para el cauce de cada sección utilizando "Manning's n values for Channels" (Chow, 1959). En base a esta información, se ha estimado un caudal pico del ~10 m³/s, y un caudal máximo en el año de 1.3x10⁶ m³.

5.4.4 Afluencia de aguas subterráneas

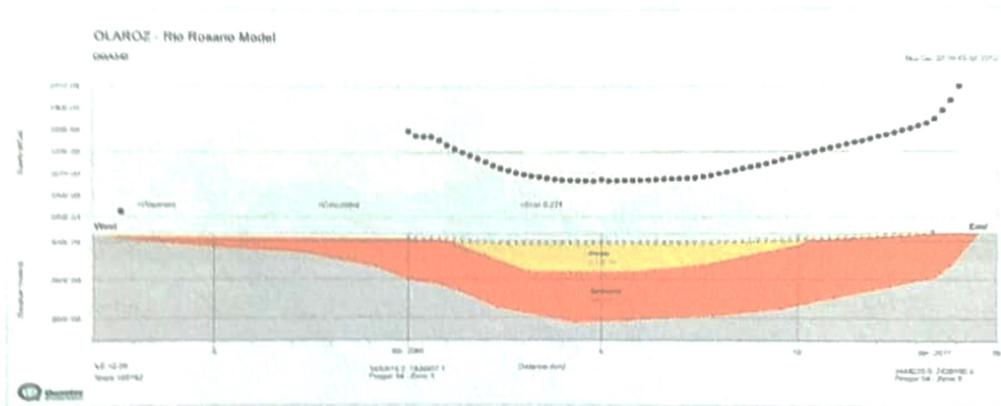
Las aguas subterráneas ingresan a la cuenca desde dos fuentes importantes, el delta-abanico del Río Rosario por el norte, y el abanico aluvial Archibarca en el sudoeste. A fin de evaluar el ingreso de esas aguas subterráneas, se efectuaron reconocimientos geofísicos para estimar el área de flujo transversal, en combinación con ensayos de bombeo sobre los pozos perforados para determinar la permeabilidad, para que, esta manera, pueda utilizarse la Ley de Darcy, que enuncia:

$$Q = K * i * A$$

Donde Q es el caudal, K es la permeabilidad (estrictamente conductividad hidráulica), i es el gradiente y A el área transversal a través de la cual se produce el caudal.

Los datos de gravedad fueron recopilados a lo largo del perfil de 12 km de oeste al este de la cuenca Rosario. El modelo del perfil gravimétrico (Figura 5) muestra que estos sedimentos planos de crecidas pueden tener un espesor de hasta 400 m y un área transversal de aproximadamente 2.1×10^6 m².

Fig. 5. El perfil gravimétrico observado y modelado a través del delta-abanico Rosario en 7428N.



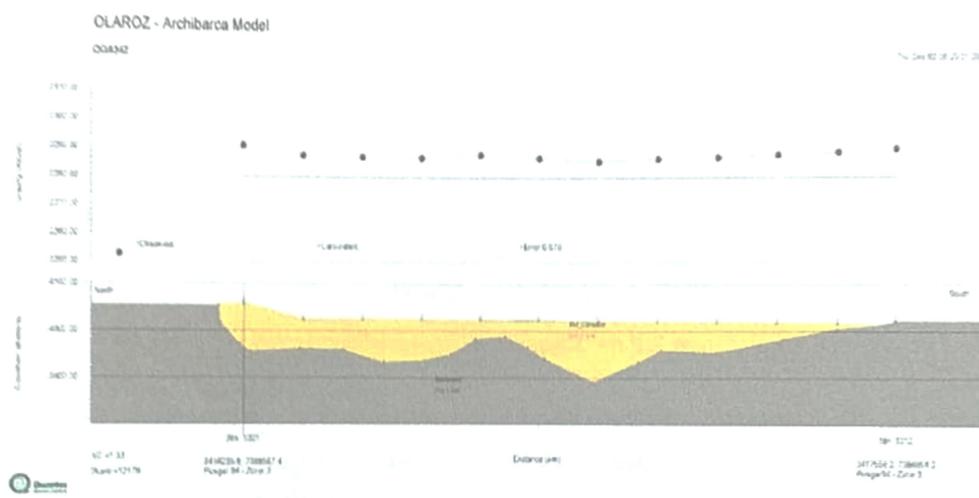
El caudal de aguas subterráneas se produce en dirección norte – sur a través de estos sedimentos no-consolidados hacia el centro del Salar de Olaroz con un gradiente de 0.0025. La interpretación de los datos de ensayos de bombeo desde el pozo de exploración de suministro de agua WSE-1 indica que los sedimentos poseen una permeabilidad de hasta 40 m/d. Suponiendo una conductividad hidráulica promedio de 20 m/d a través de todos los tipos de sedimento en el delta-abanico, la afluencia de aguas subterráneas a la parte norte del Salar de Olaroz es estimada en $38,3 \times 10^6$ m³/a.

En forma similar, los datos de gravedad fueron recopilados a lo largo del perfil norte-sur de 2 km a través del abanico de Archibarca en 3418E. Los resultados del modelo de gravedad (Fig. 6) muestran que los sedimentos aluviales pueden tener un espesor de hasta 100 m y un área transversal de aproximadamente 90.000 m².



El caudal de aguas subterráneas se produce de oeste a este a través del abanico aluvial a los Salares de Olaroz y Cauchari con un gradiente de 0.0075. Con una permeabilidad similar para estos sedimentos de 20 m/d, la afluencia de aguas subterráneas es estimada en 4.9 millones de m³/a.

Fig. 6. El perfil de gravedad observado y modelado a través del abanico aluvial Archibarca en 3418E.



Para los aportes de las cuencas del borde del Salar de las que SDJ no tiene información en la actualidad se han usado los datos presentados por las compañías Lithium Americas Ltd. y Advantge Lithium Ltd. en sus respectivos IIAs de sus controladas Minera EXar S.A. y South American Salars S.A., a excepción de los aportes del Río Rosario y del Río Archibarca.

5.4.5 Evaporación.

Las tasas de evaporación utilizadas son las presentadas en los Informes de Impacto Ambiental del Proyecto Olaroz de Sales de Jujuy desde el año 2014. Mediante la identificación de diferentes tipos de suelo y profundidades hasta el nivel freático mediante el uso e interpretación de imágenes satelitales, en conjunto con reconocimientos de suelo, desde SDJ se pudo elaborar un mapa de diferentes tipos de suelo y zonas de evaporación para el Salar y sus zonas marginales (Figura N° 7). Mediante la metodología detallada en Houston (2006) fueron estimadas las tasas de evaporación en promedio para cada una de estas zonas, independientemente de los resultados de evaporación desde bandejas (pan evaporación).



SALES DE
JUJUY



- Zona 1: el núcleo del salar (costra salina) con el promedio anual de inundación durante los dos (2) meses de la estación húmeda, y con la estación seca de diez meses. La tasa de evaporación promedio anual es calculada en 1,1 mm/d. Zona 1 cubre un área de 50 km² en el Salar de Olaroz.
- Zona 2: el núcleo del salar (costra salina) sin inundación anual. El promedio de la tasa anual de evaporación se estableció en 0,04 mm/d. La zona 2 cubre un área de 105 km² en el Salar de Olaroz.
- Zona 3: la zona marginal con profundidades hasta el nivel del agua subterránea es de aproximadamente 0,5 m. El promedio del índice de evaporación anual es calculado en 1,6 mm/d. La zona 3 cubre un área de 80 km² en el Salar de Olaroz.
- Zona 4: la zona marginal con la profundidad hasta el nivel freático es mayor de 1,0 m. El promedio del índice de evaporación anual es calculado en 0,6 mm/d. Zona 4 cubre un área de 115 km² en Salar de Olaroz.

Figura 7. Zonas de evaporación del Salar de Olaroz y sus zonas marginales, con estimaciones del promedio de evaporación diaria para cada zona, en base a la profundidad hasta el nivel freático y la densidad del líquido, ponderada a partir de datos medidos en el Salar de Hombre Muerto.



SALES DE
JUJUY

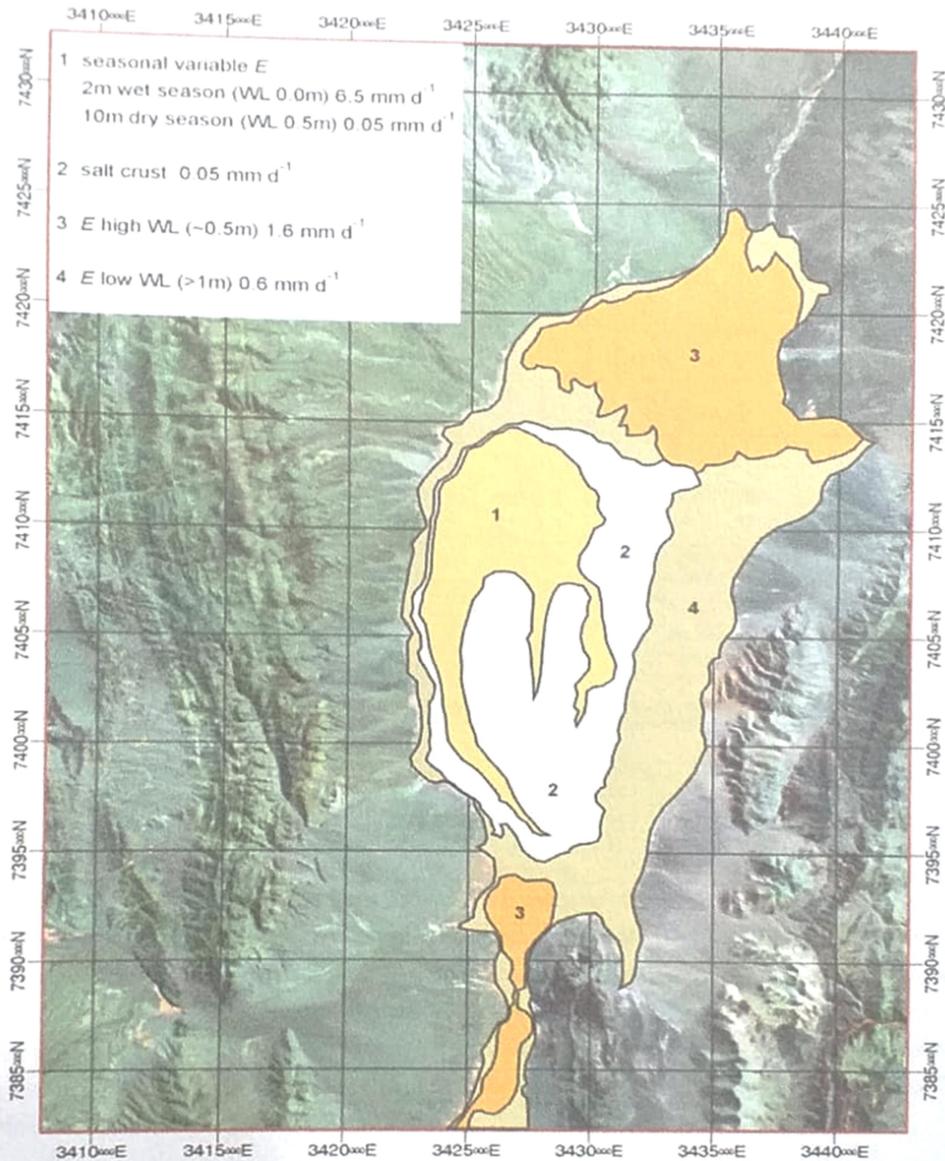


Fig.7. Zonas de Evaporación.

Para estimar la evaporación desde el Salar de Cauchari, se aplicó una media ponderada con la superficie de los datos existentes en Salar de Olaroz.



SALES DE
JUJUY



6. Bibliografía Consultada

Betancur & Palacio. LA MODELACION NUMERICA COMO HERRAMIENTA PARA LA EXPLORACION HIDROGEOLOGICA Y CONSTRUCCION DE MODELOS CONCEPTUALES. 2009.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS Y TECNOLOGIA DE RIEGO EN EL ALTIPLANO ARGENTINO. 2003.

Chow, V.T. Open Channel Hydraulics, 1959.

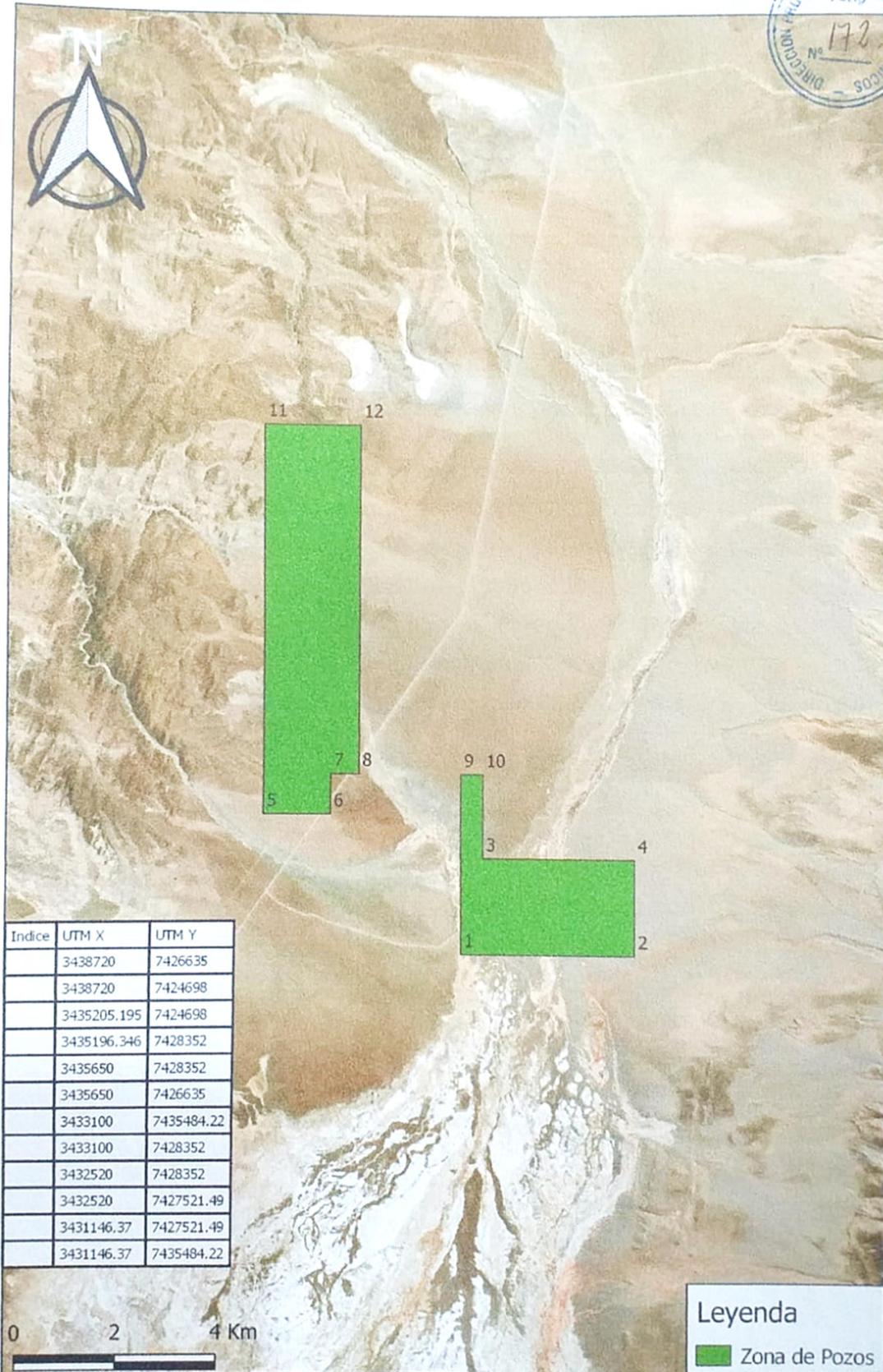
Alonso, R. N. Los salares de la Puna y sus recursos evaporíticos, Jujuy, Salta y Catamarca. En Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. E. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales. SEGEMAR, 1999.

SEGEMAR, 2008. Hoja Geologica Susques, 2366-III. 1:250,000.

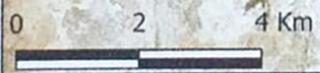
Houston, J. Evaporation in the Atacama desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. Journal of Hydrology. 2006.

Basan, Mario. Curso de Aforadores de Corrientes de Agua. INTA-EEA. 2008.

Anexo I



Indice	UTM X	UTM Y
	3438720	7426635
	3438720	7424698
	3435205.195	7424698
	3435196.346	7428352
	3435650	7428352
	3435650	7426635
	3433100	7435484.22
	3433100	7428352
	3432520	7428352
	3432520	7427521.49
	3431146.37	7427521.49
	3431146.37	7435484.22



Leyenda
 Zona de Pozos