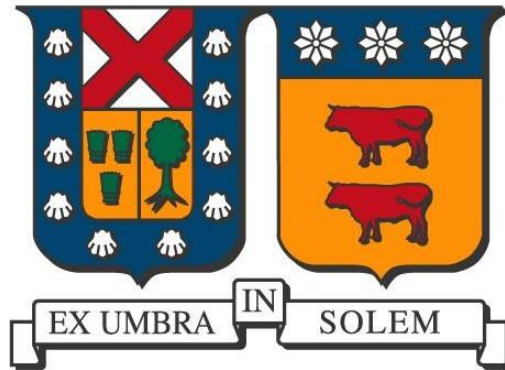


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



**“MODELACIÓN Y VALIDACIÓN DE TASAS DE
EVAPORACIÓN EN SALMUERAS DE NITRATOS BAJO
DISTINTAS CONDICIONES DE CONCENTRACIÓN DE SALES
Y CONDICIONES AMBIENTALES”.**

IVANIA CONSTANZA FERNÁNDEZ CUEVAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL QUÍMICA

PROFESOR GUÍA: CLAUDIO ACUÑA P.

PROFESOR CORREFERENTE: FERNANDO ESPERGUES

SEPTIEMBRE 2023

RESUMEN EJECUTIVO

La Sociedad Química y Minera Chilena (SQM) produce sales de nitratos a partir de caliche. La producción pasa por la explotación de la roca, chancado, lixiviación con salmueras. La solución resultante es concentrada en pozas sucesivas de evaporación solar (10 a 14 etapas). El tiempo de concentración depende de: la radiación, temperatura, velocidad del viento, la humedad, y el contenido de iones. Dada la variabilidad estacional y diaria de las condiciones meteorológicas, las tasas de evaporación varían entre 3 a 14 [L/m²/d], generando incertidumbre en el tiempo requerido para la concentración, y planificación de los tiempos de cosecha. Para reducir la incertidumbre se usan modelos predictivos de la evaporación en salmueras, con el fin de estimar la concentración de iones y con esto planificar el tiempo de cosecha.

Actualmente SQM utiliza el modelo de Penman (1948), basado en 5 parámetros climáticos y un factor de ajuste, en función de la concentración de Magnesio. Este modelo no contempla las variaciones climáticas o el tipo de iones. Como consecuencia, existe incertidumbre para establecer el tiempo de cosecha oportuna de la concentración final óptima de iones en las piscinas intermedias. En este contexto, se desarrolló y validó un modelo fenomenológico para predecir las tasas de evaporación dada las condiciones climáticas y concentraciones de iones más relevantes. Para esto: se analizaron datos meteorológicos e interrelaciones, se compararon alternativas de modelamiento de tasa de evaporación, se evaluó experimentalmente tasa de evaporación en salmueras, finalmente se desarrolló una nueva metodología para estimar tasas de evaporación en salmueras. Para los datos climatológicos se analizaron planillas mensuales (365 días), compiladas por un software implementado en matlab y analizando la interacción entre variables: Humedad y radiación, Temperatura y Radiación, y Humedad y velocidad del viento. Se compararon modelos fenomenológicos alternativos (Penman, deBruine, Priestley y Taylor y Balance de masa) y se validaron con datos climatológicos y un evaporímetro estándar en un periodo 15 meses. Los resultados indican errores desde 19% a 100% en los modelos como base, que luego de rectificar el modelo Penman y Priestley y Taylor, logrando un error de predicción de 10% y 13% (5 parámetros). Adicionalmente, se ajustó un modelo basado en redes neuronales (con 10 capas ocultas) y considerando los factores más influyentes (radiación y temperatura), logrando un error 3% de error (7 parámetros) y un 6%, con 3 parámetros el cálculo.

Para la validación experimental de las tasas de evaporación en salmueras, se utilizaron 13 isocontenedores abiertos (1m³) con 6 tipos de salmuera en duplicado y 1 muestra de agua, de las etapas de concentración con mayor variación de contenido de iones (1 línea base bin solo, y 6 tipos de salmuera). Los bins se dejaron en evaporación por 101 días, con medición diaria de nivel y caracterización de iones semanal, con reposición de nivel de salmueras (semanalmente). El modelamiento de los bins se desarrolla mediante el cálculo de las pendientes cada 3 días, y un modelo acumulativo en el tiempo. Al comparar con el modelo de redes se estima el valor futuro de la tasa de evaporación, se utilizó 7 días para la predicción y un modelo lineal con un error de predicción de 27% en los bins analizados.

Finalmente, la comparación de la metodología Penman actual (error 20% y 5 parámetros) para establecer tiempo de cosecha presenta diferencias entre 10 a 20 días respecto del modelo propuesto (redes neuronales con 3 parámetros y 6% error). En conclusión, la metodología propuesta basada en redes neuronales, se reduce la incertidumbre (20 a 6%) y se mejora la certeza del tiempo de cosecha, y adicionalmente se puede hacer una predicción futura de tasa de evaporación usando el forecast de la radiación y temperatura máxima y promedio.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO.....	2
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	3
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.2 OBJETIVOS.....	9
CAPÍTULO 2: PROCESO COYA SUR SQM.....	10
2.1 Proceso de producción de Nitratos, SQM.....	10
2.2 Proceso de Pozas Coya Sur.....	14
2.3 Estación meteorológica Coya Sur.....	15
2.4 Tasa de Evaporación Coya Sur.....	16
CAPÍTULO 3: POZAS Y ESCENARIO SOLARES.....	18
3.1 Descripción de pozas solares.....	18
3.2 Pozas Solares de gradiente salino.....	18
3.2.1 Configuración de las Pozas Solares.....	18
3.2.2 Factores operacionales de las pozas solares.....	19
3.3 Escenario solar en Chile.....	20
CAPÍTULO 4: TASAS DE EVAPORACIÓN.....	21
4.1 Descripción de tasas de evaporación.....	21
4.2 Factores que influyen en la Tasa de Evaporación.....	21
4.3 Análisis parámetros meteorológico 2022 Coya Sur.....	22
4.3.1 Análisis valores mensuales.....	22
4.3.2 Análisis interacciones de variables meteorológicas.....	25
CAPÍTULO 5: EXPERIMENTO A ESCALA Y RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO.....	32
5.1 Experimento Pozas en Coya Sur.....	32
5.2 Químicas.....	33
5.2.1 Química del agua.....	33
5.2.2 Química de la salmuera.....	33
CAPÍTULO 6: MODELOS FENOMENOLÓGICOS Y OBTENCIÓN DE TASAS DE EVAPORACIÓN.....	37
6.1 Explicación cálculo modelos.....	37
6.1.1 Penman.....	37
6.1.2 Modelo Ley de Dalton.....	37
6.1.3 Modelo basado en el balance de energía o masa.....	38
6.1.4 Modelo DeBruine.....	38

6.1.5 Modelo Priestley y Taylor.....	39
6.1.6 Modelo Hargreaves.....	39
6.1.7 Otros modelos.....	39
6.2 Resultados de los modelos.....	40
6.3 Análisis de los resultados obtenidos.....	44
6.3.1 Correlación con Evaporímetro.....	44
6.3.1 Correlación con factores meteorológicos.....	48
CAPÍTULO 7: ANALISIS Y RESULTADOS DE DATOS.....	50
7.1 Propuesta de tasa de evaporación.....	50
7.2 Método de obtención de modelo tasa de evaporación por condiciones meteorológica.....	50
7.3 Comparación modelo de redes neuronales.....	53
7.4 Análisis desviación estándar modelos.....	55
7.4 Análisis de pendientes tasa de evaporación experimental.....	57
7.4.1 Análisis cada 10 días app.....	57
7.4.2 Análisis cada 3 días.....	58
7.4.3 Análisis tasas experimental acumulada.....	60
7.5 Tasas de evaporación acumulada y [NO ₃].....	63
7.6 Análisis de tiempo de cosecha.....	66
7.7 Análisis de concentración química en la tasa de evaporación.....	69
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	70
8.1 CONCLUSIONES.....	70
8.2 RECOMENDACIONES.....	71
REFERENCIAS.....	72
ANEXOS.....	74
ANEXO 1: GLOSARIO.....	74
ANEXO 2: RELACIÓN ENTRE VARIABLES METEOROLOGICAS.....	76
ANEXO 3: PENDIENTES EXPERIMENTALES BINES (CADA 3 DIAS).....	79
ANEXO 4: MODELOS FENOMENOLOGICOS.....	81
Penman.....	81
Ley de Dalton.....	82
Balance de energía.....	83
ANEXO 5: CORRELACION ECUACIONES DE ANALISIS QUIMICO.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso productivo SQM (SQM S.A., 2023)	10
Figura 2 Diagrama proceso de lixiviación del mineral caliche	11
Figura 3 Diagrama proceso corrientes	12
Figura 4 Diagrama de bloque de procesos	12
Figura 5 Diagrama bloques PES	13
Figura 6 Cosecha sales Coya sur	14
Figura 7 Diagrama PES con corrientes	14
Figura 8 Circuito de pozas Coya Sur	15
Figura 9 Estación meteorológica Coya Sur	16
Figura 10 Partes de una poza solar	18
Figura 11 Disposición bins de experimentación	32
Figura 12 Diagrama del efecto del flujo de aire en la evaporación	37
Figura 13 Gráficos de Desviación estándar modelos fenomenológicos	56
Figura 14 Desviación estándar modelos lineales y redes neuronales	56
Figura 15 Desviación estándar redes neuronales (re-entrenado)	57
Figura 17 Pendientes experimental bin A2	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tasa de evaporación "Método A. Lara"	40
Tabla 2 Valores de correlación métodos	46
Tabla 3 Valores de correlación con factores meteorológicos	49
Tabla 4 Análisis de error modelos propuestos	51
Tabla 5 Pendientes pozas y promedios meteorológicos	58
Tabla 6 Correlación con pozas de evaporación experimental	59
Tabla 7 Correlación poza con su concentración	60
Tabla 8 Días necesario para alcanzar la concentración teórica de nitrato	67
Tabla 9 Glosario	74
Tabla 10 Correlación análisis químico	86
Tabla 11 Correlación análisis químico tren MLK	86
Tabla 12 Correlación análisis químico tren PDV	86

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Velocidad del viento Coya Sur 2022	23
Gráfico 2 Temperatura ambiental Coya Sur 2022	23
Gráfico 3 Humedad relativa Coya sur 2022	24
Gráfico 4 Radiación Solar Coya sur 2022	24
Gráfico 5 de Evaporación Coya Sur 2022	25
Gráfico 6 Hum vs Rad 14 a 16 hrs	26
Gráfico 7 Hum vs Rad 16 a 18 hrs	26
Gráfico 8 Hum vs Rad 12 a 14 hrs	27
Gráfico 9 Hum vs Vel 12 a 14 hrs	28
Gráfico 10 Hum vs Vel 14 a 16 hrs	28
Gráfico 11 Hum vs Vel 16 a 18 hrs	29

Gráfico 12 Tem vs rad 12 a 14 hrs	30
Gráfico 13 Tem vs rad 14 a 16 hrs	30
Gráfico 14 Tem vs rad 16 a 18 hrs	31
Gráfico 15 Química del Bin B1	34
Gráfico 16 Química del Bin 1	34
Gráfico 17 Química del Bin 3A	34
Gráfico 18 Química del Bin B2	35
Gráfico 19 Química del Bin 9	35
Gráfico 20 Química del Bin A2	35
Gráfico 21 Tasa de evaporación modelos Enero 2022 - Marzo 2023	41
Gráfico 22 Tasa de evaporación Salmuera evaporímetro	42
Gráfico 23 Tasa de evaporación Salmuera deBruine	42
Gráfico 24 Tasa de evaporación Salmuera Penman	43
Gráfico 25 Tasa de evaporación Salmuera Balance	43
Gráfico 26 Tasa de evaporación Salmuera Priestley y Taylor	44
Gráfico 27 Correlación Priestley y Taylor y Evaporímetro	44
Gráfico 28 Correlación Balance y Evaporímetro	45
Gráfico 29 Correlación deBruine y Evaporímetro	45
Gráfico 30 Correlación Penman y Evaporímetro	46
Gráfico 31 Corrección modelo de Priestley y Taylor	47
Gráfico 32 Corrección modelo de Penman	47
Gráfico 33 relación modelos con Radiación	48
Gráfico 34 relación modelos con Temperatura	48
Gráfico 35 relación modelos con Humedad	49
Gráfico 36 relación modelos con velocidad del viento	49
Gráfico 37 Análisis Tasa de evaporación modelo propuesto (M1 y M2)	51
Gráfico 38 modelo de redes neuronales 7 Parámetros	52
Gráfico 39 Tasa evaporación redes neuronales y experimental	53
Gráfico 40 modelo de redes neuronales 3 Parámetros	53
Gráfico 41 modelo de redes neuronales 2 Parámetros	54
Gráfico 42 modelo de redes neuronales 7 Parámetros reentrenado	54
Gráfico 43 modelo de redes neuronales 2 Parámetros reentrenado	55
Gráfico 44 Evaporación experimental pozas (3 días)	59
Gráfico 45 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (B1)	60
Gráfico 46 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (1)	61
Gráfico 47 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (3A)	61
Gráfico 48 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (B2)	62
Gráfico 49 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (9)	62
Gráfico 50 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (A2)	63
Gráfico 51 análisis poza B1	64
Gráfico 52 análisis poza 1	64
Gráfico 53 análisis poza 3A	65
Gráfico 54 análisis poza B2	65
Gráfico 55 análisis poza 9	66
Gráfico 56 análisis poza A2	66
Gráfico 57 Análisis Poza B1	68
Gráfico 58 Análisis Poza B2	68
Gráfico 59 Hum vs Rad 01 a 11 hrs	76
Gráfico 60 Hum vs Rad 12 a 18 hrs	76

Gráfico 61 Hum vs Vel 01 a 12 hrs	76
Gráfico 62 Hum vs Vel 12 a 18 hrs	77
Gráfico 63 Hum vs Vel 18 a 24 hrs	77
Gráfico 64 Hum vs Rad 18 a 24 hrs	77
Gráfico 65 Tem vs rad 01 a 11 hrs	78
Gráfico 66 Tem vs rad 12 a 18 hrs	78
Gráfico 67 Tem vs rad 18 a 24 hrs	78
Gráfico 68 Pendientes experimental bin B1	79
Gráfico 69 Pendientes experimental bin B2	79
Gráfico 70 Pendientes experimental bin 1	79
Gráfico 71 Pendientes experimental bin 9	80
Gráfico 72 Pendientes experimental bin 3A.....	80

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La empresa Sociedad Química y Minera (SQM) cuyo enfoque es la extracción de minerales, es capaz de integrarse selectivamente en el procesamiento y comercialización de productos para industrias esenciales para el desarrollo humano.

Alrededor del Desierto de Atacama se encuentran emplazadas las instalaciones productivas, donde cuenta con el acceso a las reservas más extensas de yodo y nitrato que se conocen en el mundo y las más altas concentraciones de litio y potasio en salmueras de las que se tenga registro en la actualidad.

Entre las plantas de producción se encuentran la división de Coya Sur, Sur Viejo - Nueva Victoria, en las cuales una de sus funciones principales es la producción de sales de nitrato de sodio y nitrato de potasio (SQM S.A., 2023). Los productos de Nitratos se obtienen del acceso que tiene SQM para trabajar con las grandes reservas naturales de caliche y salmueras en Chile.

En la producción nitrato en SQM se realiza a partir de salmueras, provenientes de lixiviación en pilas de caliche. Esta es concentrada por evaporación solar, en pozas, y luego, procesada en una planta química para producir cloruro de potasio o nitratos de potasio. La concentración en pozas es favorecida por las condiciones desérticas de alta radiación solar incidente y baja humedad ambiental. No obstante, la variabilidad meteorológica y composiciones de iones, genera incertidumbre en los tiempos de cosecha de las sales, impactando la capacidad de proceso y calidad de productos.

El tiempo de concentración en piscinas depende de las condiciones climáticas (radiación, temperatura, velocidad del viento, humedad) y también del contenido de iones, el que varía en la medida que la salmuera se concentra. Para el control operacional y planificación del traspaso de pozas se requiere una metodología y modelo que permita predecir las tasas de evaporación en función de las variables climáticas para los distintos tipos de soluciones. Actualmente, se utiliza el modelo de Penman (1948), que relacionan variables meteorológicas con la tasa de evaporación en agua, el que es ajustado con una correlación empírica que estima la evaporación de la solución en función de la concentración de magnesio. El ajuste, no ha sido revisado o actualizado; tampoco considera el efecto del tipo de salmuera, la que presenta variaciones significativas en las distintas etapas de evaporación.

Como consecuencia, se reduce la capacidad operacional y se aumenta la incertidumbre en las concentraciones de iones, lo que genera variaciones en los rendimientos de cosechas de sales y la precipitación oportuna de iones en las piscinas intermedias. En este contexto se propone desarrollar y validar un modelo fenomenológico que permita predecir las tasas de evaporación dada las condiciones climáticas y las concentraciones de iones más relevantes.

Como resultado esperado, se contaría con un modelo predictivo de tasa de evaporación validado con un pilotaje en faena que permita reducir la incertidumbre de los tiempos de evaporación en pozas de concentración, maximizando la capacidad de proceso y calidad de las sales producidas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer y validar modelos fenomenológicos que permita estimar y predecir las tasas de evaporación dadas las condiciones climáticas y concentraciones basado en data histórica y proponer un modelo fenomenológico sobre el cambio de las tasas de evaporación de agua en salmueras. Dicho cambio será evaluado en salmueras con distintas concentraciones de sales y bajo condiciones de estacionalidad de clima.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar modelos predictivo-alternativos, para las tasas de evaporación en condiciones desérticas, que permita relacionar las variables meteorológicas (radiación, temperatura, velocidad del viento, humedad).
- Diseñar y evaluar a escala piloto (iso contenedores de 1 m³), las tasas de evaporación para las distintas posas de cosecha (6 tipos), relacionando las variables meteorológicas con las composiciones de los iones más relevantes.
- Proponer y validar un modelo predictivo de la tasa de evaporación de salmuera considerando los 6 tipos de salmuera y las condiciones meteorológicas.
- Estimar la incertidumbre y exactitud del modelo para los tiempos de cosecha, para poder evaluar el impacto económico de la mejora en la predicción de tiempos de concentración

CAPÍTULO 2: PROCESO COYA SUR SQM

2.1 Proceso de producción de Nitratos, SQM

El proceso de obtención de los nitratos desde salmueras se resume en la Figura 1 (SQM S.A., 2023). En ella se aprecia el proceso desde que comienza con la extracción del caliche hasta la distribución de los nitratos en el puerto, en sus diferentes formatos.

En la primera etapa del proceso que se encuentra representada en la Figura 1, que corresponde a la explotación de la roca caliche, esta roca es llevada por un proceso de chancado para liberar el mineral de interés (dentro de los elementos presente en la composición del caliche se encuentra; Nitrato de Sodio (NaNO_3), Nitrato de Potasio (KNO_3), Cloruro de Sodio (NaCl), Yodato de Sodio (NaIO_3), Perclorato de Potasio (KClO_4), Sulfato de Magnesio (MgSO_4), Cloruro de Magnesio (MgCl_2) y Sulfato de Calcio (CaSO_4)) y posteriormente continua con el proceso, correspondiente a la lixiviación. En esta etapa las pilas son regadas con una mezcla de agua y solución intermedia, esta corresponde a una mezcla de iones, comprendida por la solución de descarte provenientes de la extracción de yodo denominada AFA (agua febre ácida) que posee principalmente iones de NaNO_3 , K, Mg, SO_4 y H_3BO_3 y agua. La solución resultante que se obtiene de la lixiviación resulta ser rica en diversos minerales, la cual es denominada Brine. Esta solución es enviada a la planta de Yodo, la cual es el mineral de interés principal. El AFA resultante vuelve como solución intermedia hacia las pilas de lixiviación, mientras que el resto se envía a las Pozas de Evaporación Solar (PES). En las PES, la solución se va concentrando en NaNO_3 , K, Mg, y otros iones, debido a la evaporación del agua por acción del sol, hasta su nivel de saturación y así favorecer la precipitación de sales con alta ley de nitrato. Posteriormente, esta solución es enviada a la “planta de productos intermedios” en donde se agregan sales de cloruro de potasio para formar el KNO_3 . Posteriormente, esta solución se traspasa a la “planta de productos terminados en donde el KNO_3 se seca, se cristaliza o se envía a prilado. Finalmente, el producto formado es enviado al por sacos de una tonelada al puerto de Tocopilla donde es exportado hacia los diversos países asociado a SQM (SQM S.A., 2023).

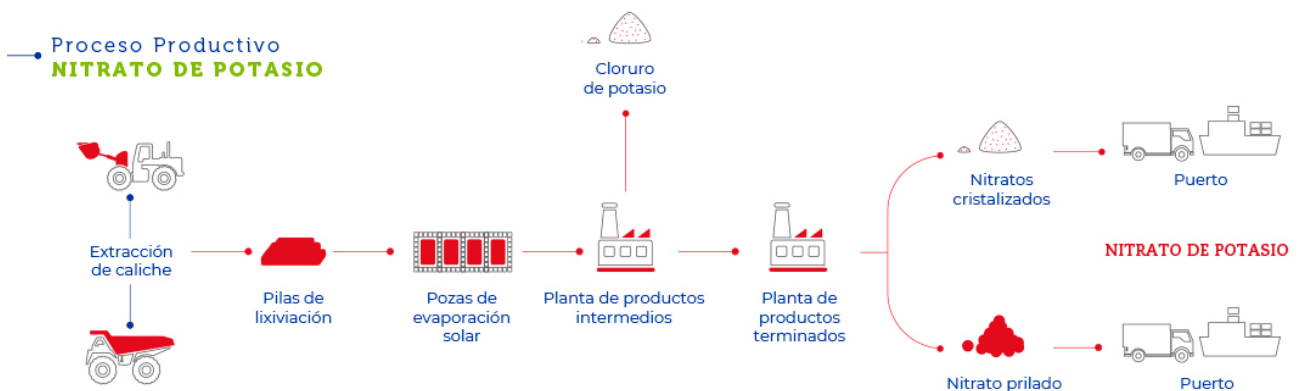


Figura 1 Proceso productivo SQM (SQM S.A., 2023)

La lixiviación se lleva a cabo en el pueblo de Pedro de Valdivia, el cual está ubicado a 25 km de la ciudad de María Elena, región de Antofagasta. Allí es donde se explota el Caliche, luego se Chanca y finalmente se acopia en pilas ROM, para finalmente ser trasladados hacia Coaya Sur para continuar con el proceso.

En la Figura 2 se muestran las corrientes del proceso de lixiviación en Pedro de Valdivia, en donde las pilas ROM se riegan con agua, debido a que las sales de caliche son solubles en este fluido, además de regarse con solución intermedia y AFA (agua febre ácida) la cual es una solución ácida con un pH de 2,1

aproximadamente, con una baja concentración de yodo, proveniente de la solución de descarte que se produce al extraer el yodo mediante extracción por solvente en planta. La solución obtenida en este proceso se le denomina Brine, que corresponde a una solución rica en I, NaNO_3 , K, Mg, H_3BO_3 , SO_4 , entre otros. (CHANDÍA VENEGAS, 2022)

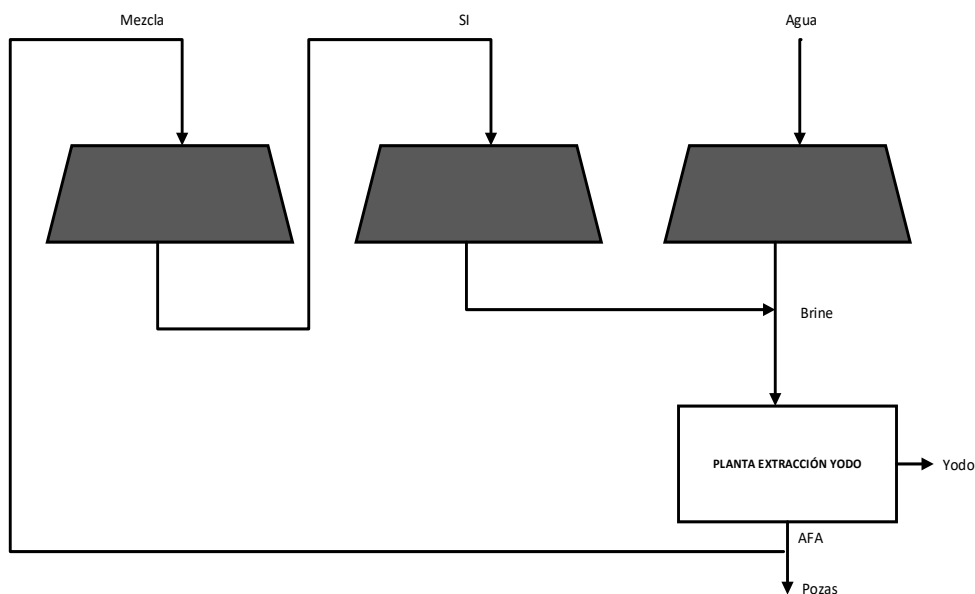


Figura 2 Diagrama proceso de lixiviación del mineral caliche

El proceso de extracción de Yodo, que se aprecia en la Figura 2, es donde el Brine que proviene de las pilas de lixiviación se envía hacia la planta de extracción del Yodo, a través de un proceso de extracción por solventes utilizando Kerosén, obteniendo así el yoduro. De esta etapa se poseen dos corrientes que se presentan a continuación:

- **Solución de producción;** corresponde a una solución rica en yodato, que a través de proceso de fusión y prilado se obtiene el yodo metálico.
- **AFA;** que corresponde a una solución con una baja concentración de yodo, pero rica en nitratos y otras especies.

Finalmente, aproximadamente la mitad del flujo de AFA se devuelve hacia el proceso lixiviación para regar las pilas de caliche y la otra mitad de flujo se envía al depósito de finos para partir con el tren de pozas de evaporación solar, como se aprecia de mejor forma en la Figura 3. (SQM S.A., 2023)

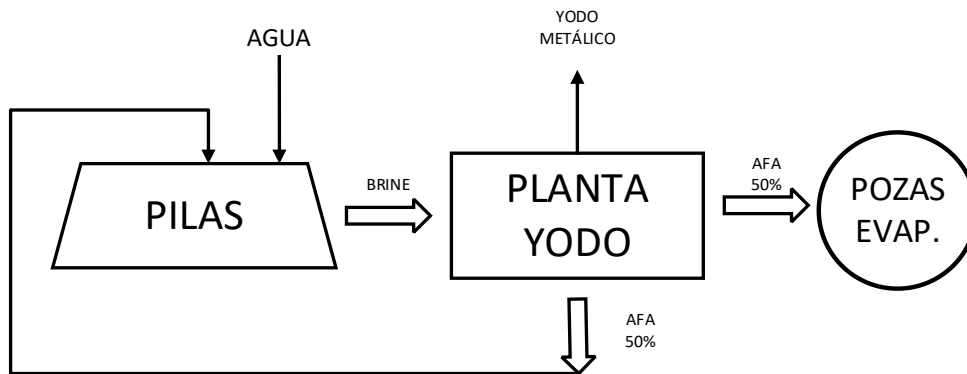


Figura 3 Diagrama proceso corrientes

Luego se inicia el proceso de Evaporación, en donde el objetivo de las PES en Coya Sur es la obtención de sales con un alto contenido de nitratos de sodio y potasio, mediante la concentración de las soluciones utilizando la evaporación del agua de la solución gracias a la acción de la energía solar. Durante el proceso existe una precipitación selectiva de Halita, Astrakanita, NaNO_3 , KNO_3 , entre otros compuestos. Se necesita llevar un control del área de evaporación, es por ello, que las soluciones de ingreso recorren una serie de pozas, entre preconcentración y de producción, las cuales si diferencian por la concentración de nitratos presentes en cada una.

La realización de este proceso consta de 3 etapas principales: neutralización, preconcentración y producción. En la neutralización, se lleva la solución de pH 1,5-1,8 a pH 5,6-6 para luego enviarla a las pozas de preconcentración. En estas pozas, que funcionan en serie, precipitan principalmente halita y Astrakanita, consideradas como sales de descarte. La última poza de preconcentración, conocida como poza de corte, es la que alimenta a producción. Las pozas de producción son alimentadas en paralelo o en serie y en ellas precipitan sales con alto contenido de NaNO_3 . El control de la química que da la calidad de las sales que precipitan en las pozas de producción se realiza en la poza de corte. (SQM, 2023)

El proceso de PES queda representado en los diagramas presentes a continuación;

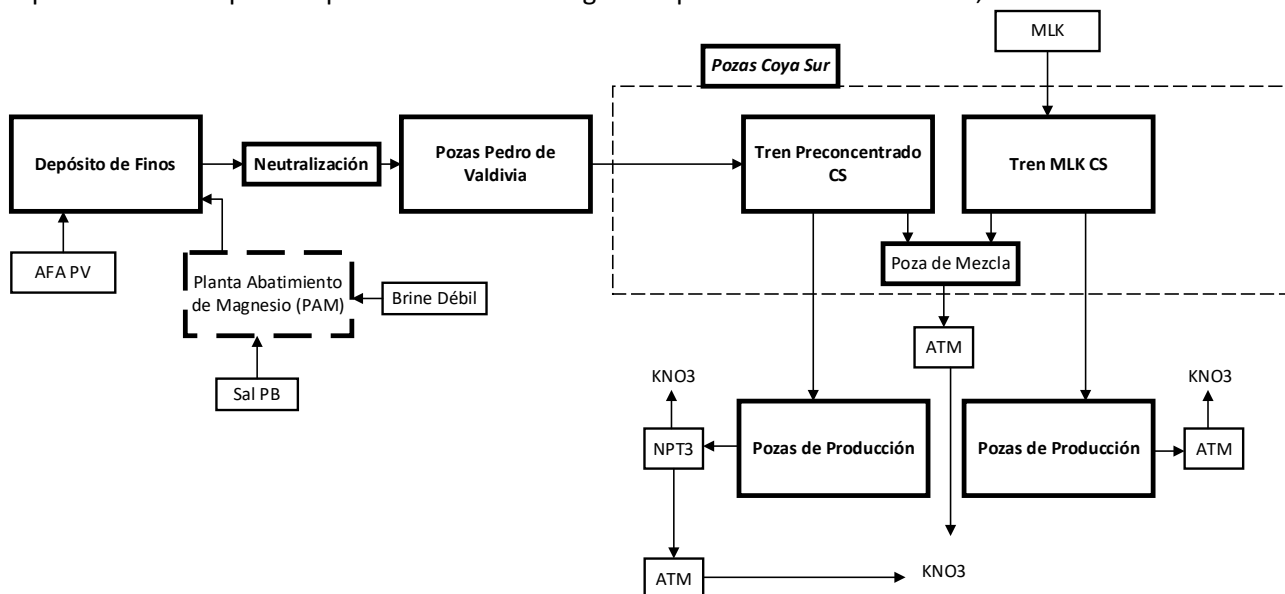


Figura 4 Diagrama de bloque de procesos

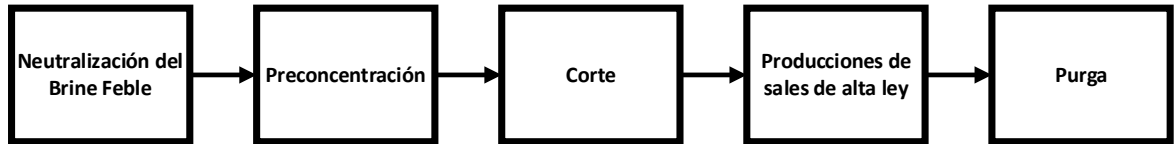


Figura 5 Diagrama bloques PES

Siguiendo el diagrama de la Figura 5, se describen a continuación las diferentes partes del proceso de evaporación de las pozas.

En primer lugar, el proceso de neutralización en donde se aumenta el pH del Brine Feble (1,5 - 2,0 hasta 5,6 – 6,0 medido en forma directa). Se realiza mediante la adición de lechada de cal como agente neutralizante y una solución PAM. La proporción de adición se obtiene mediante el indicador de Factor de consumo, el cual se calcula como los kilogramos de cal consumida por metro cúbico de Brine Feble tratado. Depende de la acidez inicial de la solución y comúnmente los valores fluctúan entre 0,64 y 0,68 [kg/m³]. El producto de interés de esta etapa es conocido como Brine Feble Neutro (AFN).

- **Solución PAM (Planta abatimiento de Mg)**; es una mezcla de sal de Pampa Blanca (sal PB) con alto contenido de sulfato y Brine débil proveniente de la lixiviación.
- **Lechada de Cal**; que corresponde a una mezcla de cal viva y agua.

El proceso de Preconcentración es destinado a la concentración de la solución mediante la evaporación del agua, precipitan cristales de Halita (NaCl) y Astrakanita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), que son consideradas como sales de descarte. Se opera mediante pozas organizadas en serie, donde la solución se va traspasando de una poza a otra mediante bombeo. El flujo que se bombea es en función de la concentración química de las soluciones, la tasa de evaporación, los inventarios de la solución y la sal existente en cada poza, y otros requerimientos operacionales tales como la cosecha, llenado, vaciada, entre otros.

El proceso de Corte se desarrolla en una sola poza, última poza de la etapa de preconcentración. Se destaca dado que alimenta la solución a las pozas de producción. El principal objetivo de esta poza es obtener una solución lo más cercana a la saturación del KNO_3 y NaNO_3 . Se realiza maximizando las leyes de producción sin perder el rendimiento por la eventual cristalización de productos de interés en preconcentración. También se realizan controles químicos debido a la calidad del producto.

La Producción corresponde a las pozas en las cuales se obtiene las sales de interés (alto contenido de KNO_3 y NaNO_3). Con respecto a las impurezas, su precipitación se ve favorecida cuando el magnesio libre (MgL) supera cierta concentración, por lo que se debe controlar su contenido en la solución, enviando la solución hacia la poza de purga y alimentando la poza con solución fresca, esto se conoce como ajuste de la composición química.

Por último, la purga, en donde las impurezas precipitan en mayor proporción que las sales de KNO_3 y NaNO_3 . Esta solución se lleva a la sequedad total y la sal resultante es considerada como perdidas.

Cuando las pozas de producción cumplen una concentración se realiza la cosecha de Sales, corresponde a la remoción de sales decantadas de las pozas para depositarlas en acopios de sales de alta ley o de descarte (preconcentración, descarte y producción, alta ley). A continuación, se muestra la Figura 6 en donde se representa el proceso de cosecha de las pozas en Coya Sur, Enero 2023.



Figura 6 Cosecha sales Coya sur

A Continuación, se presenta un diagrama en el cual se detallan las corrientes que ingresan en cada etapa que se detallaron anteriormente,

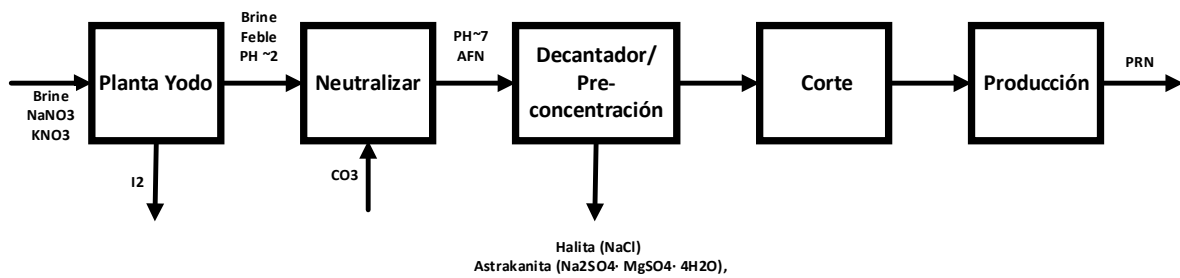


Figura 7 Diagrama PES con corrientes

2.2 Proceso de Pozas Coya Sur

El principal objetivo es concentrar las soluciones de las pozas de nitratos mediante la evaporación solar. Para que se cumpla, se necesita llevar un control del área de evaporación, por lo que las soluciones que ingresan recorren una serie de pozas. En la Figura 8 se muestra la distribución de las pozas presentes en Coya Sur, en donde se poseen dos corrientes de ingreso. Se diferencian por colores, si corresponden al del tren de MLK, al tren de Pedro de Valdivia, si corresponden a pozas de corte o de producción. La última poza, que corresponden a la 5 en donde se juntan las corrientes.

Las pozas de producción no poseen corrientes de ingresos, dado que estén en etapa de cosecha, por ende, el flujo es redireccionado hacia la poza siguientes en el tren.

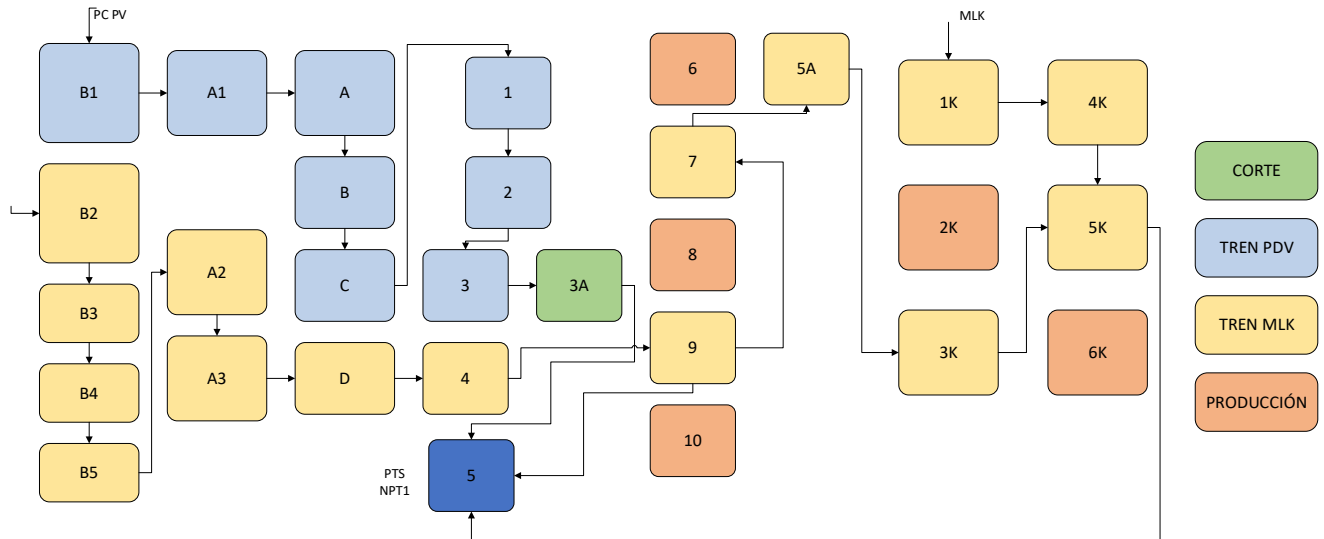


Figura 8 Circuito de pozas Coya Sur

El proceso de pozas de Coya Sur posee dos efluentes de ingreso, por lo que se posee dos trenes de evaporación, Tren de MLK y al tren de Pedro de Valdivia (PCPV), que se detallan a continuación; (CHANDÍA VENEGAS, 2022)

- **Tren MLK:** El objetivo es aumentar la concentración de nitrato y recircular la solución proveniente de planta. Debido a su alta concentración de potasio, cuenta con más área de evaporación para evitar la precipitación de potasio. También se tiene que la concentración de magnesio libre es alta, debido a que se evita la precipitación de especies de magnesio.
- **Tren PCPV:** Representado en la Figura 8 como las pozas en color celeste, requiere menos área de control (baja concentración de nitrato y potasio) por lo que se debe concentrar hasta llegar un punto de saturación de 330 [g/L] de NaNO_3 aproximadamente, para avanzar hacia la poza de corte, en el caso de no llegar a ese punto, la solución de las pozas se mantiene en estanco, bajando flujo de las pozas de corte hacia la poza 5 de mezcla (representada en color azul). En este tren, la concentración de magnesio libre es baja, debido a que precipita sulfato de magnesio.

Finalmente, se posee las pozas de producción, que en la Figura 8 están representadas de color naranja, que promueven la precipitación de sales de nitrato con el fin de formar sales productivas que ingresan a planta. En estas pozas la concentración de magnesio libre es alta, debido a que lo ideal es que el magnesio se mantenga en solución.

2.3 Estación meteorológica Coya Sur

En la localidad de Coya Sur se cuenta con una estación meteorológica. La cual está conformada por una serie de sensores conectados a un microcomputador que recibe las señales que estos emiten, convirtiéndolas a digital y almacenando los resultados. (SQM, 2023)

La recopilación de la información meteorológica se realiza semanalmente en forma remota gracias al sistema de telemetría instalado en la estación mediante el cual se envían los datos a un computador personal exclusivo para la estación meteorológica.

Los parámetros que se registran corresponden a los siguientes, (SQM, 2023)

- **Temperatura:** Se promedia los doce valores monitoreados cada cinco minutos para dar el término medio horario. Se utilizan sensores de temperatura.
- **Humedad Relativa:** Se usa el procedimiento anterior. Para su medición nuevamente son utilizados sensores, en este caso de humedad
- **Velocidad del viento:** Se promedia los doce valores monitoreados cada cinco minutos para dar el término medio horario. Las velocidades utilizadas son instantáneas. El viento renueva el aire próximo a la superficie de evaporación que está saturado, también produce un efecto secundario que es el enfriamiento de la superficie del líquido y la consiguiente disminución de la evaporación. El método de medición es mediante un sensor de velocidad y de dirección del viento, que cuenta con un magneto unido a la hélice y según el movimiento de ella es que se produce una diferencia de potencial que se induce, siendo esta igual al movimiento de la hélice.
- **Dirección del viento:** En este caso se calcula la frecuencia ocurrida para ocho rangos de dirección. Este parámetro es medido mediante un potenciómetro, el cual indica la dirección por medio del movimiento horizontal de la cola del sensor.
- **Radiación solar:** Se calcula el acumulado diario a través de una integración gráfica de los valores medidos en [KWH/m²] versus el incremento de tiempo en horas, para un día completo. Este parámetro corresponde a la principal fuente de energía para el proceso.
- **Evaporación de agua:** Se calcula mediante el consumo de agua de una probeta de área conocida.

En la Figura 9 se muestra la estación meteorológica utilizada en Coya Sur, en Enero de 2023,



Figura 9 Estación meteorológica Coya Sur

2.4 Tasa de Evaporación Coya Sur

Se han realizado estudios dentro de la compañía que permiten sostener que la tasa de evaporación de una salmuera es proporcional a la tasa de evaporación del agua pura corregida por un factor que considera la

composición química de la solución. El factor de corrección química depende de las características particulares de la solución en cuestión. También posee un factor de corrección de 1,2 el cual fue introducido específicamente para las pozas de Coya Sur, dado que en Sur Viejo no aplica. Estudios realizados en la PES indican que la expresión particular para Coya Sur está dada por: (SQM, 2023)

$$TE_{sol} = TE_{AP} \cdot 1.35 [Mg]^{-0.32} \cdot 1,2$$

Donde:

TE_{sol} : tasa de evaporación de salmuera

TE_{ap} : tasa de evaporación de agua pura

[Mg]: concentración de magnesio total de la salmuera

Para llegar a la correlación anterior se realizó estudios de 12 meses utilizando salmueras de preconcentración, poza de corte y producción para abarcar toda la gama de salmueras del proceso de evaporación.

CAPÍTULO 3: POZAS Y ESCENARIO SOLARES

3.1 Descripción de pozas solares

Las pozas solares corresponden a lagunas de agua con sales disueltas, es posible la colección de energía solar y la concentración de las sales disueltas en la zona más profunda de esta. En la naturaleza, se puede considerar cualquier estanque o lago que pueden convertir la energía solar en térmica. (Akbarzadeh & Andrews, 2023)

La concentración de sal se es máxima en el fondo y va decreciendo hacia arriba hasta llegar prácticamente a cero en la superficie.

Una poza solar de gradiente salino es un sistema que funciona como colector y almacenador de energía solar. Éstas consisten en pozas con una capa de solución salina la cual absorbe la radiación solar y la almacena como calor por un determinado período de tiempo.

3.2 Pozas Solares de gradiente salino

3.2.1 Configuración de las Pozas Solares

Se dividen en tres capas, según su salinidad (Figura 10). El gradiente de salinidad estabilizante evita que exista una convección térmica entre capas y también permite que el estanque actúe como un colector de radiación solar. La concentración de sales disueltas puede variar entre un 20% a un 30% en el fondo, a ser cercana a cero en la capa superior. (NARVÁEZ DÍAZ, 2019)

Se forman distintos gradientes de concentración, donde aumenta la concentración salina a mayor profundidad debido a la mayor densidad de las soluciones de alta concentración. Las zonas corresponden; convectiva superior (upper convective zone, UCZ), no convectiva (non-convective zone, NCZ) y convectiva inferior (lower convective zone, LCZ) (RUBIO ESPINOZA, 2012)

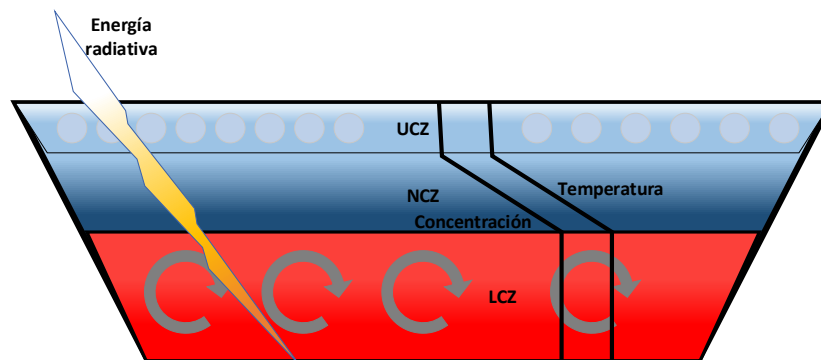


Figura 10 Partes de una poza solar

La zona superior (UCZ) es una capa relativamente delgada de solución que posee un bajo contenido salino, cercano de 2% en peso. Posee una profundidad de 0,3 – 0,5 [m]. Existe una convección natural causada por el viento que suministra energía para evaporar agua, dado que es capaz de mezclar la capa superior, causando una temperatura y una concentración salina uniforme, y así una

temperatura próxima a la temperatura del bulbo húmedo de acuerdo con la salinidad del agua.

La radiación es absorbida rápidamente en la zona UCZ. Sin embargo, este calor absorbido es perdido a la atmósfera por convección y radiación. La radiación restante es absorbida en las zonas siguientes, zona no convectiva y zona inferior.

La zona intermedia (NCZ) tiene una profundidad de entre 0,8 - 1,2 [m]. Al aumentar la profundidad se mantienen lineales crecientes el gradiente de concentración salino y temperaturas. La profundidad de esta capa es más de la mitad de la profundidad total del estanque solar y depende de los siguientes factores; temperatura, propiedades de transmisión solar y conductividad térmica del agua. Esta capa funciona como un aislante reduciendo las pérdidas de calor en dirección hacia arriba desde la zona de almacenamiento térmico, dado que no se produce convección natural, por lo que la energía térmica solo es transferida mediante conducción y radiación hacia la capa inferior.

En la zona inferior (LCZ), la energía solar absorbida es convertida en energía térmica y almacenada como calor sensible en la salmuera de alta concentración, llegando a salinidades entre 20% - 30% en peso y a temperaturas entre los 80 [°C] y 90[°C]. Posee una concentración salina y la temperatura uniformes debido a la convección natural. Ya que no hay pérdidas de calor desde el fondo, la temperatura de esta capa aumenta substancialmente.

Una de las particularidades del almacenamiento de calor en las pozas solares es que logran mantener estas altas temperaturas en la zona inferior incluso durante la noche.

3.2.2 Factores operacionales de las pozas solares

Algunos factores relevantes que afectan la estabilidad del sistema se detallan a continuación: (Mangussi, 1985)

- **La estabilidad del gradiente:** La poza está constituida por una solución al que se le impone un doble gradiente: salino y térmico, estos se oponen debido a la variación de densidad. Si los gradientes no se eligen adecuadamente se producen inestabilidades que crean zonas convectivas intermedias y tienden a destruir la zona de gradiente.
- **La zona convectiva superior:** La superficie de la poza se ve sometida a fenómenos que producen su inestabilidad, se encuentran: aumento de densidad por evaporación del agua, inversiones de temperatura por cambios día-noche y el efecto del viento que provoca una mezcla en la capa. En donde se crea una capa convectiva que disminuye la eficiencia de trabajo de la poza y destruye el gradiente.
- **La difusión de la sal:** El gradiente salino produce una difusión de sal que tiende a disminuir el propio gradiente produciendo inestabilidades en la poza. Para coeficientes de difusión, la constante de tiempo es de varios meses, por lo tanto, los métodos de corrección deben ser de acción prolongada. Unas de las soluciones que se emplean, se basan en el agregado de sal o en la extracción de agua del fondo, pero esto implica gastos de sal o energía.

3.3 Escenario solar en Chile

Gracias a las condiciones geográficas que se poseen en Chile, se cuenta con un gran potencial para el desarrollo utilizando energía renovable, como es en este caso la energía solar.

Existen mecanismos de obtención de parámetros solares. En el caso de la plataforma Explorador Solar (Explorador solar, 2023), que es posible la obtención de parámetros, como es la radiación incidente, temperatura ambiente, velocidad del viento y nubosidad. También está la plataforma Weatherspark (Cedar Lake Ventures, Inc., 2023), en donde existe registro de climas y tiempo durante todo el año en diferentes puntos del país, existiendo los promedios mensuales mínimos y máximos. También cuenta con la nubosidad, precipitación, la humedad y la velocidad del viento.

CAPÍTULO 4: TASAS DE EVAPORACIÓN

4.1 Descripción de tasas de evaporación

La evaporación es un proceso físico que consiste en el pasaje lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, en función de un aumento natural o artificial de la temperatura, lo que produce influencia en el movimiento de las moléculas, agitándolas.

Con la intensificación del desplazamiento, las partículas escapan hacia la atmosfera transformándose en vapor. El movimiento térmico de una molécula de líquido debe ser suficiente para vencer la tensión superficial y evaporar, dado que, su energía cinética debe exceder el trabajo de cohesión aplicado por la tensión superficial a la superficie del líquido (NARVÁEZ DÍAZ, 2019). Por lo que, la evaporación acontece más rápidamente a altas temperaturas, altos caudales entre las fases líquidas y vapor y en líquidos con bajas tensiones superficiales (con presión de vapor más elevadas).

La tasa de evaporación corresponde a un factor de razón en el cual se mide cuanto se evapora de líquido en un cierto tiempo.

4.2 Factores que influyen en la Tasa de Evaporación

Los factores que influyen en la evaporación corresponden a los siguientes:
(Valenzuela Vergara, 2019)

- **Temperatura;** se tiene que, a una mayor temperatura del aire, mayor es la demanda atmosférica, por lo que es mayor la energía molecular y exista una mayor evaporación.
- **Radiación solar;** la radiación incidente aumenta la temperatura y la energía molecular, por lo que aumenta la evaporación.
- **Presión atmosférica;** al existir una menor presión atmosférica, se tiene una mayor evaporación
- **Humedad relativa del aire;** a una menor humedad del aire, mayor es la evaporación.
- **Hidrolapso;** es el gradiente de humedad del aire entre dos alturas, a mayor gradiente mayor evaporación.
- **Velocidad y dirección del viento;** el viento hace que el aire saturado de vapor cambie por un aire más seco, por lo que, al existir una mayor velocidad del viento, es posible el aumento de la evaporación
- **Superficie evaporante;** corresponde al tipo de superficie que se evapora.
- **Estabilidad vertical;** los movimientos ascendentes y descendentes del aire producen mezcla turbulenta aportando aire seco a la superficie evaporante
- **Rugosidad superficial;** a tener una mayor rugosidad, mayor es superficie evaporante por

unidad de área, por lo tanto, mayor es la evaporación.

- **Composición química;** la solución al poseer una menor mineralización es mayor la evaporación, dado que esta menos ocluida el agua y es más fácil evaporar.
- **Salinidad;** las sales aumentan la tensión entre las moléculas de agua, por lo que a mayor salinidad menor es la evaporación.

El recambio del viento puede influir positiva o negativamente, depende de la saturación que posea este aire nuevo con respecto al aire reemplazado. Si el viento aporta un aire menos saturado que el existente, la tasa de evaporación aumentará ya que aumentará el déficit higrométrico. Por el contrario, si el viento porta un aire con mayor saturación que el existente, la tasa de evaporación disminuirá. La combinación de humedad atmosférica baja y viento resulta ser la que produce mayor evaporación. (Ben Mansour, Tam Nguyen, & Galanis, 2005)

El aumento de la temperatura, en el aire facilita la evaporación, debido a que crea una convección térmica ascendente, que facilita la aireación de la superficie del líquido; y por otra parte la presión de vapor de saturación es más alta.

Con respecto a la superficie evaporante, la máxima evaporación ocurriría en una superficie de agua libre poco profunda. Otros factores influyentes surgen al considerar la naturaleza y forma de la superficie evaporante: una superficie de agua libre presenta el mínimo de dificultades a la evaporación. Esta dependerá de su extensión y profundidad. Si ambas son pequeñas, los cambios atmosféricos y el terreno, tendrán una gran influencia. En superficies extensas y profundas hay menor influencia del terreno adyacente.

Cabe destacar que, al aumentar la altitud, decrece la evaporación. Esta aparente contradicción se explica por la mayor influencia de otros factores (temperatura del aire y del agua) en el ritmo de evaporación que la producida por el decrecimiento con la altitud de la presión atmosférica.

Insolación es el calor absorbido por el agua al evaporarse que es proporcionado por la radiación solar, resulta lógico pensar que la tasa de vaporación aumenta con dicha radiación solar. No obstante, no todo el calor que recibe la superficie del agua se utiliza en evaporarla. De hecho, las masas de agua profundas se comportan como acumuladores de calor en épocas calurosas y portadoras de calor en épocas frías debido a la diferencia existente entre la densidad del agua a distintas temperaturas. De este modo, la tasa de evaporación en verano es inferior a la que correspondería por radiación solar recibida. Por el contrario, la tasa de evaporación en invierno es superior a la calculada. (EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN. EVAPOTRANSPIRACIÓN , 2013)

4.3 Análisis parámetros meteorológico 2022 Coya Sur

4.3.1 Análisis valores mensuales

Se presentan a continuación gráficas que presentan el comportamiento de parámetros obtenidos desde la estación meteorológica de Coya sur durante el año 2022. Se muestra el promedio mensual, junto con el mínimo y el máximo.

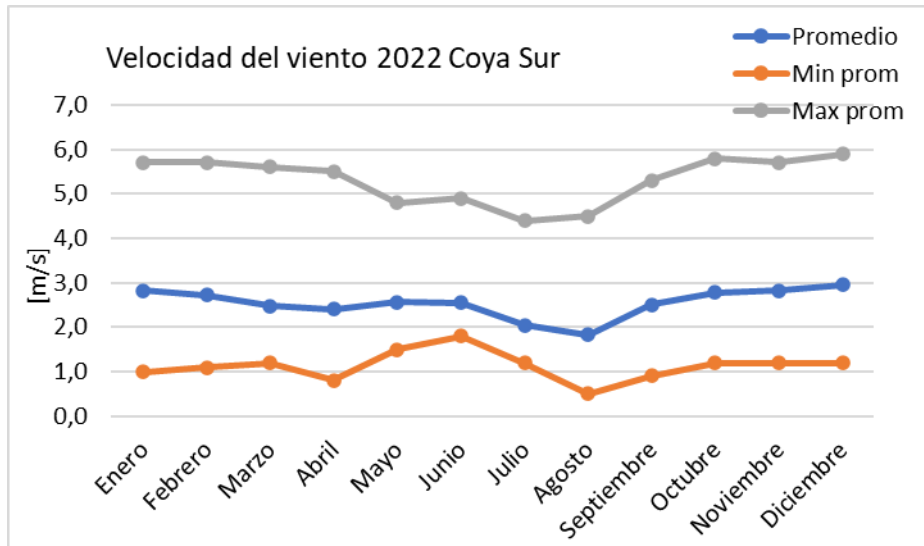


Gráfico 1 Velocidad del viento Coya Sur 2022

En el Gráfico 1 se muestra la velocidad del viento promedio que se registró en Coya sur, además de los promedios mínimos y máximos mensuales. Se es posible observar que existe una mayor velocidad del viento en los meses de Diciembre y Enero, y una menor velocidad en el mes de Agosto. Cabe mencionar que el viento al ser un factor que influye en la tasa de evaporación en los meses de verano es favorable tener una mayor velocidad dado que ayuda a tener una tasa de evaporación más alta.

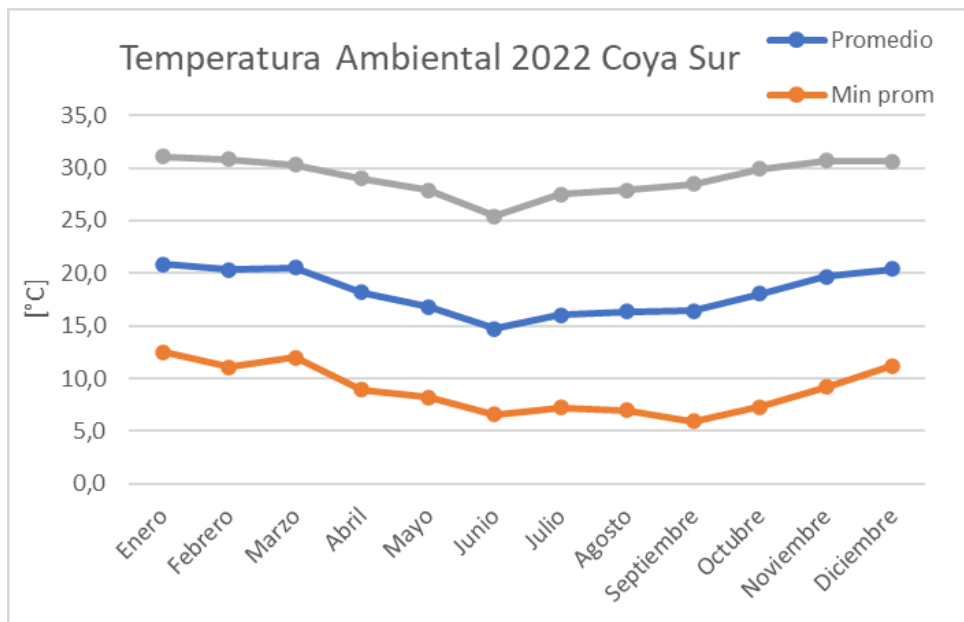


Gráfico 2 Temperatura ambiental Coya Sur 2022

La Gráfico 2 muestra la temperatura ambiental registrada en la estación meteorológica en Coya Sur en el 2022, los máximos promedios se registran en los meses de veranos de Diciembre, Enero y Febrero. La temperatura mínima promedio se registra en el mes de Junio.

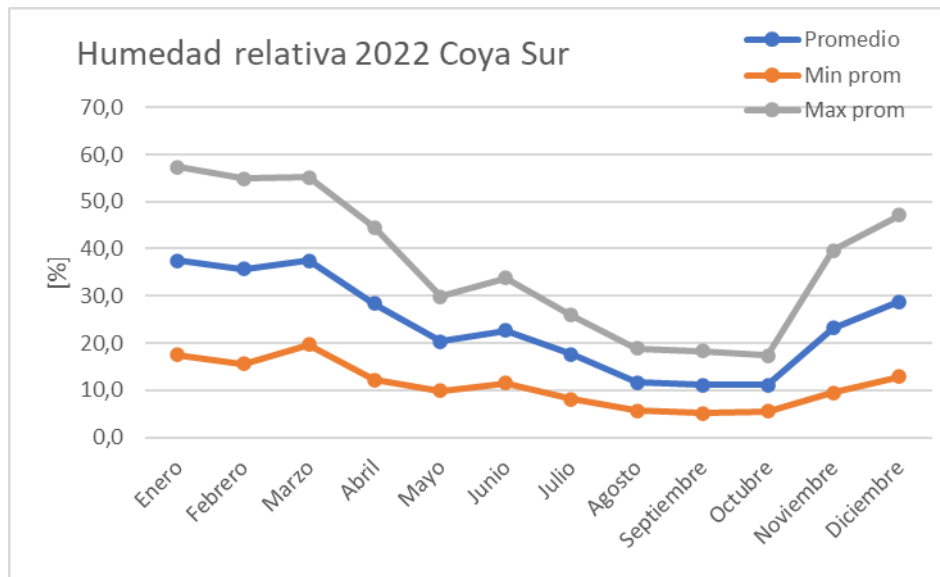


Gráfico 3 Humedad relativa Coya sur 2022

El Gráfico 3 muestra la humedad relativa que se registró en Coya Sur durante el año 2022. Donde el promedio máximo (línea azul) de Humedad se registra en el mes de Enero, cercano a las 40 [%], en el mismo mes se registra como humedad máxima promedio cercano al 60 [%] (línea gris). Con respecto a las menores humedades registradas se presentan entre los meses de Agosto y Octubre. En este mismo rango de meses la diferencia entre el promedio de humedad y los promedios máximos y mínimos son cercanas y constantes, entre un 10 [%] a 20[%].

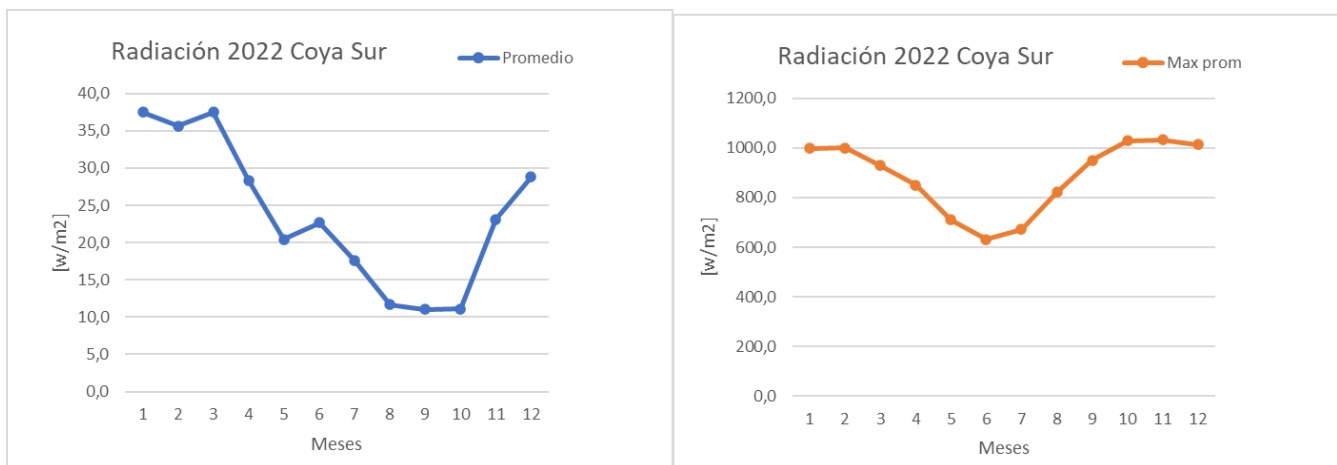


Gráfico 4 Radiación Solar Coya sur 2022

En el Gráfico 4 se muestra un gráfico del registro de la radiación presente en Coya Sur durante el año 2022. Allí solo se registra el promedio y el máximo promedio de las radiaciones presentes, donde el primero se lee los registros en la parte izquierda del gráfico, mientras que el máximo promedio se lee desde la parte derecha del gráfico. Al observar la tendencia del máximo promedio (línea naranja), se es posible apreciar un patrón de tendencia sinusoidal, en el cual en los meses de Junio y Julio es donde existe menos radiación solar, registrándose como mínimo app 600 [W/m²], mientras que en los meses de Noviembre, Diciembre y Enero es donde se es posible apreciar el pick de la onda, en donde se registran máximas promedio de 1000 [W/m²]. Con respecto a la línea promedio (azul), los valores registrados son bajos, dado que considera el promedio diario, y en la noche no se registra radiación, haciendo que el valor disminuya drásticamente.



Gráfico 5 de Evaporación Coya Sur 2022

En el Gráfico 5 se muestra la gráfica de Evaporación registrada en la estación meteorológica en Coya Sur en el 2022. Esta evaporación corresponde al de una probeta que se encuentra rellena de agua. En el gráfico se observa que en el mes de Junio existió una menor evaporación registrándose un promedio de 6 [L/m²d], mientras que en el mes de Diciembre es donde se registra la máxima promedio de aproximadamente mayor a 12 [L/m²d].

4.3.2 Análisis interacciones de variables meteorológicas

Se desarrolla una relación entre parámetros meteorológicos en función del tiempo, con un registro de datos del año 2022. Se posee tres casos a analizar Humedad vs Radiación, Humedad vs Velocidad del viento y Temperatura vs radiación, el cual se divide en rangos de horas. En una primera instancia de 01 a 11 hrs, 12 a 18 hrs y de 18 a 24 hrs. En cada caso se analiza en que horario es favorable la evaporación.

Este análisis se realiza utilizando la plataforma Matlab, con el cual es posible relacionar una gran cantidad de datos en diferentes rangos y así obtener resultados gráficos para el análisis.

4.3.2.1 Humedad vs Radiación

Los 63, 64 y 65 (Anexo 2) muestran la relación que posee la humedad y la radiación solar en tres diferentes rangos horarios. De aquí se puede obtener de que existe una mayor radiación entre las 12 a 18 hrs (marcado en un círculo rojo) con una humedad relativa concentrada en 10%, lo que genera mejores condiciones ambientales para la evaporación y con una radiación máxima sobre los 1000 [W/m²], mientras que, si se observa el Gráfico 63, se posee una mayor distribución y concentración entre los 10 [%] y 30 [%] de humedad relativa con una radiación que no alcanza a los 1000 [W/m²] y si se observa el gráfico 64, las radiaciones obtenidas son menores a 200 [W/m²].

Es por lo que se toma el rango de 12 a 18 hrs, para acotar más la diferencia horaria, y realizar un análisis más minucioso, que se presenta a continuación,

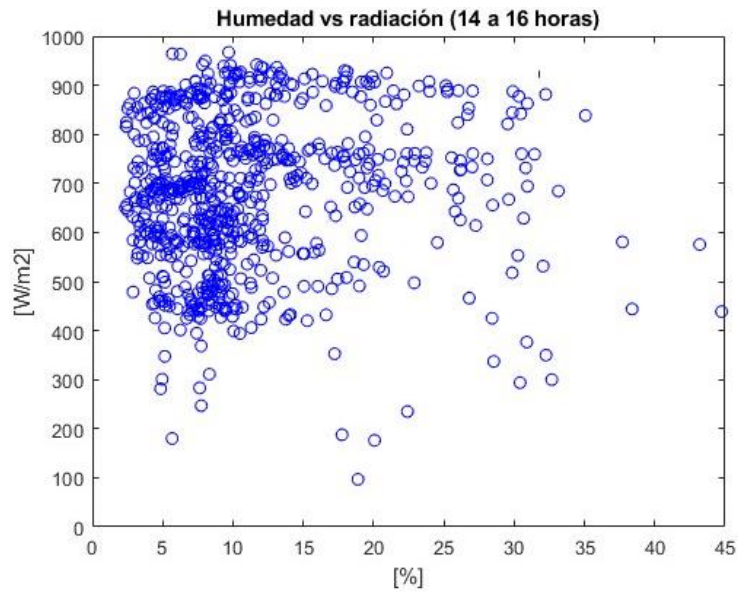


Gráfico 6 Hum vs Rad 14 a 16 hrs

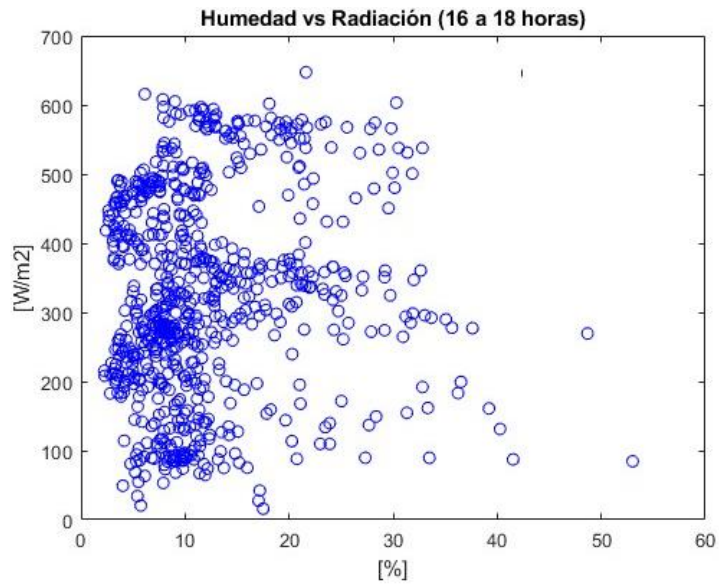


Gráfico 7 Hum vs Rad 16 a 18 hrs

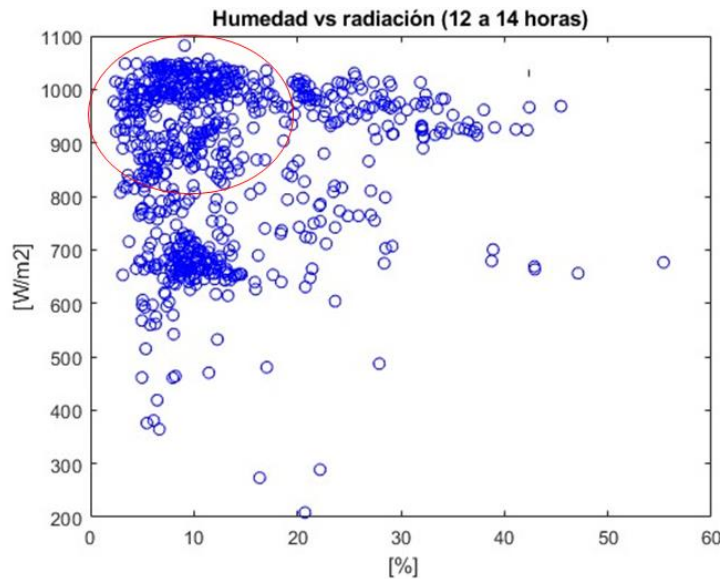


Gráfico 8 Hum vs Rad 12 a 14 hrs

Los Gráficos 6, 7 y 8, se muestran los resultados de la acotación de los rangos horarios. Se observa que existe una mayor radiación concentrada entre las 12 a 14 horas de aproximadamente mayor a 1000 $[W/m^2]$, con una humedad relativa promedio menor de 10 [%], que se encuentra marcado en un círculo en la Figura 21. Las condiciones antes mencionadas hacen que en este rango horario sea más favorable la evaporación solar.

4.3.2.2 Humedad vs Velocidad del viento

Al observar los gráficos 66, 67 y 68 en Anexos, se es posible apreciar de que existe una mayor velocidad del viento entre las 12 a 18 hrs, alcanzando aproximadamente los 7 $[m/s]$, con una humedad relativa concentrada en 10%, lo que genera mejores condiciones ambientales para la evaporación. En el gráfico del gráfico 66 la humedad varía de aproximadamente los 10 [%] a los 80 [%], con velocidades máximas de 3 $[m/s]$, mientras que en el gráfico 67 la humedad promedio de los datos son más bajas, de 15 [%] app, pero las velocidades del viento no son más de 6 $[m/s]$. Es por lo que se utiliza el rango de 12 a 18 hrs para acotar la diferencia de horario y analizar estos parámetros. A continuación, se presentan los resultados obtenidos,

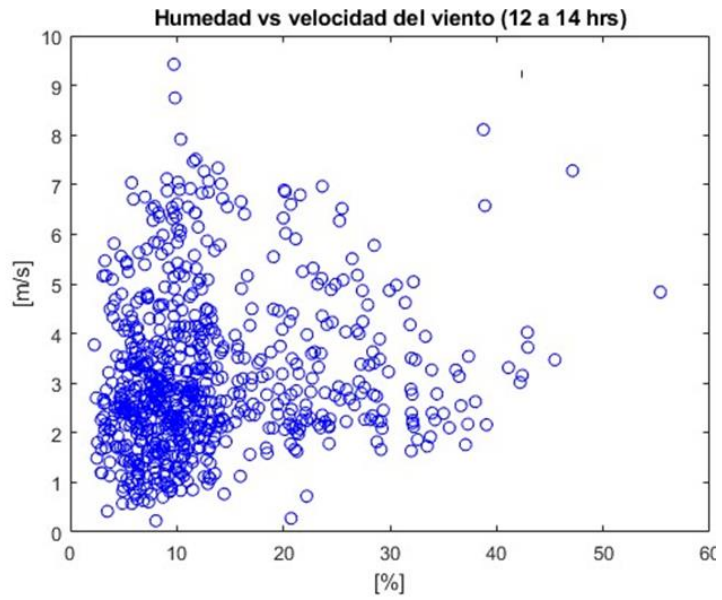


Gráfico 9 Hum vs Vel 12 a 14 hrs

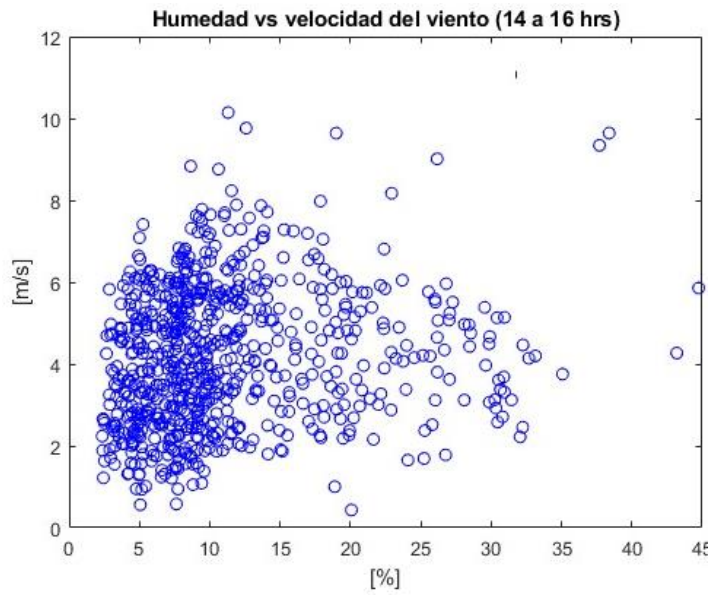


Gráfico 10 Hum vs Vel 14 a 16 hrs

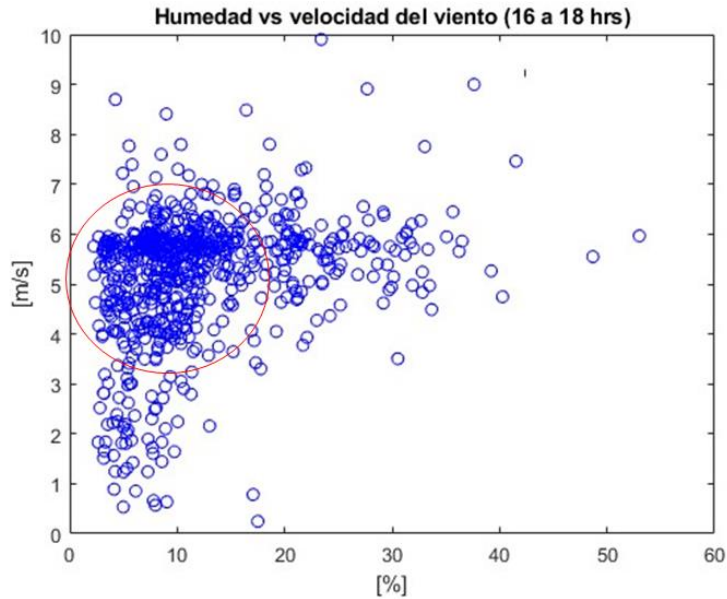


Gráfico 11 Hum vs Vel 16 a 18 hrs

Los Gráficos 9, 10 y 11 , muestran los gráficos de humedad vs velocidad de viento en rangos horarios de 2 horas cada uno. Para obtener el rango donde es más favorable la evaporación, se es necesario tener condiciones donde exista una baja humedad relativa y una alta velocidad del viento, lo cual, al comparar las tres figuras anteriores, en el grafico 11 es donde esto ocurre, entre el horario de 16 a 18 hrs, con una velocidad del viento aproximadamente de 6 [m/s] y una humedad que va de 5 [%] a 15 [%] app.

4.3.2.3 Temperatura vs Radiación

Los gráficos 69, 70 y 71, se muestran los gráficos donde se relaciona la Temperatura y la Radiación. Para comparar estos tres es gráficos se es necesario saber que una de las mejores condiciones que favorece la evaporación solar es donde existe una mayor temperatura y radiación, esto se puede apreciar en el gráfico 70 en un horario entre 12 a 18 hrs. Por lo que se toma el rango horario mencionado anteriormente para acotarlo y ver el comportamiento de estos parámetros.

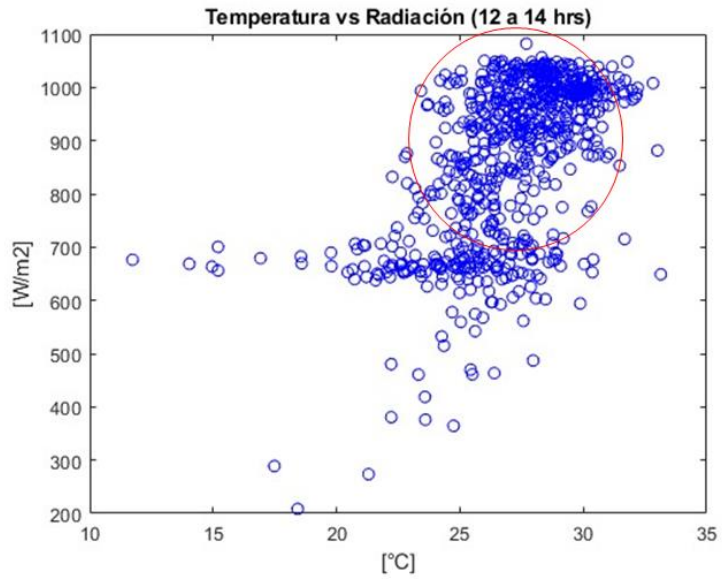


Gráfico 12 Tem vs rad 12 a 14 hrs

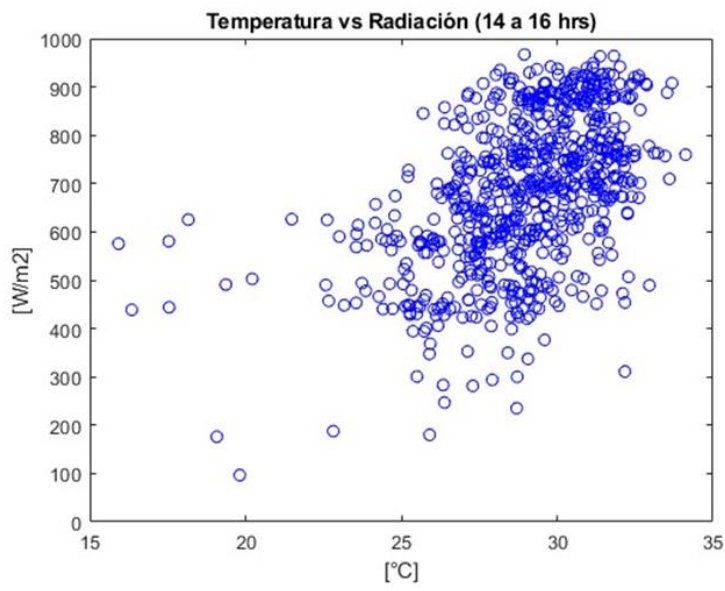


Gráfico 13 Tem vs rad 14 a 16 hrs

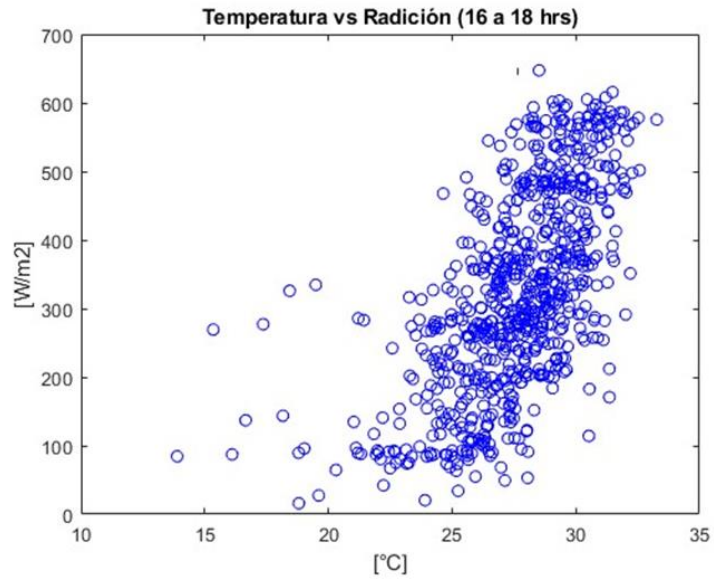


Gráfico 14 Tem vs rad 16 a 18 hrs

Con los gráficos 12, 13 y 14, existe una mayor concentración de temperatura y radiación entre las 12 y 14 horas, dado que allí la radiación supera los 1000 [W/m²] y la temperatura se concentra entre 25 a 30 [°C] app, por ende, es donde la evaporación solar se ve más favorecida.

CAPÍTULO 5: EXPERIMENTO A ESCALA Y RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO

5.1 Experimento Pozas en Coya Sur

El objetivo es determinar experimentalmente la tasa de evaporación de 12 isocontenedores (6 originales y 6 duplicados) del proceso junto con su composición química, para realización de modelo fenomenológico de tasa de evaporación.

Para ello los isocontenedores poseen soluciones de proceso provenientes del tren de MLK y de Pedro de Valdivia, y uno agua de proceso. Los primeros 6 bins son soluciones del Tren de Pedro de Valdivia, específicamente de las pozas B1, 1 y 3A, los cuales cada solución reparte en dos bins. Luego los otros 6 bins poseen soluciones del tren de MLK de las pozas B2, A2 y 9, nuevamente cada solución es repartida en dos bins. La separación en dos bins, se realiza debido a que se quiere manejar la altura de este por el efecto del aire, por lo que se del duplicado cada semana se extrae solución para el relleno del bin original, esto se realiza en todos los casos.

Las soluciones de los bins de análisis, pertenecen al proceso de Preconcentración, dado que las concentraciones aun no son las requeridas ($< \sim 350$, de NO_3) para pasar a la etapa de producción.

El registro de la disminución de altura del bins se realiza diariamente, pero la toma de muestras para realizar un análisis químico se hace semanalmente y luego de esto se rellena el bins original con la solución del bin duplicado.

En la figura 11 se presenta los bins que fueron utilizado en la experimentación del cálculo de la tasa de evaporación de las pozas del proceso.



Figura 11 Disposición bins de experimentación

Estos bins poseen las siguientes dimensiones, las cuales fueron consideradas para el análisis de los datos,

- Largo: 97 [cm]
- Ancho: 112 [cm]
- Alto 95 [cm]

Con esto se genera un volumen de cada bin de $1,03 \text{ [m}^3\text{]}$

5.2 Químicas

5.2.1 Química del agua

Al tener una solución mineralizada el comportamiento del agua es diferente al que este pura, es por lo que se detallan las propiedades coligativas de estas, las que dependen de la cantidad de partículas totales de soluto y no de su composición química. Estas corresponden a las siguientes. (Rice University, 2023)

- **Descenso de la presión de vapor:** existe presencia de un soluto en la solución, por lo que disminuye la presión de vapor característica (en comparación a un líquido puro), y por ende la solución se evapora más lento.
- **Descenso del punto crioscópico:** existe presencia de un soluto y hace que disminuya el punto crioscópico o de congelamiento de una solución en relación al del solvente puro.
- **Aumento en el punto de ebullición:** la presencia de partículas de soluto ocasiona una disminución de la presión de vapor de un solvente líquido, por ende, se requiere una mayor temperatura para alcanzar el punto de ebullición, en comparación de un solvente puro.
- **Aumento de la presión osmótica:** La osmosis es un proceso por el cual las moléculas del solvente pueden pasar a través de ciertas membranas selectivas, aunque las partículas de soluto se vean impedidas de hacerlo. La presión osmótica corresponde a la presión externa que puede ser ejercida sobre una solución para contrarrestar el flujo del solvente, la presión requerida para detener la osmosis de un solvente es igual a la presión osmótica de la solución. Hay que tener presente que no dependen de las cargas de las partículas.

5.2.2 Química de la salmuera

La solución de cada bin es analizada químicamente para ver las concentraciones de iones y elementos presentes en esta, y como estos varían en las semanas de análisis. Los iones analizados químicamente corresponden a;

- Sodio (Na)
- Potasio (K)
- Magnesio (Mg)
- Calcio (Ca)
- Litio (Li)
- Carbonato (CO_3^{2-})
- Perclorato (ClO_4^-)
- Ácido bórico (H_3BO_3)
- Sulfato (SO_4^{2-})
- Cloro (Cl)
- Nitrato (NO_3^-)

Se analiza el comportamiento de los elementos químicos en cada bin en el tiempo, así es posible obtener las siguientes graficas;

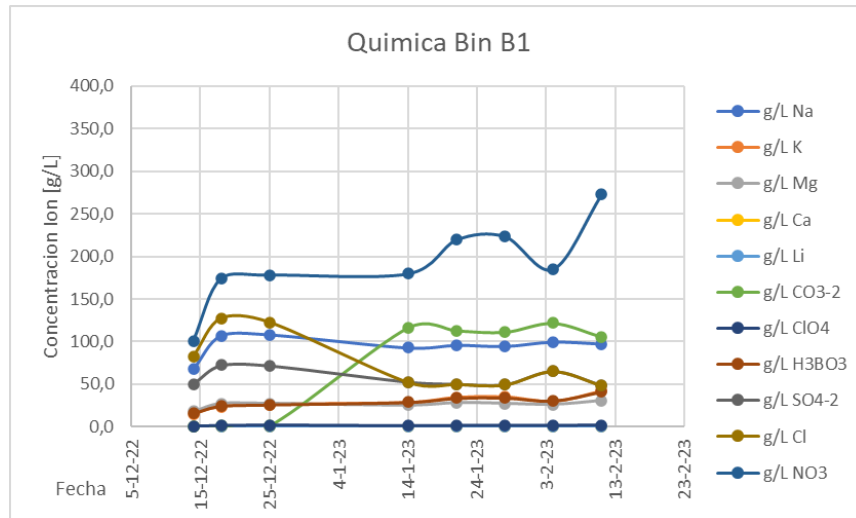


Gráfico 15 Química del Bin B1

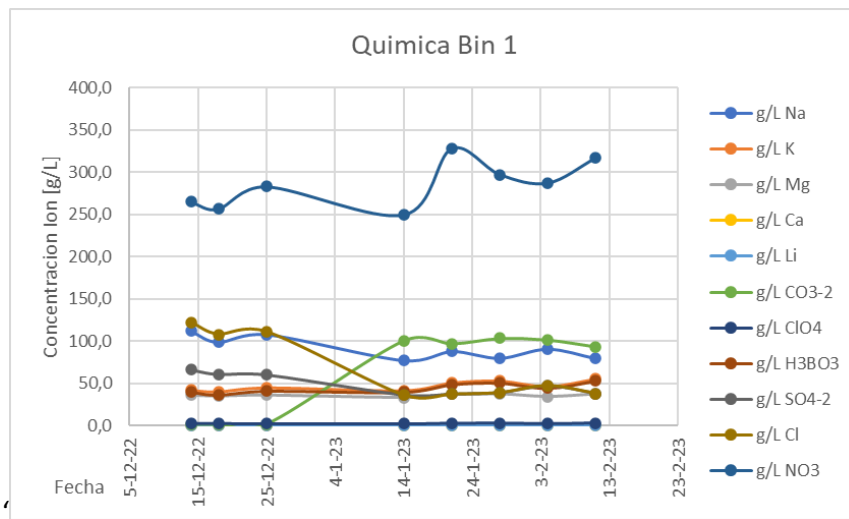


Gráfico 16 Química del Bin 1

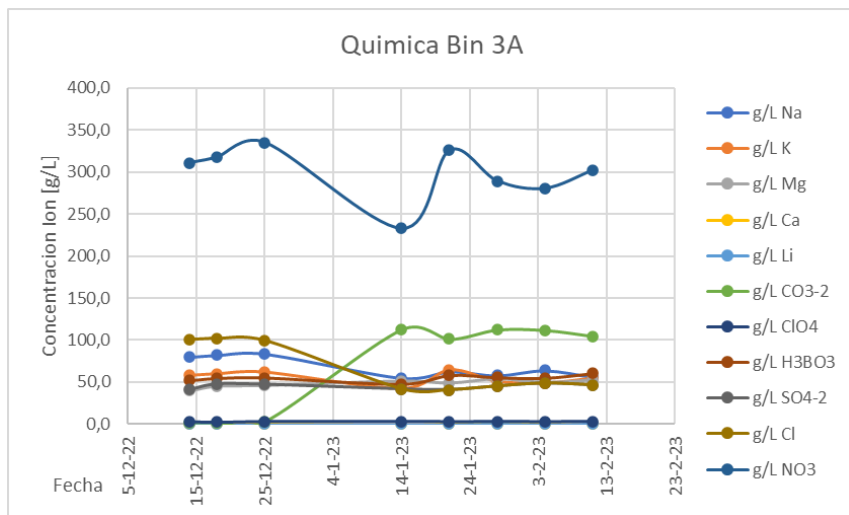


Gráfico 17 Química del Bin 3A

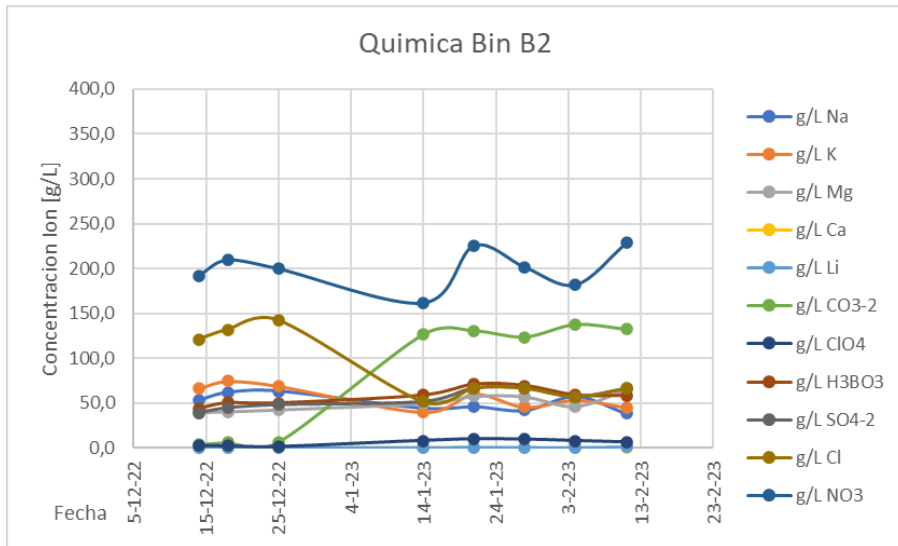


Gráfico 18 Química del Bin B2

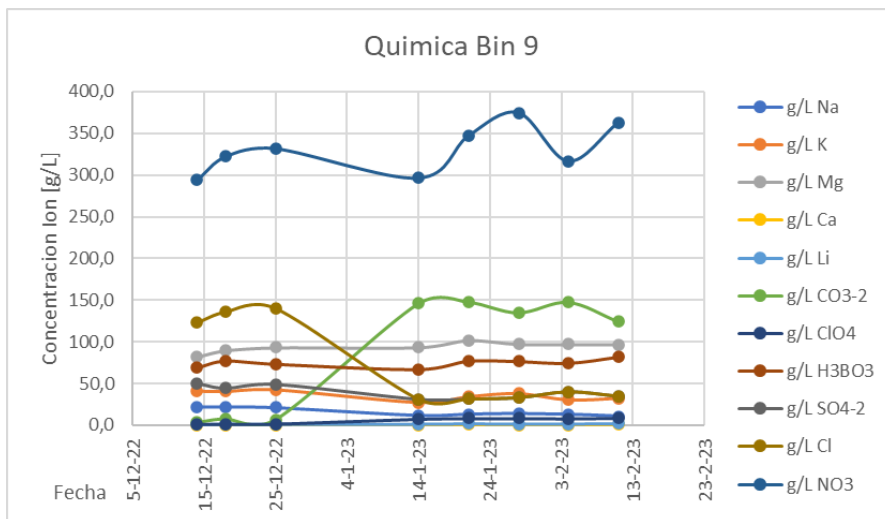


Gráfico 19 Química del Bin 9

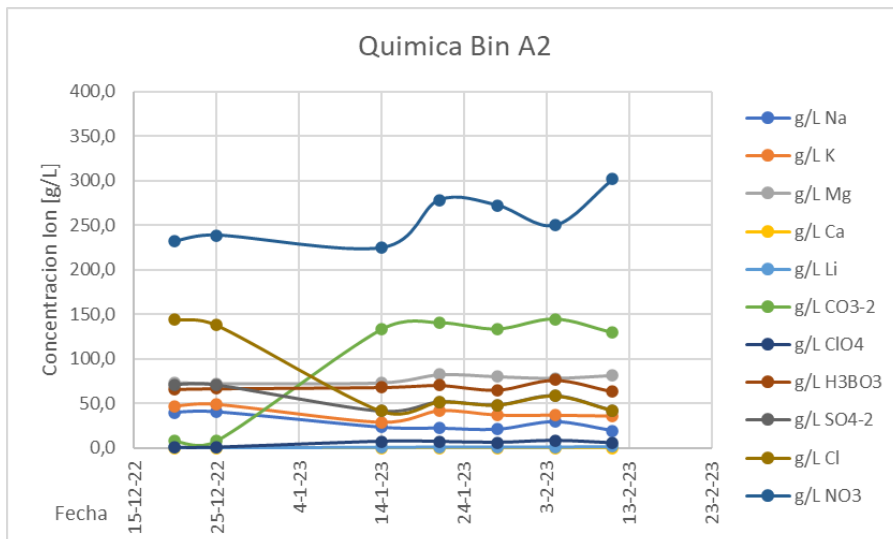


Gráfico 20 Química del Bin A2

Al observar los gráficos 15 al 20, es posible ver el comportamiento durante 7 semanas de los iones de la salmuera. En todos los casos se tiene que el de mayor concentración corresponde a la nitrato (NO_3), y este tiende a aumentar, no linealmente, existe un efecto de error dado que estos bins fueron rellenados por una solución de la misma poza y que se estaba concentrado de igual forma, por lo que al pasar el tiempo estas segundos bins pueden tener una concentración diferente, por lo que al mezclarlo, cambie la concentración de la poza de trabajo, es por ello que se recomienda, si se vuelve a realizar, analizar el comportamiento de la química de ambos bins y el efecto que posee al mezclar ambas soluciones.

Con respecto a los otros iones, se observa que el ion de CO_3^{2-} , carbonato, durante la semana 2 y 3 de análisis tienen un aumento de la concentración, por lo que puede que exista alguna formación de este ion, dado que el aumento es muy repentino. El caso contrario es del ion perclorato (ClO_4), dado que este posee una disminución durante el mismo periodo visto anteriormente, pero solo son en los casos de que la salmuera proviene del Tren de MLK, es por lo que se existe un factor en este tipo de solución que hace que la concentración de perclorato disminuya durante esas semanas, que pueden ser analizadas más a detalles en un futuro análisis. Otro ion que disminuye durante este periodo corresponde al de Cloro (Cl), pero esto ocurre en todas las pozas de análisis.

Otro punto importante que mencionar, es sobre la concentración de Litio (Li), en las salmueras, dado que este posee mayor concentración en las pozas 9, A2 y B2, respectivamente en orden decreciente, pertenecientes estas pozas al tren de MLK, por lo que se puede inferir que este tren posee una mayor concentración de litio presentes en sus soluciones.

Finalmente, con relación a las sales de Sodio (Na) y de Potasio (K), el comportamiento es variable durante el tiempo. La concentración de las sales de sodio es mayor en los primeros gráficos, que corresponden a los del tren de PDV, en la última semana, en todos los casos se ve una disminución de la concentración que puede ser debido a que se aprecian ya en terreno precipitación de los cristales de nitratos. En el caso de la concentración de potasio este varía durante de semanas, no existe una tendencia de existir mayor concentración en algún tren de pozas.

CAPÍTULO 6: MODELOS FENOMENOLÓGICOS Y OBTENCIÓN DE TASAS DE EVAPORACIÓN

6.1 Explicación cálculo modelos

A continuación, se describen modelos fenomenológicos encontrados en literatura, los cuales involucran diferentes parámetros. También se detallan otras formas de obtención no fenomenológicas.

6.1.1 Penman

Corresponde a un método aerodinámico y de balance de energía combinados, semi empírica. Fue propuesta inicialmente en el año 1963, por Penman, y posteriormente se han generado distintas versiones. En este caso se presenta la representación combinada con Monteith. Se presenta a continuación su fórmula, (Santiago Rodríguez, Arteaga Ramírez, Sangerman Jarquín, Cervantes Osornio, & Navarro Bravo, 2012)

Se define como “ Ev ” el valor de la tasa de evaporación desde la superficie, que se presenta la ecuación (1)

$$Ev = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_a + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 u_2)} \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (1)$$

6.1.2 Modelo Ley de Dalton

Este segundo modelo corresponde a un método aerodinámico. En donde se define que la tasa de evaporación del agua depende de la humedad del aire en la cercanía de la superficie y de la velocidad del viento sobre esta, además de la energía calorífica. Estos dos procesos pueden abordarse analizando conjuntamente las ecuaciones de transporte de masa y momentum en el aire. (Garcia , Mollegas, Ascanio, Lopez, & Gonzalez, 2015)

A continuación, se presenta una representación gráfica del efecto del flujo de aire en la evaporación,

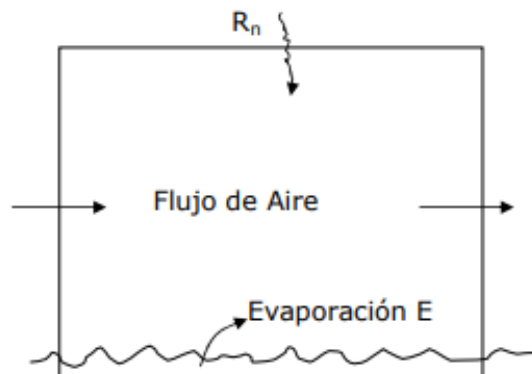


Figura 12 Diagrama del efecto del flujo de aire en la evaporación

Esta expresión para la evaporación se conoce comúnmente como la ley de Dalton quien la propuso en 1802 y es la base de muchas de las fórmulas empíricas que se usan para estimar la evaporación.

$$Ev = \frac{0,622 \cdot k^2 \cdot \rho_a \cdot u_2}{P_{atm} \cdot \rho_w \cdot \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) \right]^2} \cdot (e_s - e_a) \quad (2)$$

6.1.3 Modelo basado en el balance de energía o masa

Se presentan tres modelos de cálculos basados en el balance de energía, el cual solo uno de estos se es utilizado en el análisis de datos.

En primer lugar, se tiene que la tasa de evaporación diaria Ev [mm/día], para una superficie de agua se ha determinado por la ecuación de Harberck (1962) (Molina Martinez, Martinez Álvarez, Baille, & González Real, 2003)

Combinando la fórmula de Penman y el método de transferencia de masa, Penman dedujo,

$$Ev = \frac{\frac{\Delta R_n}{\lambda} + \gamma \cdot 2,6 \cdot (1 + 0,54 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma} \quad (3)$$

Luego se tiene un segundo modelo según el balance de masa el cual solo involucra el área del bin, la velocidad del viento y las presiones, este se describe a continuación,

$$Ev = 2,909 \cdot A^{-0,05} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (4)$$

El tercer modelo describe las ecuaciones basadas en la física que usan para representar cada uno de los flujos de energía

$$E = \frac{R_n - G - H}{L_v} \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right] \quad (5)$$

El modelo (3) y (5) no se utiliza posteriormente para el análisis de datos, dado que no se logra ajustar con los parámetros obtenidos experimentalmente.

6.1.4 Modelo DeBruine

Es un modelo que se considera combinado. Dentro de este grupo se encuentra más modelo como son el de Priestley- Taylor y Penman, pero se puede encontrar los de Brutsaert-Striker o el deBrauin-Keijman, que igualmente involucran parámetros meteorológicos y de energía. (Perez Barriga, 2020)

A continuación, es representado el modelo deBruine, por la siguiente expresión,

$$Ev = \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right) \cdot \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) \cdot \frac{f(U) \cdot (e_s - e_a)}{\lambda \cdot \rho_w} \cdot 3,6 \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (6)$$

En donde,

$f(U)$, corresponde a la función del viento que queda definida por la siguiente expresión

$$f(U) = a + bU_2$$

Donde a= 2,9, b=2,1 y U corresponde a la velocidad del viento en m/s

6.1.5 Modelo Priestley y Taylor

La ecuación que describe el modelo de Priestley-Taylor, 1972. Se considere en situaciones en donde el gradiente de déficit de presión de vapor es nulo, por lo que raramente se obtenía la situación de equilibrio, incluso sobre superficies de agua líquida, es por lo que propusieron la siguiente estimación,

$$Ev = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot \frac{(R_n - G)}{\lambda} + cte \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (7)$$

Se le agrega una constante para análisis posteriores, en donde es posible obtener un menor error a la hora de compararlo con el modelo del evaporímetro.

6.1.6 Modelo Hargreaves

La fórmula de Hargreaves (Hargreaves y Sumani, 1985) y (Hargreaves y Allen, 2003), necesita datos de temperaturas y de radiación solar, en la ecuación (8) se muestra la expresión simplificada para la estimación de ésta (Santiago Rodríguez, Arteaga Ramírez, Sangerman Jarquín, Cervantes Osornio, & Navarro Bravo, 2012)

$$Ev = 0,0023 \cdot (T + 17,78) \cdot R_a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \quad (8)$$

Esta ecuación involucra el factor R_a , que representa la radiación Extraterrestre [mm/d], el cual corresponde a la radiación solar que incide en el límite de la atmosfera terrestre. Se obtiene a partir de los ángulos de incidencia de factores solar, el cual son valores que no se poseen por ende esta ecuación no es utilizada para análisis futuros.

6.1.7 Otros modelos

Se plantean cinco métodos de cálculo, pero en este caso no involucran modelos empíricos.

En primer lugar, se plantea “Tasa Evap [L/m2d]”, este corresponde a que se utiliza para el cálculo de la tasa de evaporación de la solución, el volumen de agua evaporado entre los días de análisis de manera experimental. Es decir, que, al transcurrir 7 días de evaporación en los bins, se mide la altura inicial y la final, y con el volumen obtenido a partir de esto y los días se puede obtener una tasa de evaporación agua. Cabe mencionar que el bin que se utiliza para este análisis solo posee agua.

El segundo método corresponde al “Meteorología”. Se obtiene a partir de la tasa de evaporación de agua obtenida en la estación meteorológica. Esta información es obtenida diariamente.

El tercer método corresponde al denominado “Método A. Lara”. Este es obtenido de una tabla desarrollado internamente por SQM, el cual estima la tasa de evaporación del agua durante los meses del año. A continuación, se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 Tasa de evaporación "Método A. Lara"

Tasa de evaporación	
Mes	Evap [mm/d]
Enero	6
Febrero	5,5
Marzo	4
Abril	3,9
Mayo	3,3
Junio	3
Julio	3,1
Agosto	3,6
Septiembre	4,4
Octubre	5,2
Noviembre	5,8
Diciembre	6,1

El cuarto método corresponde al de "gProms". Este corresponde a un programa interno de SQM en el cual se estima a futuro las tasas de evaporación del agua. En el análisis posterior solo se poseen datos en los corrientes del tren de MLK.

Finalmente, el quinto método corresponde al "Experimental". Este método de cálculo plantea que la tasa de evaporación de la salmuera se calcula a partir de la diferencia de altura de los bins de salmuera experimentales. El cálculo final se obtiene por el promedio de la diferencia de altura por día, es decir [mm/d] de evaporación.

6.2 Resultados de los modelos

Se presentan los resultados obtenidos del análisis de cada poza. Estos corresponden desde el 1 de Enero de 2022 hasta el 14 de Marzo del 2023, diariamente.

Se evalúa los modelos de Penman, deBruine, Priestley y Taylor, Balance (ecuación 4) y del evaporímetro de la estación meteorológica, utilizando los valores meteorológicos de Coya sur, y con correlaciones de obtener de parámetros en cada caso.

En la Gráfico 21, se presentan gráficos de tasa de evaporación de agua, en la cual se presentan unas curvas sinusoidales con un patrón repetitivo anual, en donde los meses de octubre a enero existen valores altos, mientras que en los meses de mayo a agosto en donde se encuentra la zona de los mínimos valores de la tasa de evaporación.

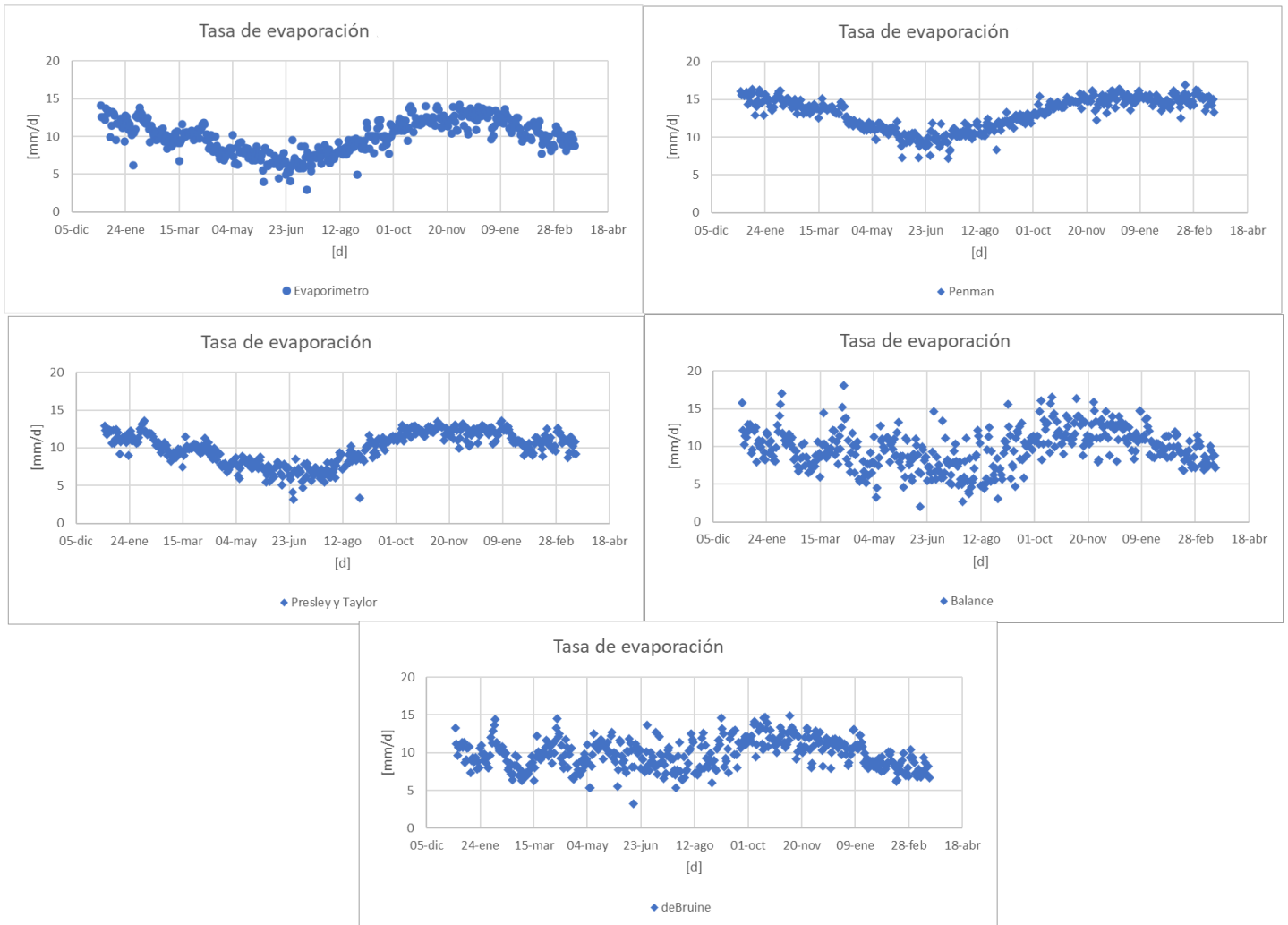


Gráfico 21 Tasa de evaporación modelos Enero 2022 - Marzo 2023

Se calcula la tasa de evaporación, pero para la salmuera, para cada poza, utilizando la ecuación del punto 2.4, en donde se utiliza la concentración de magnesio. El tiempo de análisis considerado en este caso corresponde del 14 de Diciembre del 2022 al 11 de Febrero del 2023, por lo que el período de tiempo se va repitiendo cada 60 días (demarcado los periodos, de izquierda a derecha, B1, 1, 3A, B2, A2, 9). Así se tiene los siguientes gráficos de resultados para cada modelo,

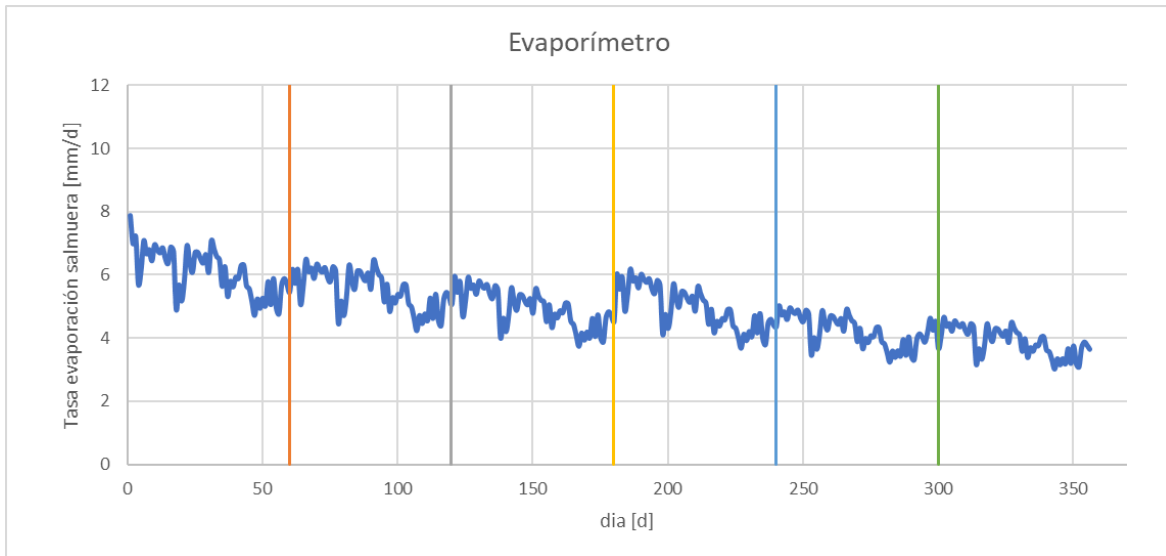


Gráfico 22 Tasa de evaporación Salmuera evaporímetro

En el gráfico 22, se muestra la tasa de evaporación del evaporímetro. Al ir cambiando de concentración de poza existe un leve aumento de la tasa de evaporación, que luego sigue disminuyendo.

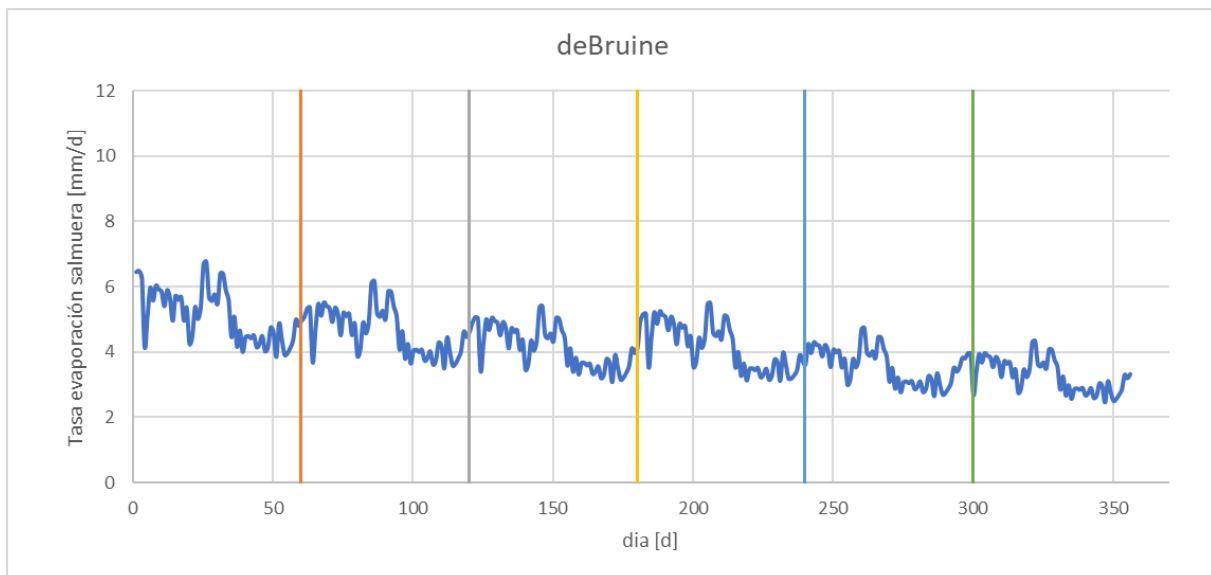


Gráfico 23 Tasa de evaporación Salmuera deBruine

En el gráfico 23, se presenta la tasa de evaporación del modelo deBruine, en este caso las tasas varían entre 2 a 7 [mm/d]. Nuevamente existe un patrón que va disminuyendo al cambiar la concentración de nitrato según la poza de análisis,

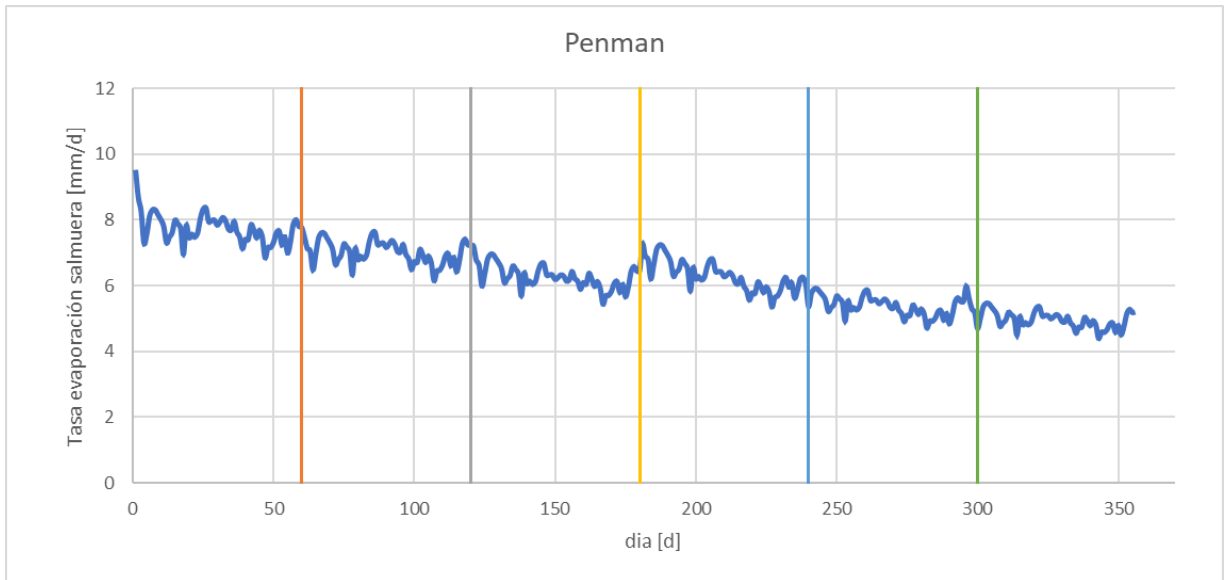


Gráfico 24 Tasa de evaporación Salmuera Penman

Luego se presenta la tasa de evaporación del método de Penman, según lo que se presenta en la Figura 45. La tasa de evaporación decrece de manera más lineal, remarcado la diferencia de trenes, PDV los primero 180 días, y el tren de MLK, los restantes 180 días.

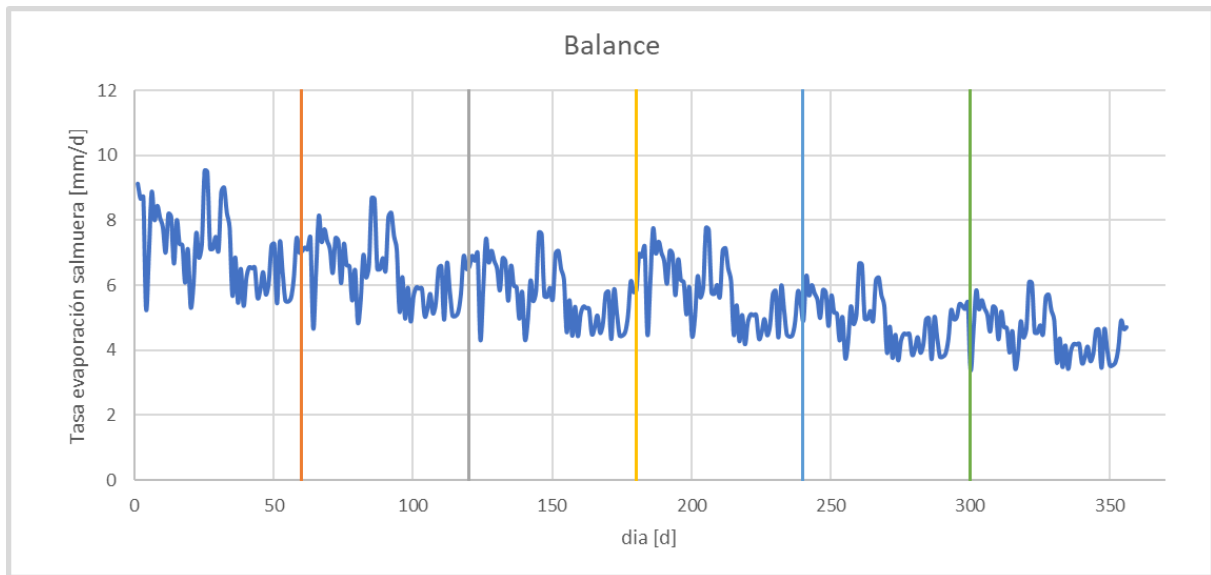


Gráfico 25 Tasa de evaporación Salmuera Balance

En el caso del gráfico 25, se presenta el análisis del método de Balance, en donde la tasa de evaporación fractura entre los 3 a 10 [mm/d]. Se aprecia que este nuevamente disminuye y existe patrones que se generan cada los 60 días.

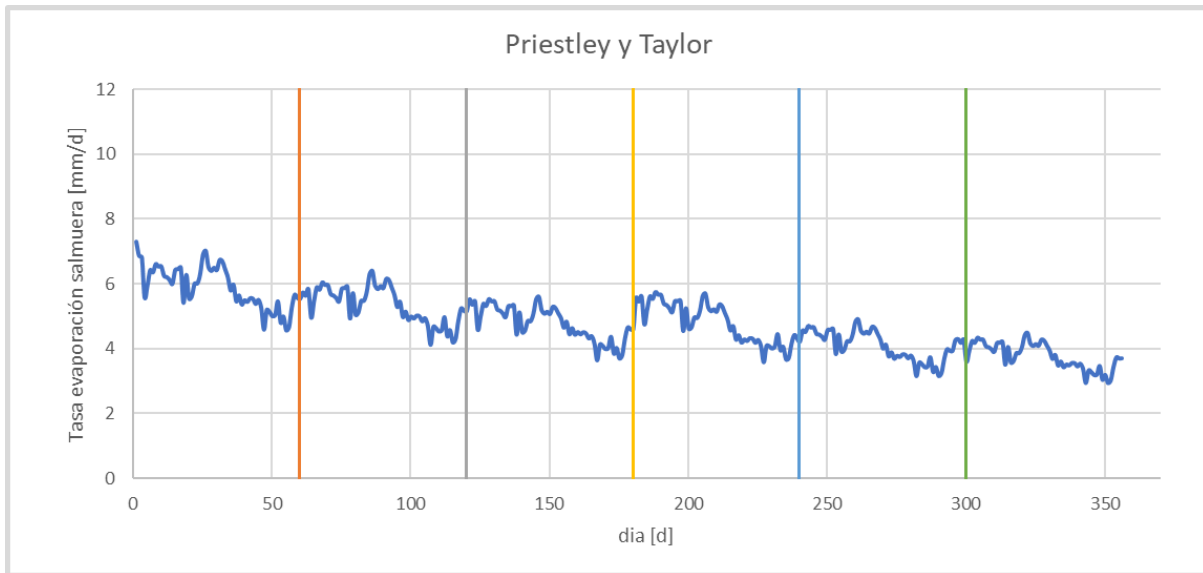


Gráfico 26 Tasa de evaporación Salmuera Priestley y Taylor

En el gráfico anterior se presenta la tasa de evaporación del modelo de Priestley y Taylor, en el cual se observa que, según la concentración de nitrato, cada 60 días, existe una tasa que en un principio no presenta una gran disminución, para luego disminuir más constantemente.

6.3 Análisis de los resultados obtenidos

6.3.1 Correlación con Evaporímetro

A continuación, se presentan el siguiente gráfico de análisis de los modelos, los cuales indican si existe una correlación entre los modelos meteorológicos (Balance, deBruine, Priestley y Taylor y Penman), con la tasa de evaporación del evaporímetro. Este análisis no tiene influencia la química de la solución, por ende, solo se evalúa el efecto meteorológico. También son considerados los resultados obtenidos desde Enero 2022,

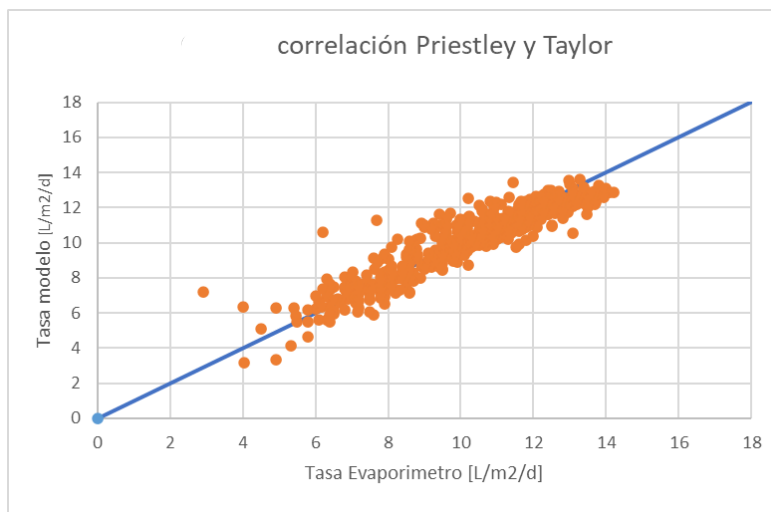


Gráfico 27 Correlación Priestley y Taylor y Evaporímetro

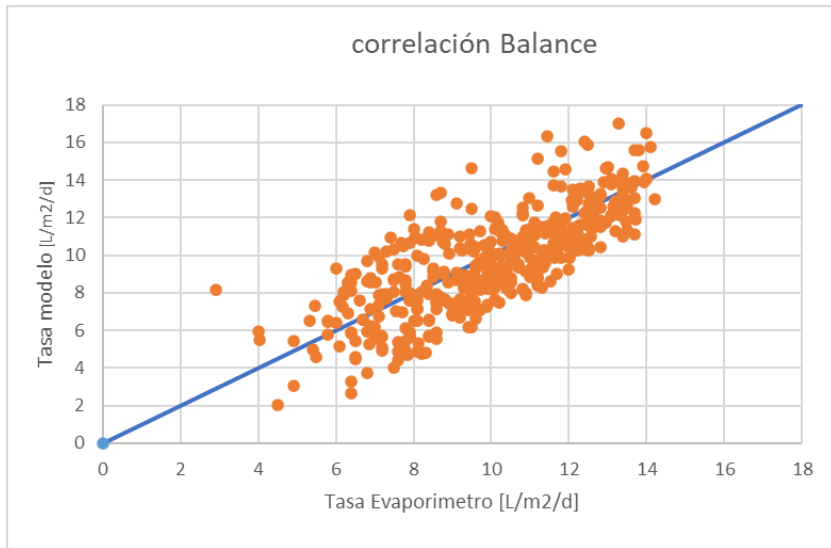


Gráfico 28 Correlación Balance y Evaporímetro

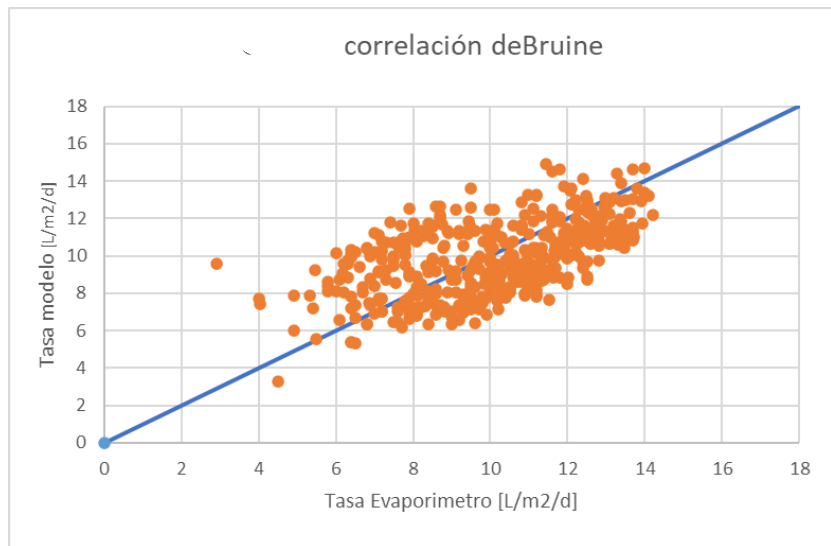


Gráfico 29 Correlación deBruine y Evaporímetro

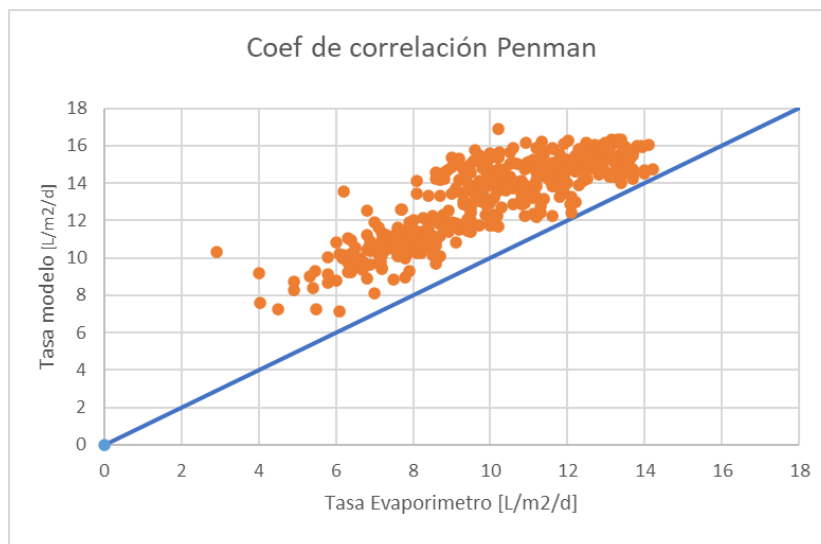


Gráfico 30 Correlación Penman y Evaporímetro

Los valores de correlación obtenidos se representan en la siguiente tabla,

Tabla 2 Valores de correlación métodos

Método	Valor	Desviación
Penman	0,85	2,11
deBruine	0,57	1,97
Balance	0,76	2,66
Priestley y Taylor	0,92	2,11

Según lo que se muestra en la Tabla 2, los valores de correlación varían de 0,57 y 0,92, por lo que tiene una correlación positiva, en todos los casos y más aún los cercanos al valor 1, es decir, que las variables que gobierna la ecuación, varían en el mismo sentido, si una variable aumenta, la otra igual aumentara. Por lo que al observar los gráficos 27 al 30 y la tabla anterior, se concluye que el modelo del Priestley y Taylor y el método de Penman, son métodos de cálculos cercanos al modelo actual. Se toman como base y se evalúa más a detalle con el efecto de la química y los parámetros meteorológicos, para estimar el rango donde se es posible su uso.

Estos dos modelos seleccionados, Penman y Priestley y Taylor, se le realiza un ajuste al parámetro cero. Quedando de la siguiente forma sus gráficas a una misma escala que se presentó anteriormente.

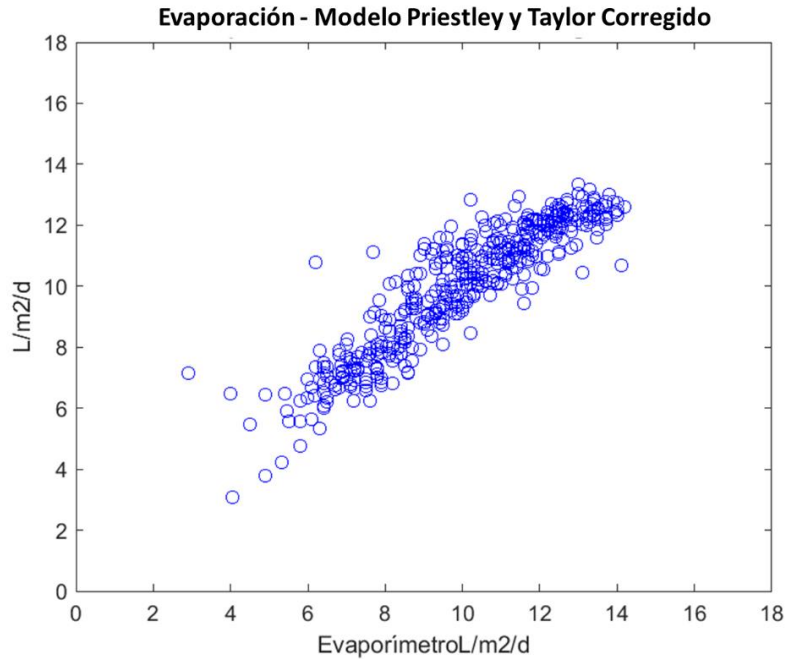


Gráfico 31 Corrección modelo de Priestley y Taylor

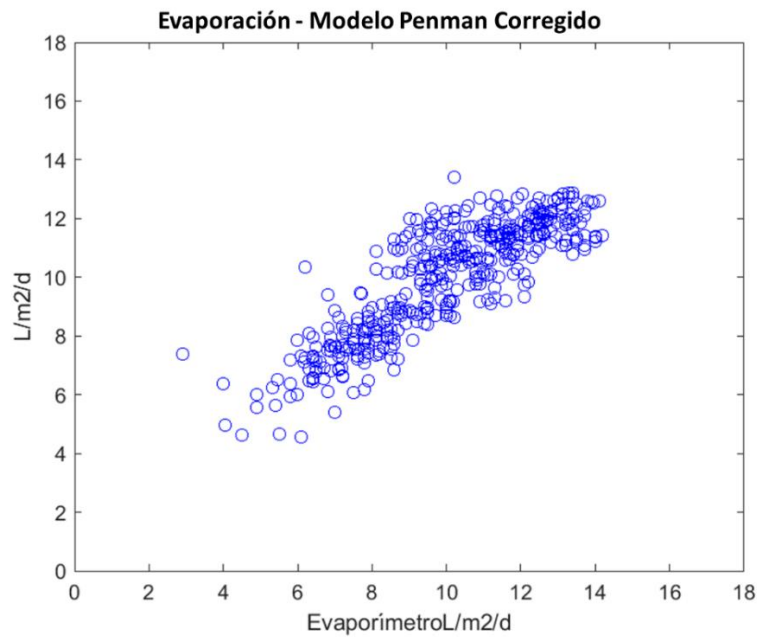


Gráfico 32 Corrección modelo de Penman

Para el ajuste de ambos modelos se realiza un ajuste lineal, en cada caso, para asegurarse que la recta pase por la coordenada (0,0), y así al momento de evaluarla con la tasa de evaporación del evaporímetro, se presentan en sus errores, promedios de alrededor de 0, en ambos casos, según las gráficas presentadas, los valores de desviación estándar para el caso de Priestley y Taylor varía de 2,11 a 0,92 y el modelo de Penman varía de 2,11 a 1,10 . En el caso de los nuevos modelos los coeficientes de correlación estos se mantuvieron constantes.

6.3.1 Correlación con factores meteorológicos

Se verifica la relación que existe con los factores meteorológicos analizados (radiación, temperatura, velocidad del viento y humedad), y los modelos ajustados de Penman y Priestley y Taylor. También se presenta la comparación los valores de modelos iniciales.

En el Gráfico 33, se muestra el gráfico que relaciona la radiación solar con los modelos a justados. También existe una alta correlación positiva con los modelos de Penman, evaporímetro y de Priestley y Taylor, mientras que en el caso del método de balance es una correlación positiva pero débil, con un valor de coeficiente de correlación correspondiente a 0,5. Se encuentra que el modelo de Bruine posee una correlación también positiva pero mucho más débil dado que el coeficiente es de 0,32. (Tabla 3)

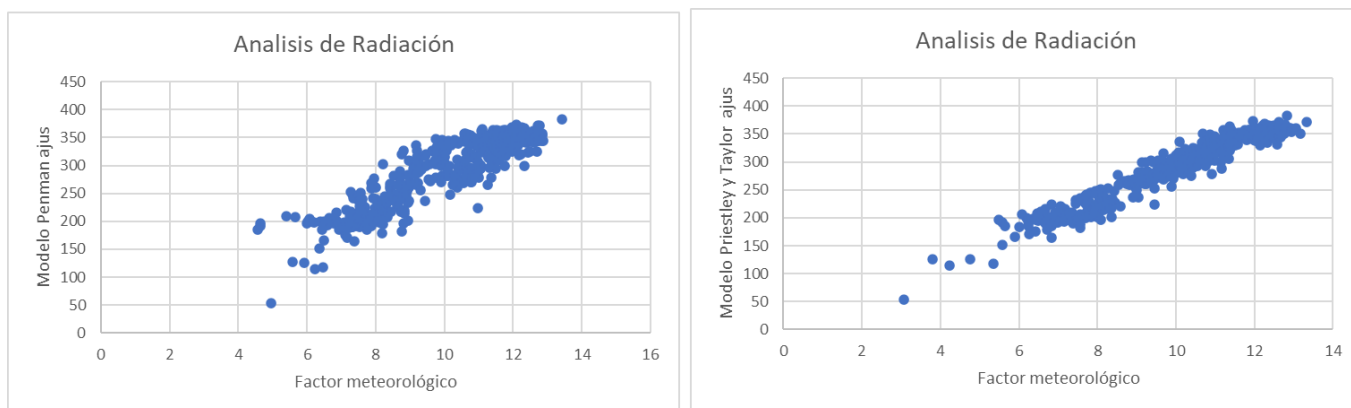


Gráfico 33 relación modelos con Radiación

En el caso del gráfico 34, se analiza la correlación con la temperatura con los modelos de Penman y Priestley y Taylor ajustados. Existe una alta correlación positiva, que corresponde con en el modelo de Penman, mientras que los modelos restantes, es una correlación positiva pero débil. Nuevamente el modelo de Bruine presenta la correlación más baja con un 0,15. (Tabla 3)

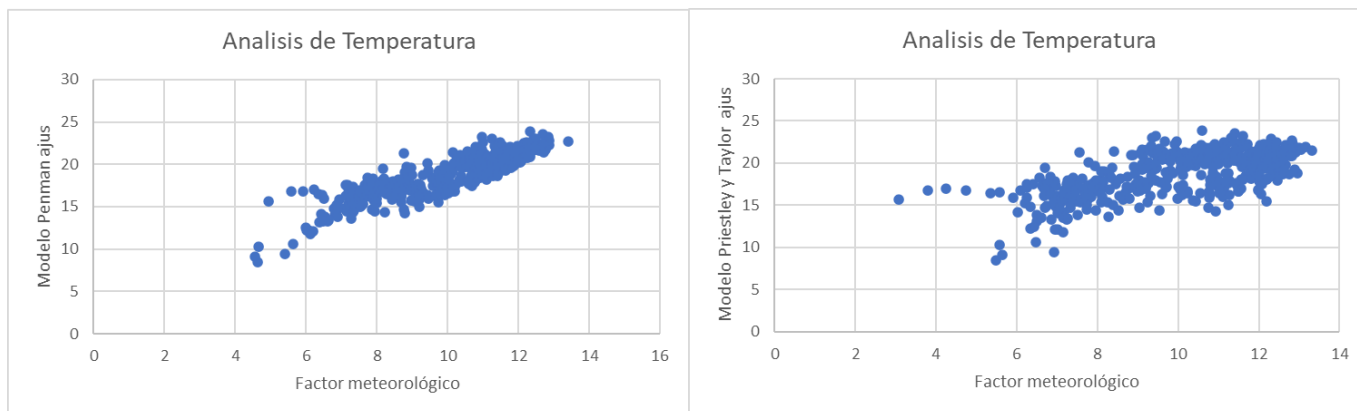


Gráfico 34 relación modelos con Temperatura

La relación de los modelos con la humedad se presenta en el gráfico 35. En este caso existe en todos los casos una correlación débil, casi nula. En relación a los modelos de Penman, evaporímetro y Priestley y Taylor, esta positiva la correlación, mientras que en los modelos de Bruine y Balance la correlación es negativa.

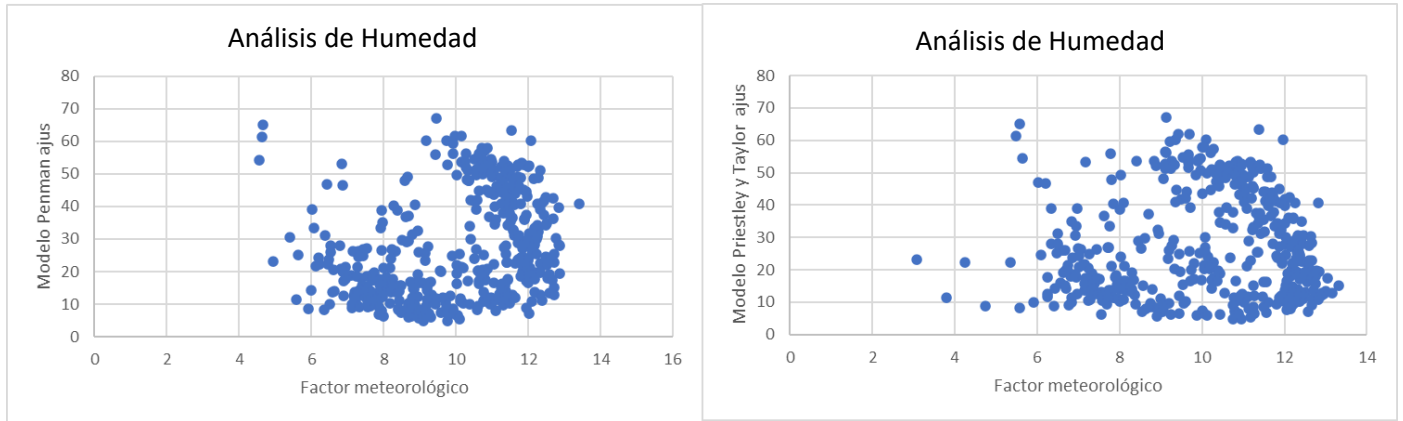


Gráfico 35 relación modelos con Humedad

Finalmente, se posee en el gráfico 36, la correlación en la Velocidad del viento en este caso todos los modelos poseen una correlación positiva débil, fluctuando los valores entre 0,27 y 0,66. Mas a detalle se presentan todos los valores analizados de los factores meteorológicos en la Tabla 3

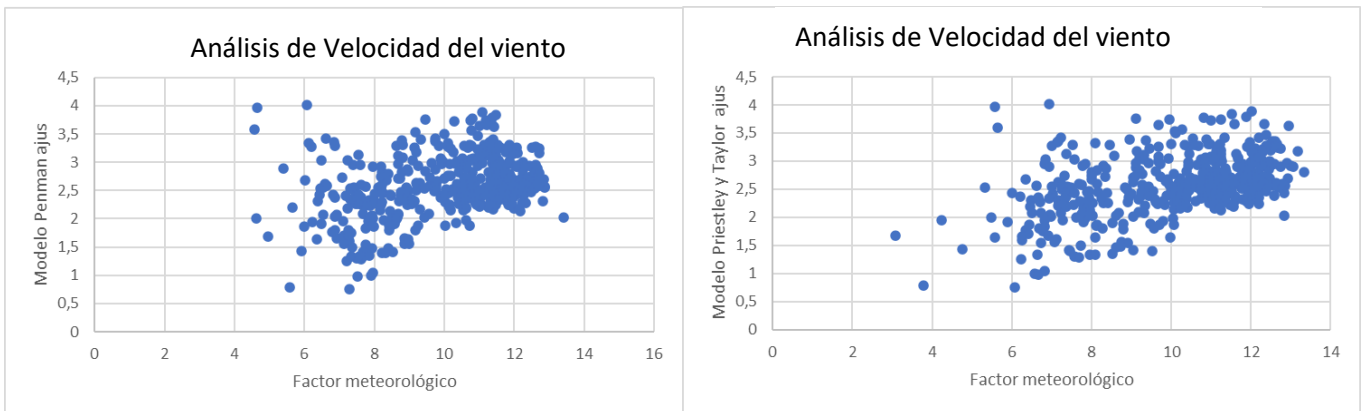


Gráfico 36 relación modelos con velocidad del viento

Tabla 3 Valores de correlación con factores meteorológicos

	Penman	Evaporímetro	deBruine	Balance	Priestley y Taylor	Priestley y Taylor Ajuste	Penman Ajuste
Radiación	0,90	0,86	0,32	0,53	0,97	0,97	0,90
Temperatura	0,89	0,64	0,15	0,48	0,65	0,65	0,89
Humedad	0,29	0,04	-0,61	-0,26	0,08	0,08	0,29
Vel. Del viento	0,37	0,51	0,47	0,66	0,46	0,46	0,37

En la Tabla 3 se presentan los valores de correlación presentados entre cada modelo presentado y analizado y los factores meteorológicos, en el cual se puede destacar que el factor con mayor influencia corresponde a la Radiación, mientras que el que posee menor correlación es la Humedad.

CAPÍTULO 7: ANALISIS Y RESULTADOS DE DATOS

7.1 Propuesta de tasa de evaporación

A partir de las condiciones meteorológicas se es posible realizar un análisis en el cual se obtenga una tasa de evaporación.

$$Tasa\ de\ evaporacion = \frac{(100 - humedad) \cdot Vel.\ viento \cdot Radiacion^2 \cdot temperatura}{40000000} + Ct\ (M1)$$

Esta expresión es propuesta maximizando el R^2 y minimizando la suma cuadrática del error, es por lo que se agrega una contante (2,02). Para corroborar la expresión propuesta se analiza la regresión lineal que se tienen al compararla con la tasa de evaporación obtenida en la estación meteorológica.

La segunda expresión se obtiene a partir de una regresión lineal de los parámetros involucrados, y se analiza en función de la tasa de evaporación que se obtiene en la estación meteorológica,

$$Tasa\ de\ evap = -3,22 + 0,02 \cdot Radiación + 0,24 \cdot Temperatura - 0,04 \cdot Humedad + 1,14 \cdot Vel.\ viento\ (M2)$$

También se propone un tercer método de cálculo, que corresponde a través de redes neuronales, el cual es un método de análisis que se procesa en este caso con 7 datos meteorológicos; temperatura promedio, mínima y máxima; Humedad mínima y máxima; velocidad del viento promedio y radiación solar promedio, y otros análisis que procesa considerando parte de los parámetros mencionados anteriormente. Se considera un periodo de Enero del 2022 a Marzo del 2023 para el análisis efectuado. Es por lo que para el desarrollo se utiliza un programa computacional, Matlab, en el cual para el desarrollo se considera el 70% aleatorio de todos los datos y con el 30% restante se valida el resultado obtenido. No se posee una ecuación para representar el modelo, dado que son secuencia de códigos.

7.2 Método de obtención de modelo tasa de evaporación por condiciones meteorológica

Para la obtención de los modelos propuestos en el punto 7.1 se utiliza datos obtenidos durante el periodo de Enero 2022 a Marzo del 2023. Estos corresponden a los medidos en la estación meteorológica de Coya Sur.

Se realiza una regresión lineal para comparar la linealidad de los datos con el valor del Evaporímetro, esta corresponde a que $R^2 = 0,8338$ para el caso del análisis de la ecuación (M1), mientras que para la ecuación (2) dio $R^2 = 0,8658$, ambas se observan en el gráfico 37

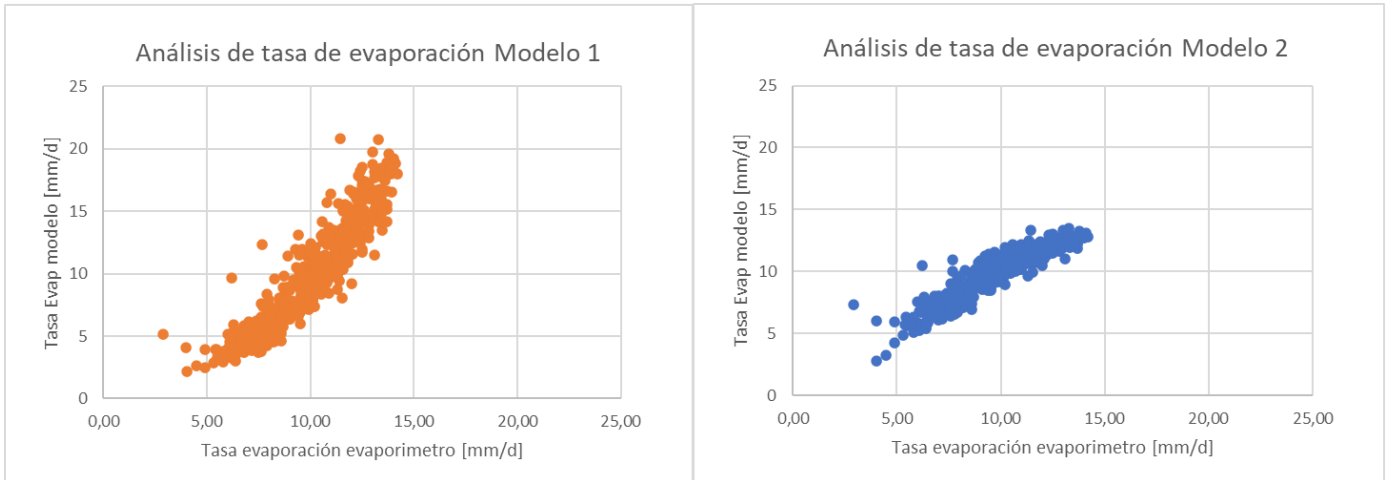


Gráfico 37 Análisis Tasa de evaporación modelo propuesto (M1 y M2)

Existe una buena correlación entre los modelos y la tasa de evaporación del evaporímetro, pero no indican que corresponden a una buena predicción para la tasa de evaporación de las salmueras. Es por lo que se evalúa los resultados en la función química, utilizando la ecuación (2.4), para así comparar con la tasa experimental de evaporación de la salmuera.

Obteniendo así los siguientes resultados. Los errores son de +/-15% y +/-3%, según el modelo 1 y 2, respectivamente. Dado que se no posee grandes diferencias es posible que sea representativo, pero se debe comparar ahora con los valores de tasa de evaporación de cada poza, para observar si existe alguna gran diferencia.

Es por lo que se relaciona las tasas de evaporación obtenidas experimentalmente, sus pendientes, con los valores obtenidos anteriormente. En este caso el análisis se hace por pozas y por los días que se tienen el análisis químico. Con respecto a los resultados obtenidos se representan en la Tabla 4,

Tabla 4 Análisis de error modelos propuestos

Error	E M1	EM2
Promedio	98,3%	93,6%
máximo	420,6%	550,2%
mínimo	0,2%	1,0%

Por otro lado, se posee el modelo de redes neuronales, en el cual se presenta los resultados de análisis según el método de evaporímetro según los siguientes gráficos

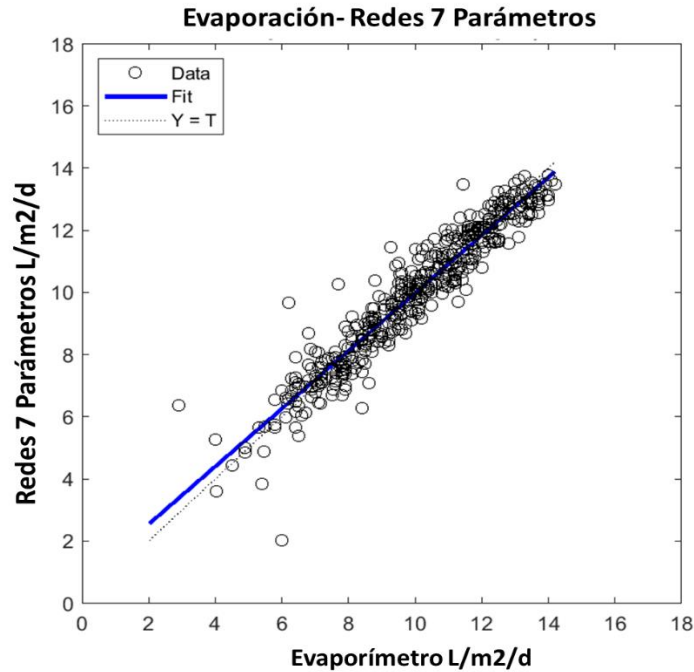


Gráfico 38 modelo de redes neuronales 7 Parámetros

El gráfico 38 representa la correlación del sistema de red neuronales con el método de cálculo de tasa de evaporación a través del evaporímetro.

Por lo que finalmente se puede concluir que las correlaciones matemáticas propuestas no son representativas, para el cálculo de la tasa de evaporación de la salmuera, para un rango de análisis extenso, por lo que se recomienda evaluar el efecto de cada parámetro, para generar rangos más acotados en el cual los modelos son válidos para el cálculo de la tasa de evaporación del agua y posteriormente salmuera, para así se pueda implementar en análisis futuros. En el caso del modelo de red neuronales la correlación indica que, si corresponde a una buena aproximación al cálculo de la tasa de evaporación de agua, es por lo que se evalúa el efecto de la cantidad de parámetros involucrados en el análisis. (Cap. 7.3)

En el gráfico 39 se muestran la tasa de evaporación experimental (curva azul) y la tasa de evaporación utilizando redes neuronales (curva roja) en el tiempo. En esta se puede ser que la predicción realizada es similar a la que se requiere.

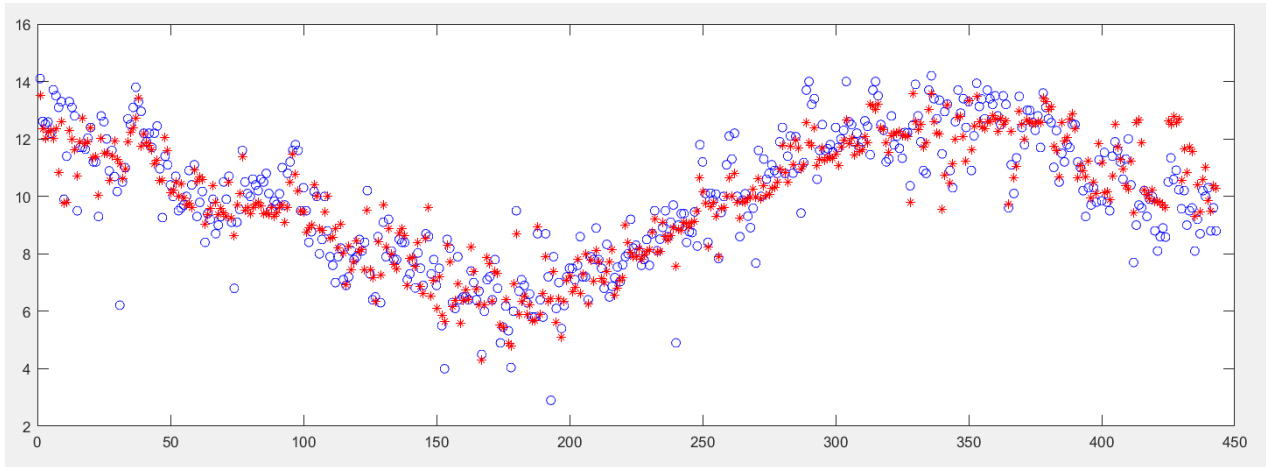


Gráfico 39 Tasa evaporación redes neuronales y experimental

7.3 Comparación modelo de redes neuronales

Se realiza la comparación de ajuste del modelo de redes neuronales, pero involucrando menos parámetros meteorológicos. En el gráfico 38 se presenta con 7, y a continuación se evalúa 3 y 2 parámetros, de los 7 presentado inicialmente.

Al observar los gráficos 38, 40 y 41, la relación entre la tasa de evaporación del evaporímetro y la tasa presentada por el modelo va disminuyendo al disminuir la cantidad de parámetros involucrados.

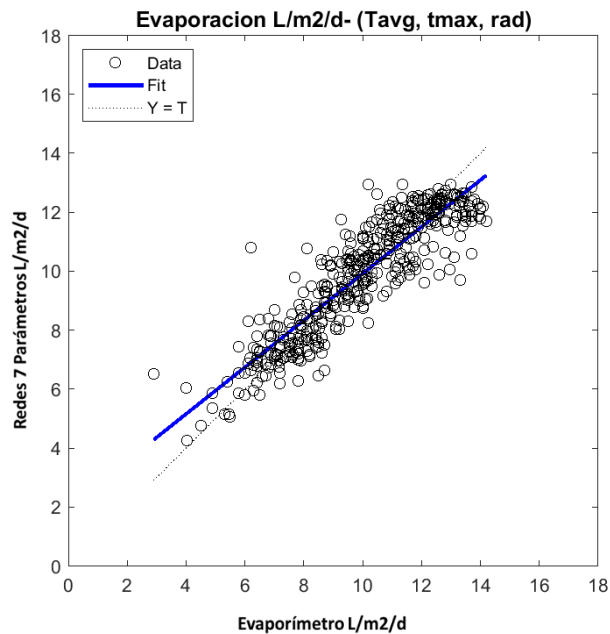


Gráfico 40 modelo de redes neuronales 3 Parámetros

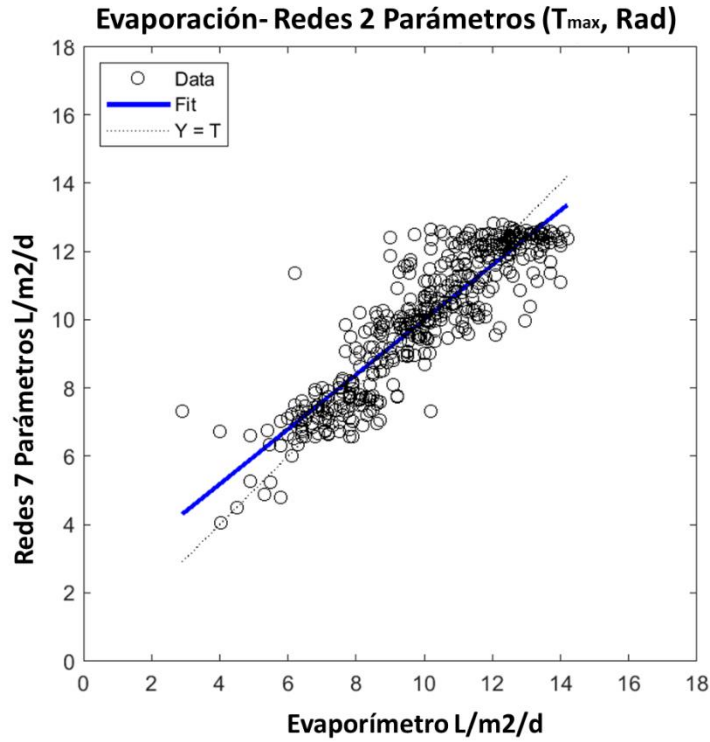


Gráfico 41 modelo de redes neuronales 2 Parámetros

Ahora dado que existe la opción de reentrenar dentro del programa computacional, se presentan otra serie de datos para el mismo análisis y validación del modelo. Es por lo que se presenta dos modelos reentrenados, con 7 y 2 parámetros.

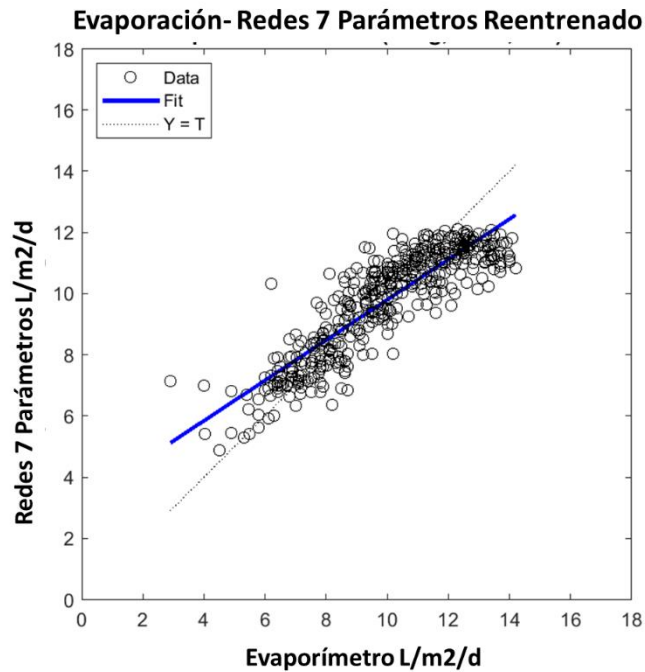


Gráfico 42 modelo de redes neuronales 7 Parámetros reentrenado

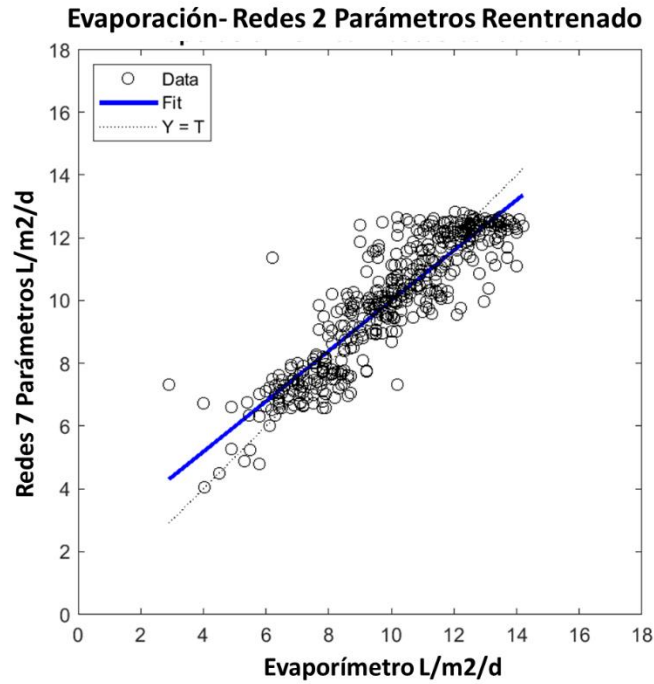


Gráfico 43 modelo de redes neuronales 2 Parámetros reentrenado

Lo anterior muestra que al variar el set de datos para el análisis no varía los resultados obtenidos, por lo que el modelo utilizado representa una buena aproximación para la predicción.

7.4 Análisis desviación estándar modelos

Se realiza un análisis de desviación estándar de los modelos presentados, con el objetivo de verificar cuales más representativo para la predicción de la tasa de evaporación entre los modelos anteriores, deBruine, Penman, Balance, Priestley y Taylor, Penman Ajustado y Priestley y Taylor ajustado, Figura 13. En la Figura 14 se observa desviaciones solo de estimaciones con redes neuronales y modelos lineales, que tiene el objetivo de observar la influencia de la utilización de la cantidad de parámetros para la estimación. Por último, en la figura 15 se observa re-entrenos de los modelos con redes neuronales, utilizando 7 y 3 parámetros.

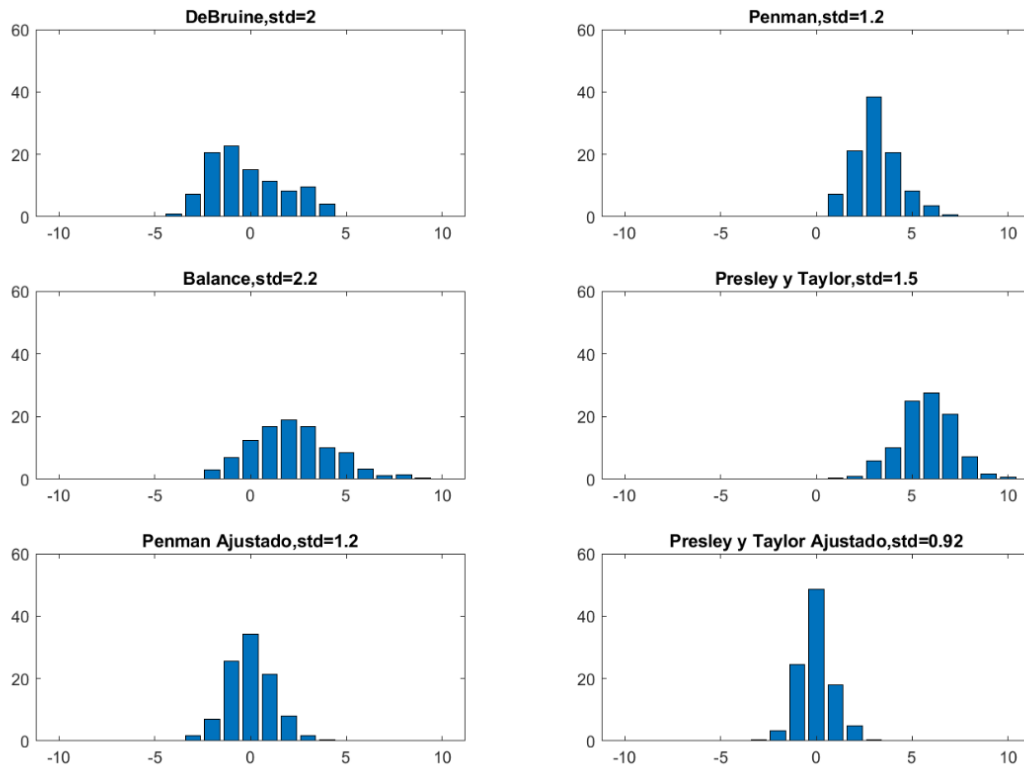


Figura 13 Gráficos de Desviación estándar modelos fenomenológicos

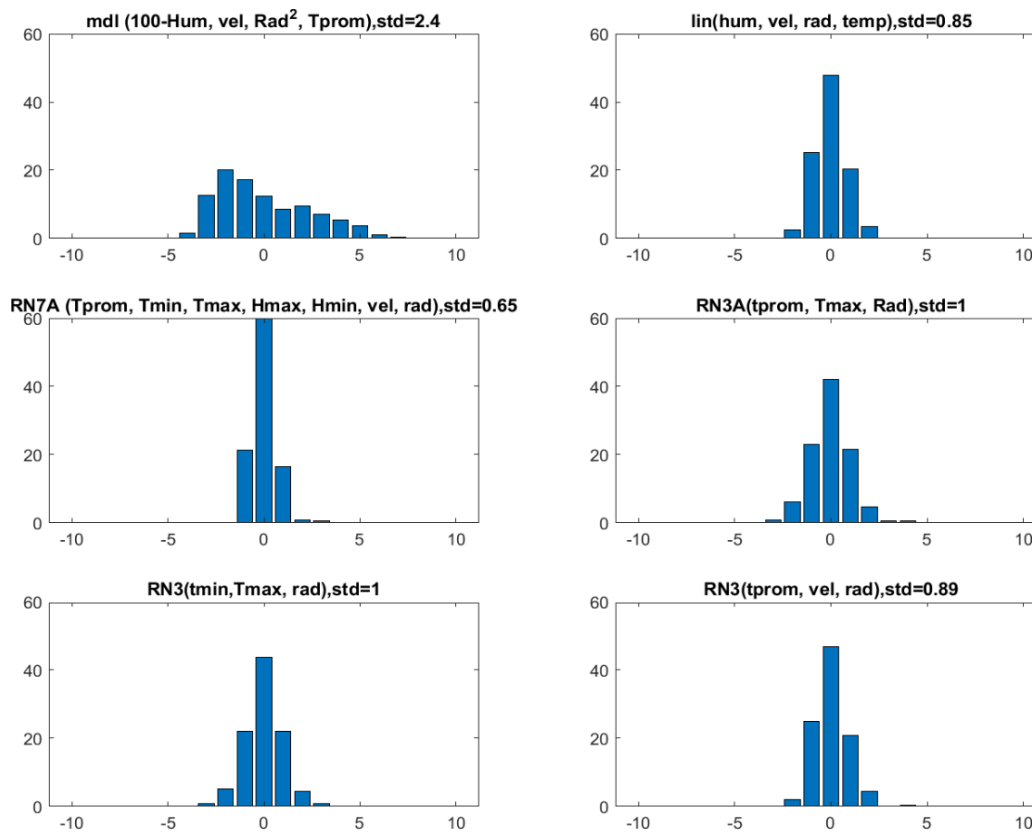


Figura 14 Desviación estándar modelos lineales y redes neuronales

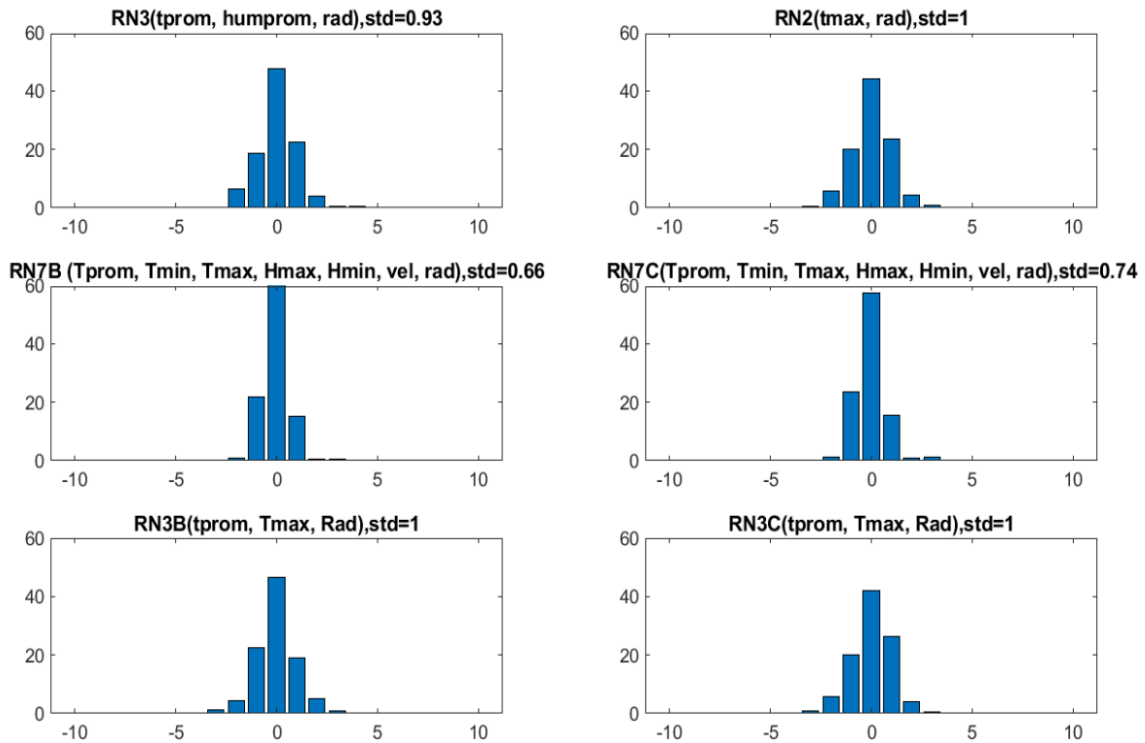


Figura 15 Desviación estándar redes neuronales (re-entrenado)

De la figura 13, se observa principalmente que los modelos ajustados de Penman y Priestley poseen una mejor representación de las desviaciones de sus datos, dado que no existe una desviación ni distribución de estos. En tanto en la figura 14, los modelos lineales propuestos no poseen una buena desviación mientras que los de redes neuronales sí. Por último, observando la figura 15 se observa que independiente el número de parámetros que se utiliza en el modelo de redes, la desviación representada no posee grandes sesgos.

7.4 Análisis de pendientes tasa de evaporación experimental

7.4.1 Análisis cada 10 días app

Se realiza un análisis de la tasa de evaporación experimental, en donde se grafica la tasa diaria en intervalos de aproximadamente 10 días, con nueve datos de pendiente por poza, con el objetivo de analizar las pendientes para observar si existe un efecto en los factores meteorológicos que perturben los resultados.

El comportamiento que poseen estas tasas que al pasar las semanas esta tiende a ser menor, lo cual tiene sentido con la realidad, dado que al pasar el tiempo y al irse concentrado más la solución existe una mayor resistencia a la evaporación, es decir que se necesita mayor energía para evaporar, por ende, se evapora menos.

A continuación, se presenta la Tabla 5, en la cual se adjunta los resultados, primero de las pendientes obtenidas en los rangos de fechas mencionados y luego los promedios meteorológicos en estos mismos dichos rangos.

Tabla 5 Pendientes pozas y promedios meteorológicos

Fecha	B1	1	3A	B2	9	A2	Humeda [%]	Radiación [W/m ²]	Vel viento [m/s]	Temperatura [°C]
15-dic	0,485	0,695	0,362		0,435		26,242	324,973	2,984	20,590
24-dic	0,802	0,675	0,355	0,896	0,385	0,879	28,861	342,970	2,828	20,872
05-ene	0,436	0,419	0,224	0,588	0,259	0,674	36,962	335,492	3,011	19,810
16-ene	0,562	0,377	0,239	0,816	0,260	0,726	25,574	346,740	2,862	20,438
29-ene	0,567	0,233	0,179	0,513	0,181	0,430	48,517	317,937	2,886	21,080
10-feb	0,507	0,212	0,134	0,445	0,126	0,342	47,852	282,916	2,924	22,384
18-feb	0,411	0,249	0,188	0,444	0,175	0,360	55,649	317,668	2,948	20,902
01-mar	0,343	0,171	0,159	0,165	0,158	0,383	45,632	314,580	2,410	21,472
12-mar	0,356	0,155	0,114	0,194	0,045	0,192	47,599	327,230	2,568	21,561

En la poza B1, en el segundo análisis se posee una pendiente superior a 0,8, en donde el valor que sigue corresponde a alrededor de 0,5, el cual desde ahí comienza a disminuir uniformemente, por lo que al buscar en la semana de donde existió ese aumento, que corresponde desde el 15 al 24 de diciembre del 2022. Para ello se analiza los parámetros meteorológicos de un periodo antes y de un periodo después, para ver que efecto poseen estos antes el cambio del valor. Las tasas de estos periodos son cercanas a 0,5 (como referencia para el análisis). Con respecto a la temperatura, existe un leve aumento al aumentar el valor de la tasa de evaporación y luego disminuye al cambiar una tasa de evaporación menor, lo cual tiene sentido con lo que debería ocurrir dado que la temperatura afecta proporcionalmente a la tasa de evaporación. El mismo efecto ocurre en el caso de la Radiación solar, el cual es proporcional a la tasa de evaporación. En caso contrario es la velocidad del viento, es decir, que es inversamente proporcional, dado que, al aumentar la tasa de evaporación, existió una disminución de la velocidad del viento. Por último, con respecto a la humedad relativa no existe un patrón claro, dado que este aumenta proporcionalmente, al pasar las semanas, independiente de que haya aumentado o disminuido la tasa de evaporación.

En las pozas B2 y A2 ocurre el mismo caso anterior, pero con la diferencia que en este caso que primero disminuye y luego aumenta la tasa de evaporación. Los parámetros meteorológicos, de temperatura, radiación y velocidad del viento, tuvieron en ese periodo lo que se había concluido anteriormente, de que era proporcional con la radiación y la temperatura y que era inversamente proporcional con la velocidad del viento. En el caso de la humedad el comportamiento que posee es que al disminuir en un principio la tasa de evaporación la humedad aumenta, y luego al aumentar la tasa de evaporación la humedad disminuye.

En el caso de las pozas 1, 3A y 9, sus tasas de evaporación disminuyen constantemente, aunque existe en ocasiones pequeños aumentos, que luego vuelven a disminuir. Por lo que al analizar los factores meteorológicos se tiene que los comportamientos no tienen una tendencia clara, dado que puede aumentar o disminuir su valor, al disminuir la tasa de evaporación. Es por lo que para una mejor conclusión con respecto a este análisis es necesario tener una mayor cantidad de data.

7.4.2 Análisis cada 3 días

Se presenta el gráfico 44, la contiene una gráfica de la tasa de evaporación obtenida cada 3 días, la cual disminuye al pasar el tiempo dado que posee mayor concentración la solución y, por ende, existe una mayor resistencia a la evaporación. También se aprecia, que según el tren que representa cada poza, existe una disminución progresiva de la evaporación, con respecto al tren de PDV, dado que la concentración presente es mayor hacia la poza 3A, mientras que en el caso del tren de MLK, la poza A2 posee una mayor concentración con respecto a la poza 9, lo que nos indica que esta última posee un efecto de costra que afecta la evaporación.

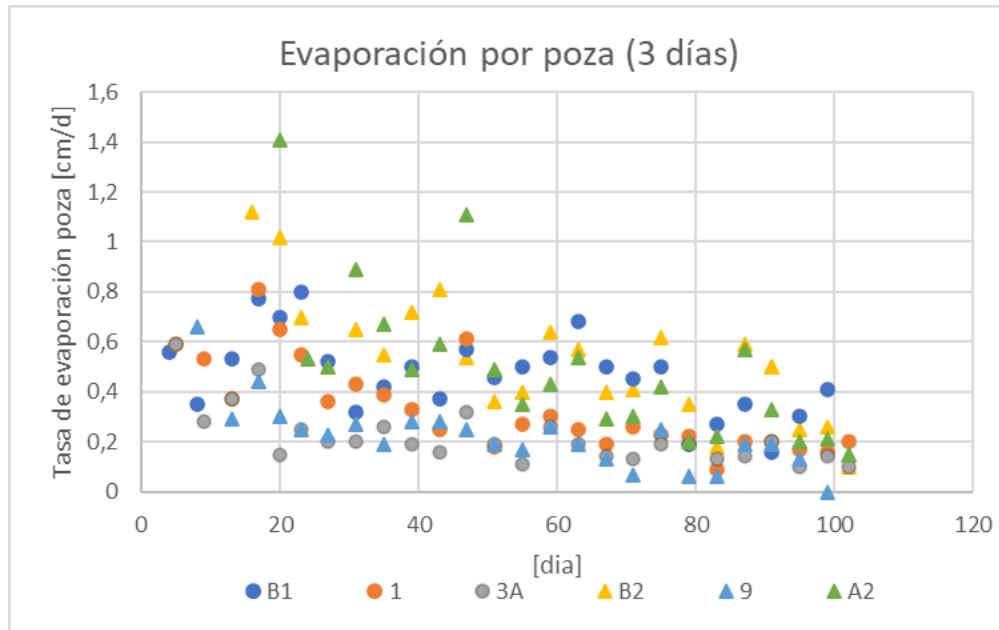


Gráfico 44 Evaporación experimental pozas (3 días)

Se realiza un análisis de las pendientes de las tasas de evaporación experimental, pero con un intervalo de 3 días aproximadamente. En las cuales se considera el promedio de estas en el tiempo mencionado, al igual que se considera los valores meteorológicos de Evaporación, Radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento, como. El inicio del análisis se considera el 2 de Diciembre del 2022, considerando esta misma fecha para los valores meteorológicos y químicos.

Las correlaciones de cada poza de evaporación experimental con respecto al bin solo y los factores meteorológicos, obteniendo la siguiente tabla con resultados,

Tabla 6 Correlación con pozas de evaporación experimental

Correlación	B1	1	3A	B2	9	A2
Temperatura	-0,07	-0,51	-0,62	-0,46	-0,65	-0,71
Radiación	0,27	0,43	0,35	0,42	0,50	0,49
Velocidad viento	0,34	0,36	0,59	0,48	0,53	0,62
Humedad	-0,51	-0,69	-0,33	-0,60	-0,62	-0,55

Observando la tabla 6, se tiene la relación con los diferentes parámetros meteorológicos, los cuales la temperatura y la humedad, poseen una correlación negativa, es decir, que al aumentar la tasa de evaporación estos dos parámetros disminuyen, mientras que la radiación y la velocidad de viento poseen una correlación positiva. Los parámetros no poseen una mejor linealidad con alguna poza en específico, dado que varían uno de una a otra, un mismo parámetro, por lo que nos indica que existe más influencia que afecta el comportamiento en las pozas de evaporación solar, como son el caso de la concentración de los diferentes minerales presentes y de la prestaciones y cristalizaciones de minerales que afecta la evaporación solar.

Finalmente, se posee la tabla 7, en la cual se presenta la correlación que existe entre la evaporación cada una de las pozas con la concentración de nitrato existente. Esta información indica que no existe una relación entre ambos factores, dado que los valores están cercanos a 0, por lo que se recomienda analizar los efectos de otros iones.

Tabla 7 Correlación poza con su concentración

B1	1	3A	B2	9	A2
-0,124	0,257	0,235	0,043	0,139	0,020

Al realizar el mismo procedimiento anterior, pero en el caso de que la tasa de evaporación se obtiene a través de una pendiente de 5 días, la principal diferencia con los resultados mostrados anteriormente radica que varían un poco los valores de correlaciones, pero los promedios se consideran similares, dado que fluctúan en los mismos rangos y direcciones los resultados.

7.4.3 Análisis tasas experimental acumulada

Dentro de los resultados presentados del procedimiento experimental se presentan las tasas de evaporación de cada isocontenedor, las cuales se analizan en función del modelo de redes neuronales con 7 parámetros, no encontrando alguna relación entre ellos, es por lo que se utiliza la tasa de evaporación acumulada para el análisis.

Con las tasas de evaporación acumulada se analiza junto con la tasa de evaporación del modelo de redes neuronales con 7 parámetros, realizando en cada caso una estimación que se presenta dentro de cada figura a continuación,

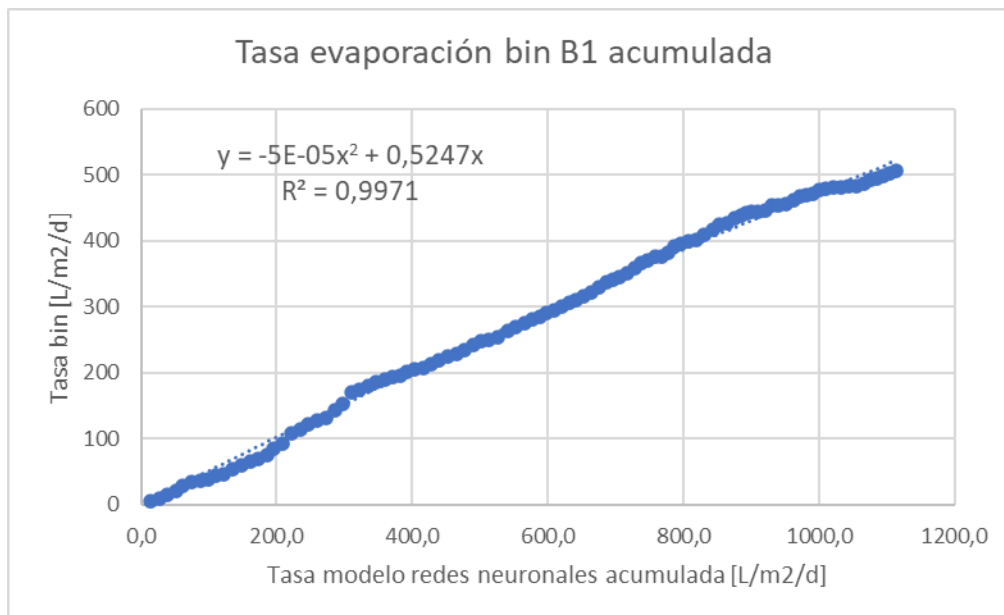


Gráfico 45 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (B1)

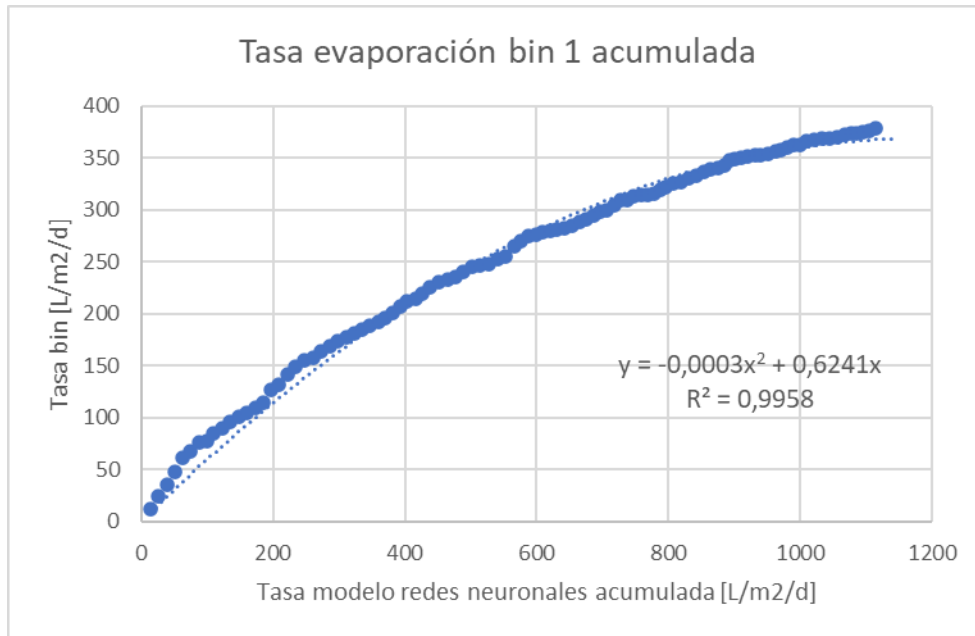


Gráfico 46 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (1)

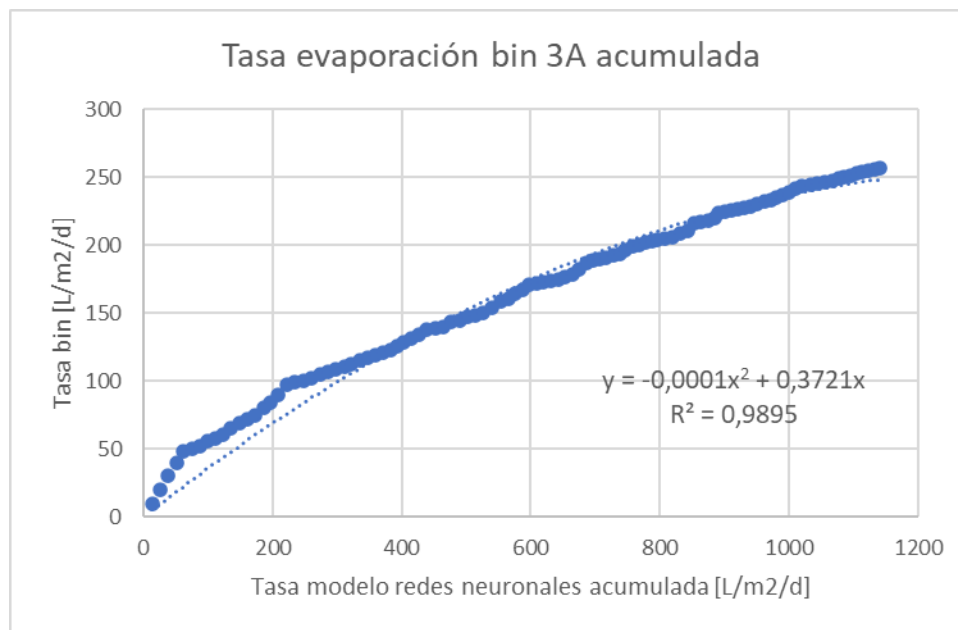


Gráfico 47 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (3A)

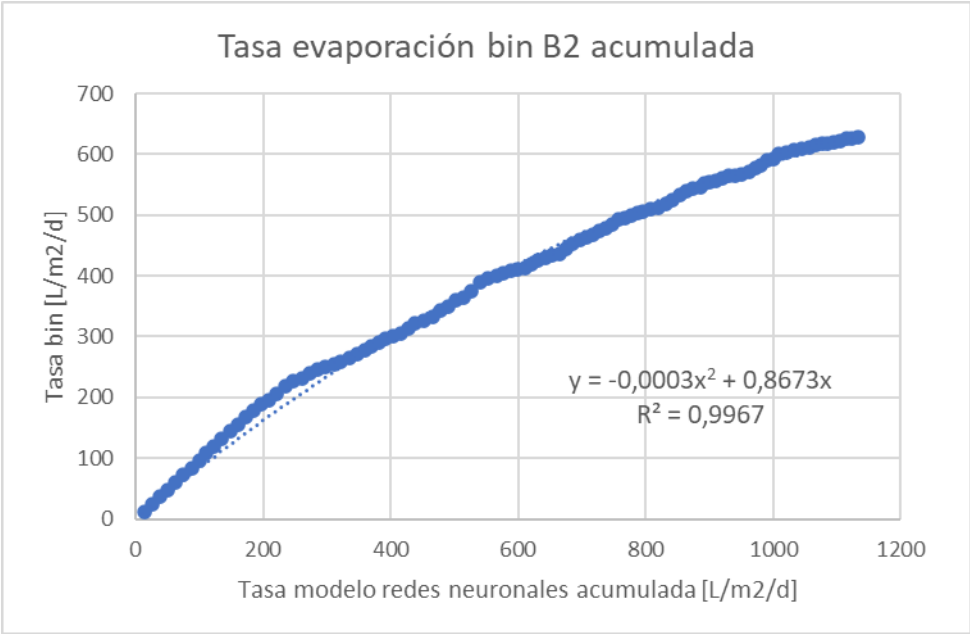


Gráfico 48 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (B2)

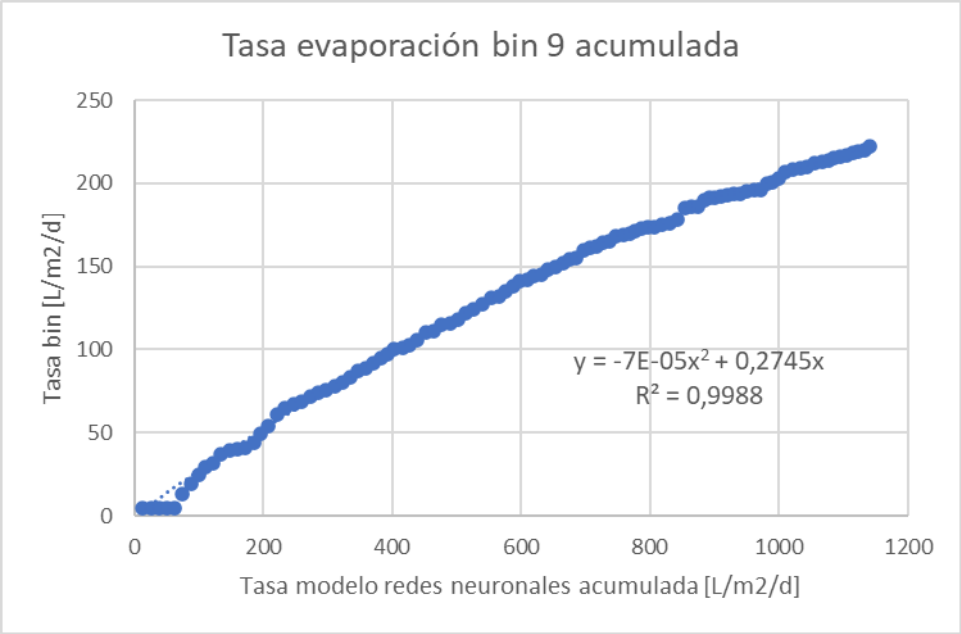


Gráfico 49 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (9)

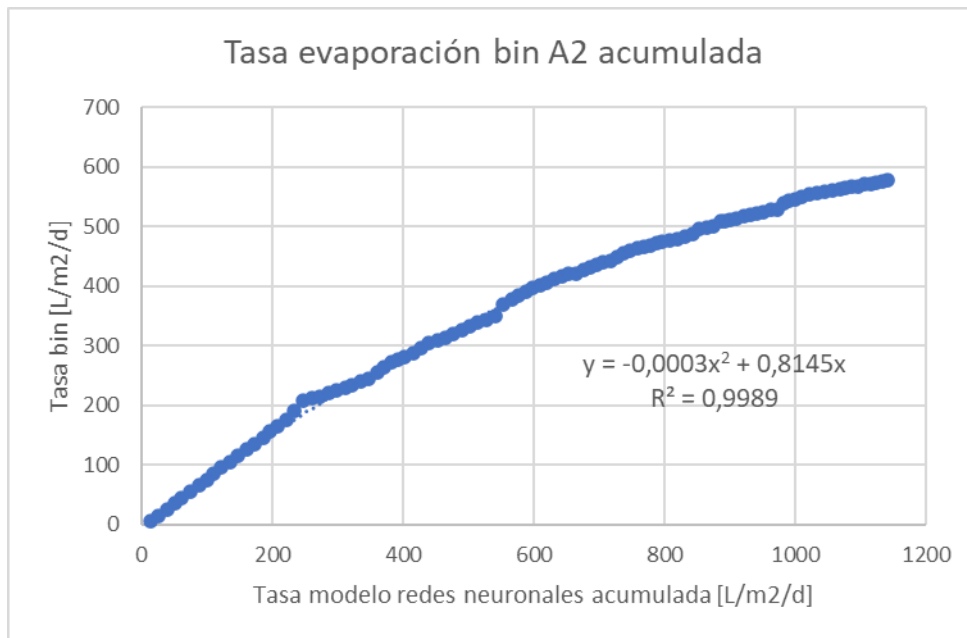


Gráfico 50 Tasa de evaporación acumulada bin y modelo de redes 7 parámetros (A2)

Con respecto a los resultados obtenidos, se tiene que los otros 6 bines, poseen un ajuste polinómico de grado 2, encontrándose la ecuación que lo representa integrada en la imagen correspondiente.

Para la predicción de los modelos, se realiza un ajuste lineal a la curva de tasa de evaporación modelo redes 7 parámetros acumulado y la tasa de evaporación de la poza acumulada, que pase por el punto de origen y que involucre los primero 7 parámetros, con ello es posible identificar el valor de la tasa siguiente, para luego continuar con los 7 siguientes parámetros para la aproximación del siguiente día y así sucesivamente.

7.5 Tasas de evaporación acumulada y [NO3]

Se realiza un análisis de la tasa de evaporación experimental acumulada de cada poza con la concentración de nitratos en la solución, esto con el objetivo de estimar el tiempo de cosecha en función de la concentración. El valor de esta tasa es la obtenida a través del procedimiento experimental en el cual se obtuvieron los valores de tasa de evaporación para seis pozas con diferentes concentraciones.

Se debe tener en cuenta que para que una poza esté lista para la cosecha se debe tener una concentración de nitrato de alrededor de ~400 a ~500 [g/L]. Dado que el análisis químico no se llevó a cabo durante todo el periodo de análisis, se realiza una estimación exponencial del comportamiento de la concentración en cada poza y en casos en la tasa de evaporación.

En primer lugar, se presentan los análisis del tren de PDV, gráficos 51, 52 y 53, en donde se destaca que los tiempos de obtención la concentración deseada no sobrepasa los 160 días. En la poza B1 se necesita evaporar app 1400 [cm/d] acumulado, es decir, alrededor de 8,8 [cm] diarios para obtener la concentración deseada en el tiempo estimado. En cambio, en las otras dos pozas, la evaporación diaria corresponde aproximadamente de 3,5 [cm] y 2,6 [cm], respectivamente.

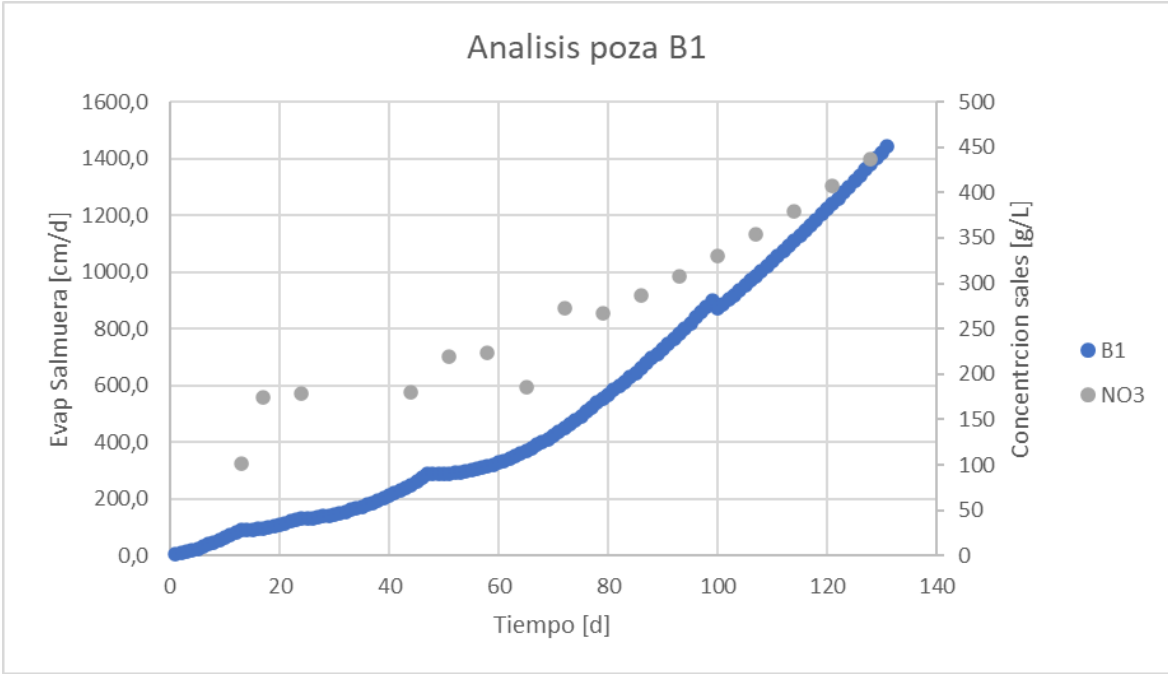


Gráfico 51 análisis poza B1

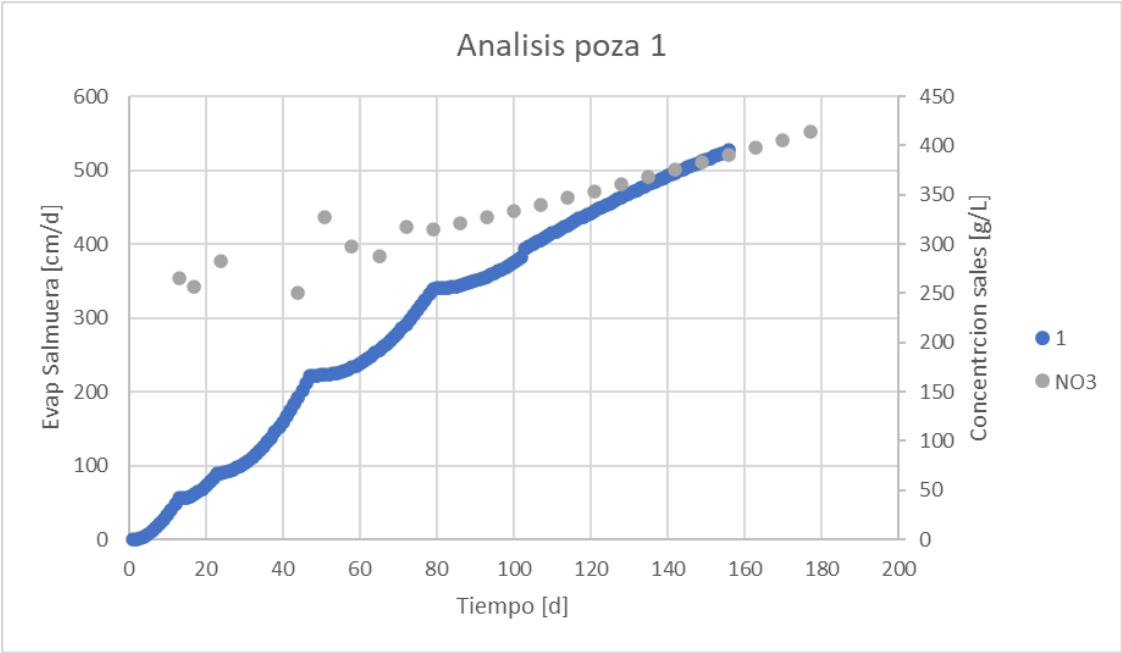


Gráfico 52 análisis poza 1

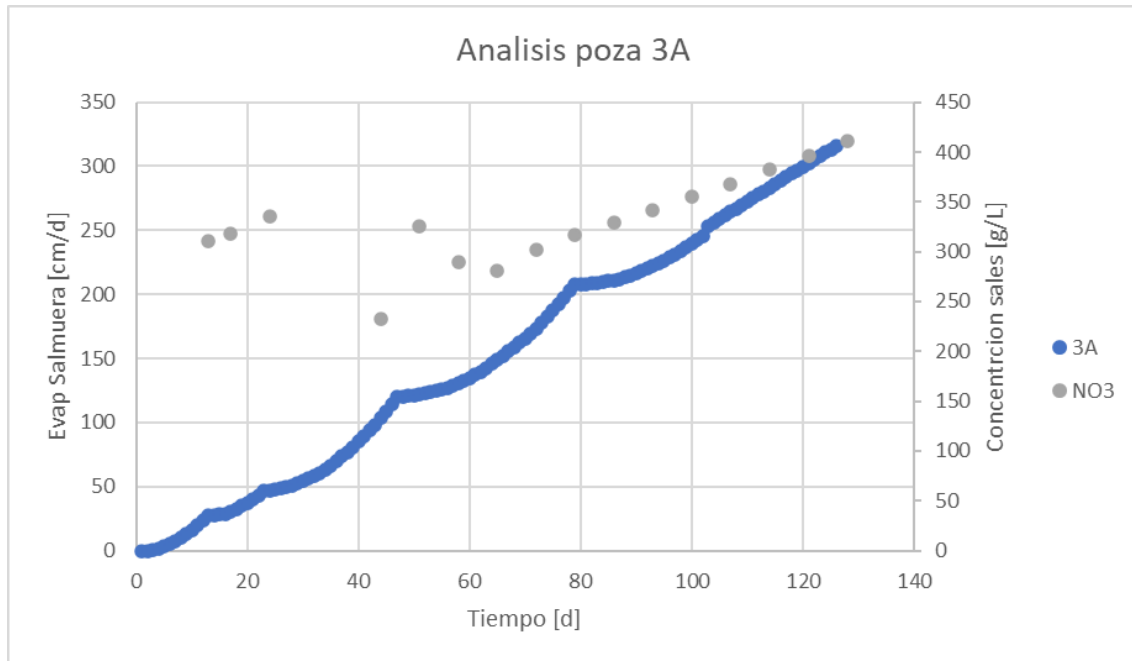


Gráfico 53 análisis poza 3A

En el caso de las pozas del tren de MLK los resultados obtenidos son diferentes, dado que se toma más tiempo en poder concentrar a la concentración deseada de nitratos. Se ejemplifica en los gráficos a continuación presentes;

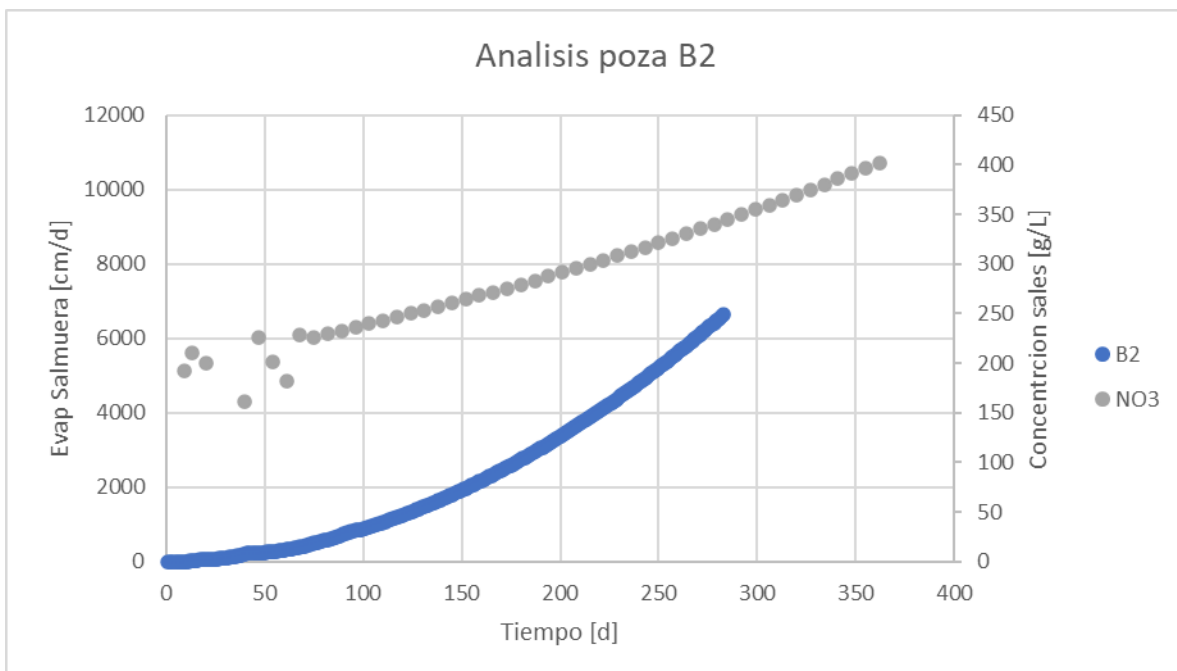


Gráfico 54 análisis poza B2

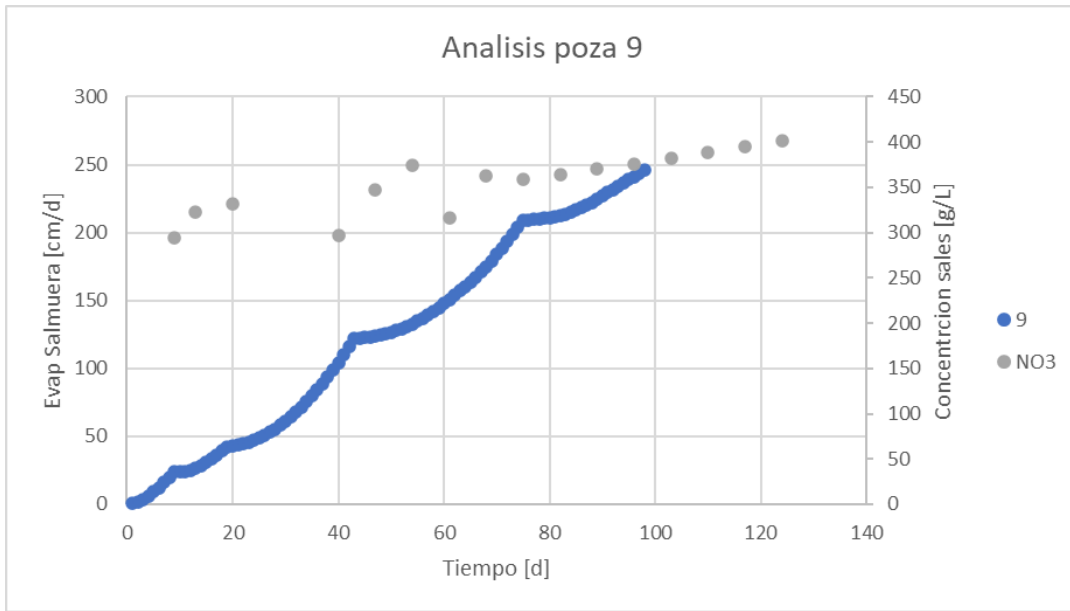


Gráfico 55 análisis poza 9

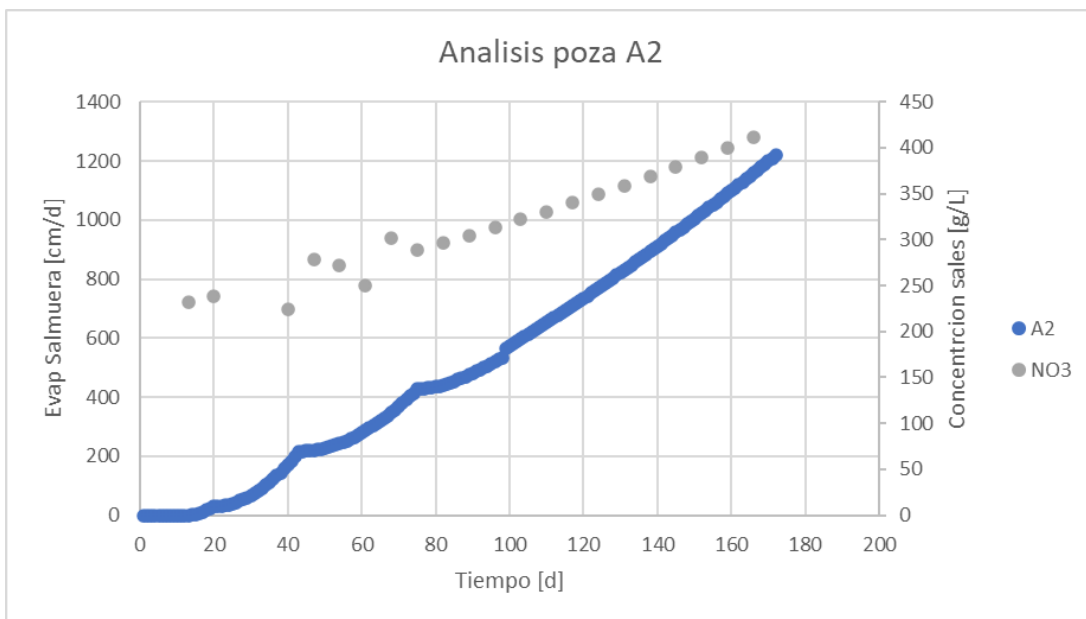


Gráfico 56 análisis poza A2

Al observar los gráficos 54, 55 y 56, se aprecia que los tiempos para alcanzar la concentración deseada son mayores que en el caso del tren de PDV, siendo tiempos corresponden a 350, 120 y 160 [d] aproximadamente, con una tasa estimada de evaporación diaria de 29 [cm], 2,6[cm] y 7,5 [cm] diarios.

7.6 Análisis de tiempo de cosecha

Se analiza el tiempo en el cual la solución alcanzan la concentración de ~ 400 [g/L], se considera para el análisis desde el día 14 de Diciembre del 2022, fecha en la cual se inicia la toma de datos de la química y se utiliza los modelos de Redes neuronales (con 3 parámetros), Penman (actual) y mediante el Evaporímetro. Con el objetivo de verificar teóricamente el tiempo en que la solución evapora cierta concentración de agua, según la poza a analizar.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación,

Tabla 8 Días necesario para alcanzar la concentración teórica de nitrato

Necesito evaporar [L/m²/d]	1121	506	334	780	630	398
Poza/Modelo	B1	1	3A	B2	A2	9
Penman[d]	87	46	35	64	54	39
Evaporímetro[d]	>108	53	39	79	65	44
RN3[d]	>108	54	40	79	66	45

En la tabla 8 se presenta en primer lugar la evaporación acumulada que debo alcanzar para obtener la concentración que deseo, esto para cada poza de análisis, en todos los casos la concentración inicial corresponde a la registrada en la química.

De lo anterior se obtiene que en todos los casos el modelo de Penman, teóricamente, necesita de menos días, en comparación del Evaporímetro para concentrar, por lo que se está subestimando el valor a evaporar, dado que en la realidad se necesitan más tiempo para poder evaporar esa cantidad de agua. En cambio, el modelo propuesto de redes neuronales, el tiempo es cercano a la lo estimado por el Evaporímetro, por lo que podría corresponder a una buena aproximación.

También se observa que la solución al estar menos concentrada requiere de más cantidad de agua a evaporar, mientras que, al estar en una poza más concentrada, corresponde a menos cantidad, y por ende se requiere de menos tiempo.

Finalmente, se realiza un análisis para estimar el tiempo mínimo en la cual la poza podría alcanzar la concentración para la cosecha, es por lo que se utiliza para el análisis los métodos de Evaporímetro, Penman, Penman Ajustado, Priestley y Taylor, Priestley y Taylor ajustados y Redes neuronales.

Para el caso de la concentración de nitrato en cada poza, se realiza una aproximación lineal, para obtener el tiempo necesario a utilizar. Solo se considera una poza, representativa, por tren para este análisis.

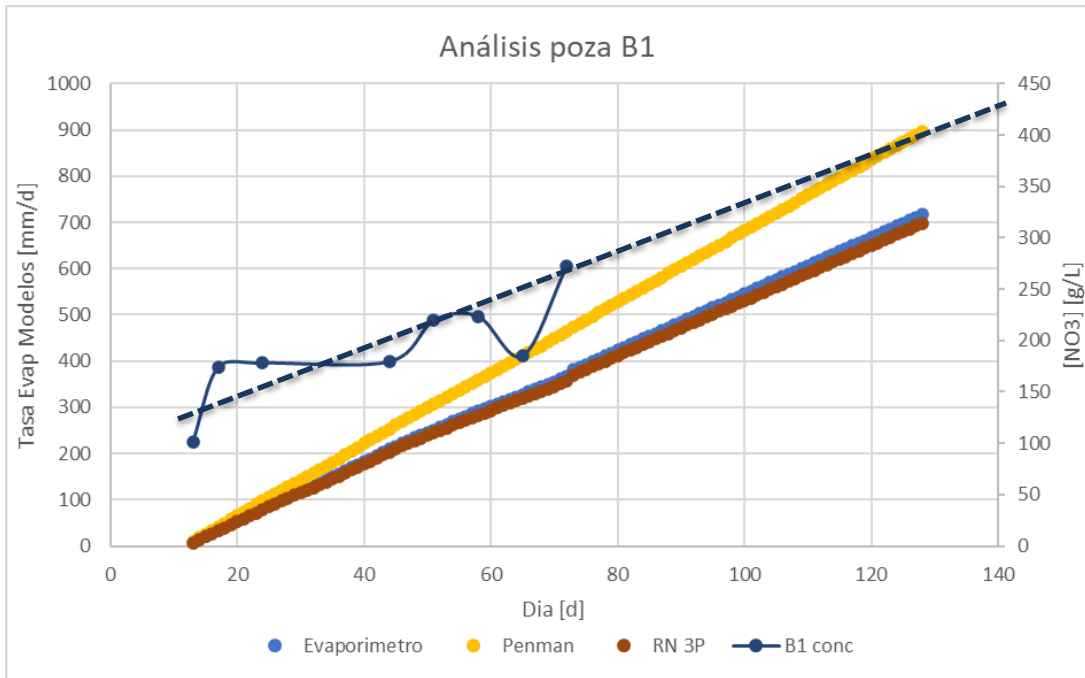


Gráfico 57 Análisis Poza B1



Gráfico 58 Análisis Poza B2

De los gráficos anteriores se es posible estimar que el tiempo mínimo de concentración y de análisis a realizar corresponde entre 120 y 160 [d], en la mayor parte de los casos.

7.7 Análisis de concentración química en la tasa de evaporación

Se desarrolla un análisis con las concentraciones químicas, las cuales permite obtener nuevas correlaciones matemática, para el cálculo de la tasa de evaporación de la salmuera a partir de la tasa de evaporación matemática y las concentraciones de ciertos iones.

Se desarrolla a partir de correlaciones lineales las cuales relaciones los iones para obtener la ecuación. Esto se realiza con las concentraciones y tasas totales de todas las muestras y por separados según el tren de evaporación que pertenece, PDV o MLK. Los resultados obtenidos fueron evaluados según la tasa de evaporación de la salmuera experimental, perteneciente a cada bin y del día evaluado, cabe mencionar que el análisis químico se realiza cada 7 días.

También se desarrolla una ecuación que involucra los iones de magnesio y de nitrato y la actividad del agua en función de estos mismos iones, que corresponde a la ley de Debye-Hückel limitada, utilizando las siguientes expresiones, (Wiley, 2007)

$$I = \frac{1}{2} \cdot \sum m_i \cdot Z_i^2$$

Donde;

I, corresponde a la fuerza iónica

m, la concentración del elemento i [mol/L]

z, carga del elemento i

por lo que para el cálculo del coeficiente de actividad viene dado por,

$$\log_{10} \gamma = -A \cdot z_j^2 \cdot \frac{\sqrt{I}}{1 + B \cdot a_0 \cdot \sqrt{I}}$$

Donde ,

a_0 , representa la distancia de aproximación más cercana a los iones

A y B, parámetros definidos como 0,51 [mol^{-1/2} dm^{3/2}] y 3,29 nm⁻¹mol^{-1/2}dm^{3/2}

Los resultados obtenidos, están expresados en las tablas 10,11,12, en la sección de anexos. En ellas también se encuentran un porcentaje de error, el cual corresponde al porcentaje del resultado obtenido utilizando la correlación y la tasa de evaporación de evaporación experimental.

Se realiza de forma separada igualmente, dado que se obtienen diferentes resultados, por la diferencia de concentraciones entre las pozas de los trenes. Con respecto a los resultados obtenidos en general las ecuaciones que poseen menos diferencia porcentual corresponden a las que involucran; [NO3] y [SO4]; [NO3], [Mg] y [SO4], ambas ecuaciones poseen un error del 31%. En el caso del tren de MLK las ecuaciones con menor porcentaje involucran los iones; [Mg], [NO3], γ_{Mg} , γ_{NO3} ; [NO3], [Mg], [SO4], [K] y [Na], la primera es la ecuación que involucra la actividad del agua con una diferencia del 20%, y la segunda es la que involucra todos los iones analizados con una diferencia porcentual del 21%. Por último, se posee el tren de PDV, en donde nuevamente la ecuación que involucra todos los iones analizados, [NO3], [Mg], [SO4], [K] y [Na], posee un menor porcentaje, en este caso de 26%.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 CONCLUSIONES

Al relacionar los datos climatológicos pertenecientes al año 2022, se obtiene que el horario de entre las 12 y 14 hrs, es cuando existe una mejor condición climática para la evaporación. También se obtuvo que la radiación es el parámetro más influyente en los modelos de Penman y Priestley y Taylor, con una correlación de 0,90 y 0,97, respectivamente.

De los modelos fenomenológicos de investigados; Penman (se utiliza actualmente), de Bruine, Priestley y Taylor y Balance, fueron validándolos con los datos meteorológicos de 365 días. Del análisis existe una desviación estándar de 2,11, tanto como para el modelo de Priestley y Taylor y el modelo de Penman, ambas en función de la tasa del evaporímetro. Siendo ambos corregidos disminuyendo esta desviación a 0,92 y 1,10, respectivamente, así existiendo una mejor predicción de la tasa de evaporación del agua. Los errores de predicción obtenidos de los modelos fenomenológico y el evaporímetro varían desde 19% a 100%, que luego de rectificar los modelos Penman (5 parámetros meteorológicos) y Priestley y Taylor se logró disminuir a un error de predicción de 10% y 8%, respectivamente. Al usar un modelo basado en redes neuronales considerando 3 parámetros meteorológicos, logrando un error de estimación 6% y un 3% al utilizar un modelo de redes con 7 parámetros meteorológicos.

Se desarrolló un diseño experimental piloto para el análisis de la tasa de evaporación experimental de 6 bins los cuales poseían salmuera de proceso de la etapa de concentración. Donde los iones que se encuentran en mayor concentración corresponden a [Mg], [SO₄], [NO₃], [Na], [Cl] y [K] en [g/L]. Por lo que se desarrolló modelos que involucren la química en el cálculo de la tasa de evaporación de la salmuera, matemáticos y relacionado con la actividad del agua. Entre los modelos matemáticos, los errores propuestos están en un rango del 31% hasta un 44%, mientras que el modelo actual posee un error 67%, en comparación del valor de la tasa de evaporación de salmuera experimental. No existe un modelo actualmente que encaje perfectamente en estimar la tasa de evaporación de la salmuera, ya que las salmueras poseen diferentes concentraciones que influyen en el cálculo final.

Se evalúa el tiempo de cosecha, en función de la concentración de nitrato y las tasas de evaporación de los modelos fenomenológicos y de redes neuronales acumulado, de lo que obtiene que se debe realizar como mínimo 120 días de análisis y toma de datos. Al realizar un análisis teórico del tiempo de los modelos de Penman, evaporímetro y Redes neuronales (3 parámetros), se concluye que el modelo de Penman, requiere de 10 a 20 días menos para evaporar en comparación de los modelos anteriores, por lo que se indica que existe un error en la estimación y en la predicción de cosecha.

Se logra predecir la tasa de evaporación de cada bin (utilizando modelo de redes neuronales de 3 parámetros), por lo que se debe tener 7 días para poder realizar el análisis y la predicción de los factores meteorológicos, asociados a la temperatura y radiación. Teniendo un error asociado entre 30% a 60%.

Finalmente, no existe un modelo fenomenológico que prediga el comportamiento de la tasa de evaporación de la salmuera, se debe ajustar y aplicar ecuaciones según la concentración de la salmuera. Pero si se encontró es un modelo, utilizando las redes neuronales, con un error asociado al 6%, que mejora la certeza del tiempo de cosecha, y adicionalmente se puede hacer una predicción futura de la tasa de evaporación usando el forecast de la radiación y temperatura máxima y promedio.

8.2 RECOMENDACIONES

Dentro del trabajo realizado surgieron nuevos temas de análisis, los cuales permiten desarrollar una minimización del margen de error obtenido, entre ellos se encuentran:

- Ajustar en rangos donde de donde la ecuación química actual de Coya Sur es válida.
- Evaluar los modelos químicos planteados linealmente, ahora con potencias e identificar los rangos de concentración de los iones en donde se valida la ecuación.
- En la parte experimental, analizar químicamente ambos bin de una solución, dado que puede tener un efecto en la química al mezclarlo, ya que la evaporación es diferente cuando la solución está en el tope y en la mitad del bin. También observar el comportamiento del bin sin reposición, para ver el efecto de la concentración. Y el efecto costra que se produjo
- Para tener un mejor análisis de las pendientes es recomendable tener un análisis de al menos 120 días, para ver a más detalles la relación entre pendientes, parámetros meteorológicos y químicos.
- Análisis exhaustivo entre la predicción obtenida y la real de la tasa de evaporación de cada isocontenedor, para obtener un menor margen de error en la predicción.

REFERENCIAS

- Ben Mansour, R., Tam Nguyen, C., & Galanis, N. (2005). *Transient heat and mass transfer and long-term stability of a salt-gradient solar pond*. Canada.
- Cedar Lake Ventures, Inc. (2023). *weatherspark*. Obtenido de <https://weatherspark.com/y/27338/Average-Weather-in-Calama-Chile-Year-Round>
- : Carmona, F. R. (2019). *Evaporation process study through in situ and remote sensing data at Tres Quebradas Salt fla*. Obtenido de Revista de Teledetección, 54, 1-14: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/138442/Carmona%3BRivas%3BFarami%C3%B1%C3%A1n%20-%20Estudio%20del%20proceso%20de%20evaporaci%C3%B3n%20en%20el%20Salar%20Tres%20Quebradas%20por%20medio....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Akbarzadeh , A., & Andrews, J. (2023). *School of Aerospace, Mechanical and Manufacturing Engineering*. Obtenido de <http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e6-106-08.pdf>
- CHANDÍA VENEGAS, F. A. (2022). *REMOCIÓN DE MAGNESIO PROVENIENTE DE POZAS DE EVAPORACIÓN SOLAR DE NITRATO MEDIANTE PRECIPITACIÓN CON ÁCIDO OXÁLICO*. SANTIAGO.
- EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN. (s.f.). Obtenido de HIDROLOGÍA I: CICLO HIDROLÓGICO: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%204.pdf
- EVAPORACIÓN Y TRANSPIRACIÓN. EVAPOTRANSPIRACIÓN . (2013). Obtenido de HIDROLOGÍA I: CICLO HIDROLÓGICO: http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%204.pdf
- Explorador solar*. (2023). Obtenido de <https://solar.minenergia.cl/exploracion>
- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1998). *Crop evapotranspiration*. Obtenido de Guidelines for computing crop water requirements: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e07.htm#chapter%203%20%20%20meteorological%20data>
- García , L., Mollegas, Y., Ascanio, C., Lopez, C., & Gonzalez, E. (2015). *Evaporación del agua en superficies libres*. Obtenido de https://issuu.com/luisandragarcia/docs/evaporaci__n_desde_superficies_libr
- Ide, F. (1978). *Cubicación del yacimiento salar de Atacama. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas*. Santiago.
- Mangussi, M. J. (Mayo de 1985). *POZAS SOLARES SATURADAS*. Obtenido de <https://www.cnea.gob.ar/nuclea/bitstream/handle/10665/1295/008507.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Molina Martínez, J. M., Martínez Álvarez, V., Baille, A., & González Real, M. M. (2003). *Estimación de la evaporación en embalses de riego mediante un modelo de balance de energía*.
- NARVÁEZ DÍAZ, N. A. (2019). *EVALUACIÓN DE DISEÑOS PARA UNA POZA SOLAR EXPERIMENTAL: SELECCIÓN DE FORMA Y DIMENSIONES*. Santiago.
- Perez Barriga, A. E. (2020). *Evaluación de modelos para estimar evaporación en cuerpos de agua, caso de estudio: Lago Laja*. Chillán.
- Priestley, C., & Taylor, R. (1972). *On the assessment of surface heat flux and Evaporation using large scale parameters*.
- Rice University. (2023). *Propiedades coligativas*. Obtenido de <https://openstax.org/books/qu%C3%ADmica-2ed/pages/11-4-propiedades-coligativas>
- RUBIO ESPINOZA, M. J. (2012). *MODELAMIENTO DE LA TASA DE EVAPORACIÓN DE UNA POZA SOLAR*. Santiago.
- SQM. (2023). *Manual Pozas*.

SQM S.A. (23 de Mayo de 2023). *Procesos de producción*. Obtenido de https://www.sqm.com/acerca-de-sqm/recursos-naturales/proceso-de-produccion/#nitratos__tab

Valenzuela Vergara, C. (2019). *Aumento de Tasa de Evaporación en Pozas de Salmuera de Litio*. Obtenido de <https://repositorio.udla.cl/xmlui/bitstream/handle/udla/263/a41718.pdf?sequence=1>

ANEXOS

ANEXO 1: GLOSARIO

Tabla 9 Glosario

A	Área del embalse [m ²]
C_p	Calor específico del aire [J/kg K]
E_a	Poder evaporante del aire en función del viento y del gradiente de la presión del vapor [mm/d]
Ev	Tasa de evaporación [mm/d]
Ev_p	Tasa de evaporación potencial [mm/d]
e	Valor medio de la presión parcial del vapor de agua [kPa]
e_a	Presión de vapor actual a la temperatura del aire [mb]
e_s	Presión de vapor saturado a la temperatura del aire [mb] / [kPa]
e*(T_a)	Presión de vapor de saturación [kPa]
f(U)	Función del viento de Penman [mm/d]
G	Flujo de calor en el suelo [W/m ²]
H	Flujo de calor sensible [W/m ²]
h_v	Coefficiente de transferencia de vapor de agua en [W/m ² °C]
K_m	Coefficiente de difusión turbulenta de momentum[-]
K_w	Coefficiente de difusión turbulenta de masa[-]
k	Constante de von Karman, para la cual generalmente se adopta el valor 0,4 [-]
ks	Coefficiente de salinidad [-]
L_v	Calor latente de vaporización [J/kg]
ṁ_v	Flujo de vapor
N	Número máximo de horas de brillo solar, en función de la latitud del lugar
n	Número de horas de brillo solar, obtenido de los heliógrafos
P_{atm}	Presión atmosférica
qv	Humedad específica
Rn	Radiación neta en [Wm ⁻²],
R_o	Radiación solar diaria, [cal/cm ² d], estimada en función de la latitud y época del año
Rs	Radiación solar entrante (onda corta) [W/m ²]
rah	Resistencia aerodinámica al transporte de calor [s/m]
T_a	Temperatura del aire
T_i	Temperatura del aire en el momento i [°C]
T_{i-1}	Temperatura del aire en el momento i-1 [°C]
T_s	Temperatura del suelo [°K]
U	Humedad relativa media [%]
u	Velocidad del viento en [m/s]
u₂	Velocidad del viento a 2m en [m/s]
Z	Rugosidad
z0	Altura de las asperezas que puede considerarse como el punto en que la velocidad es nula.

z_0	Longitud de rugosidad
α	Constante derivada empíricamente de Priestley y Taylor 1,26 [-]
α'	Albedo de onda corta
γ	Constante psicrométrica dependiente de la temperatura y presión atmosférica [Pa/°C] [kPa]
Δ	Constante psicrométrica [kPa/K] / [Pa/°C]
ϵ_{ac}	Emisividad del cielo despejado [-]
ϵ_s	Emisividad de la superficie terrestre [-]
λ	Calor latente de vaporización [MJ/kg]
σ	Constante de Stefan-Boltzman a $1,19 \times 10^{-7}$ [cal/cm ² d]
ρ_a	Densidad del aire [kg/m ³]

ANEXO 2: RELACIÓN ENTRE VARIABLES METEOROLOGICAS

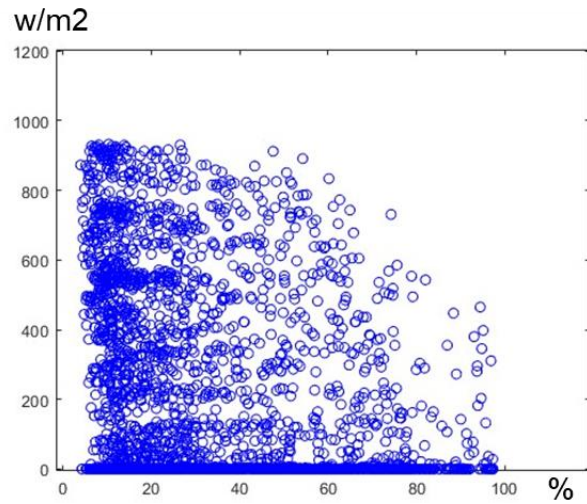


Gráfico 59 Hum vs Rad 01 a 11 hrs

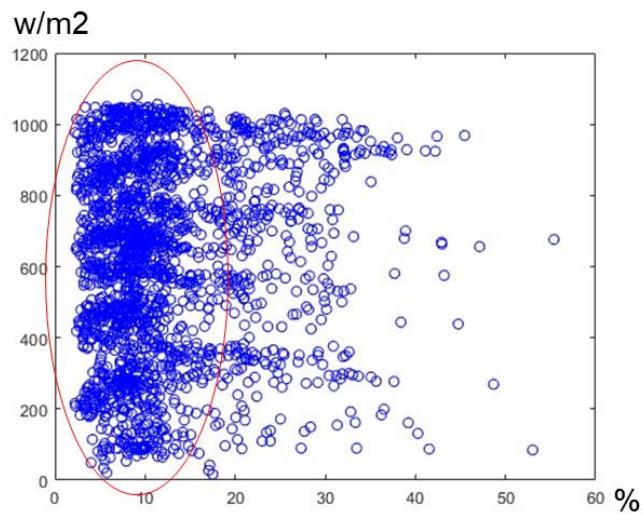


Gráfico 60 Hum vs Rad 12 a 18 hrs

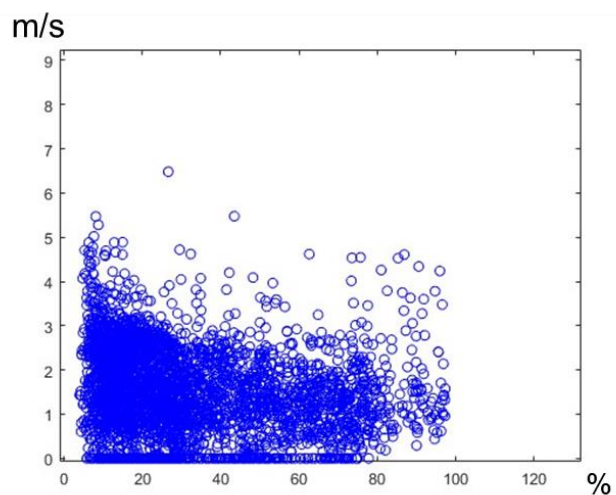
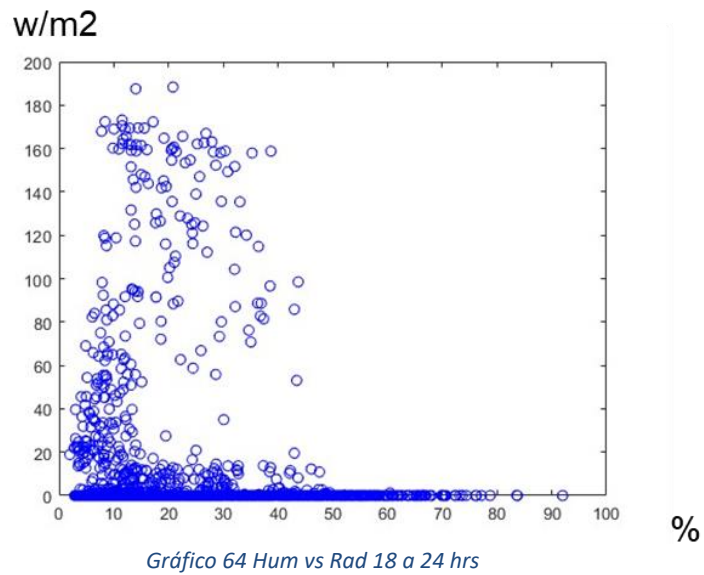
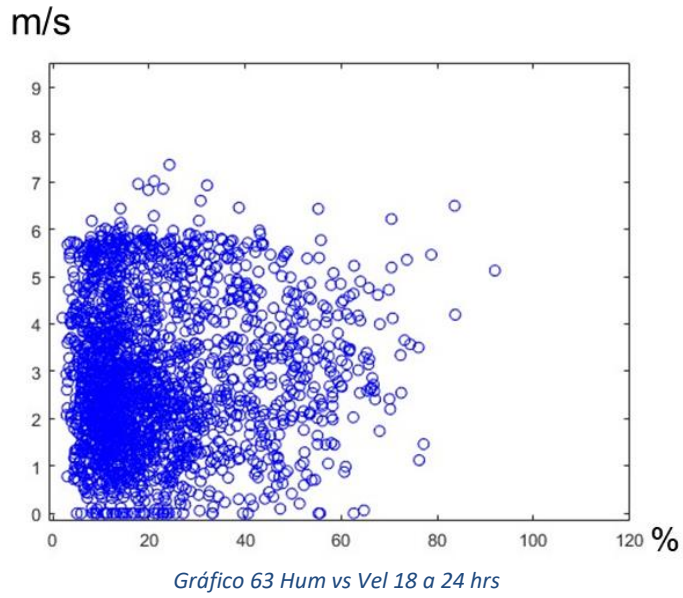
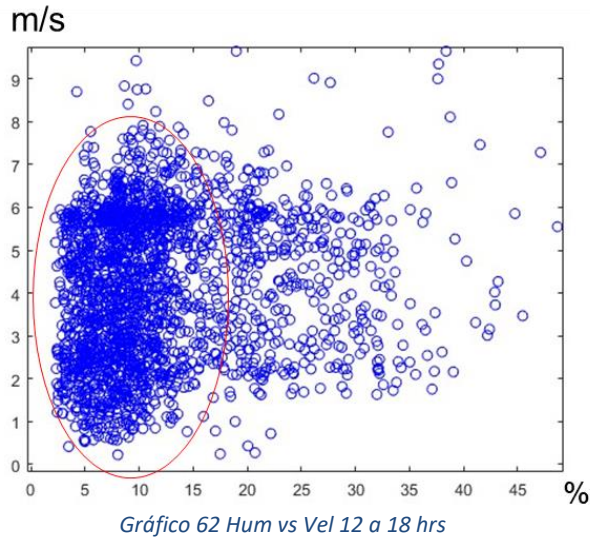


Gráfico 61 Hum vs Vel 01 a 12 hrs



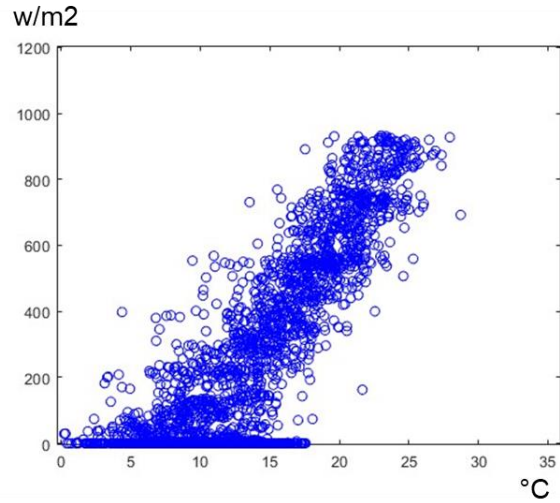


Gráfico 65 Tem vs rad 01 a 11 hrs

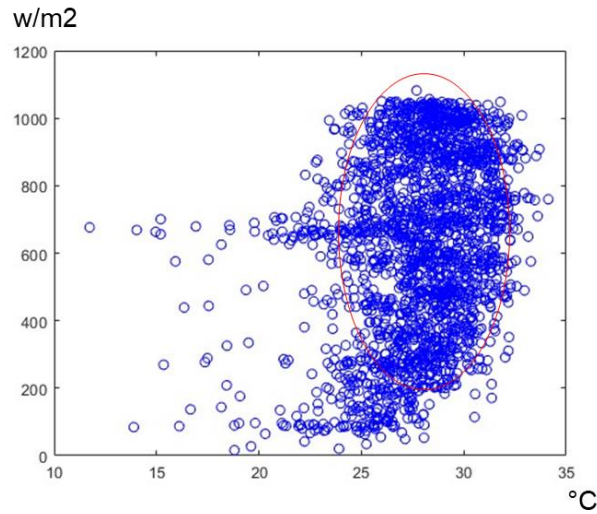


Gráfico 66 Tem vs rad 12 a 18 hrs

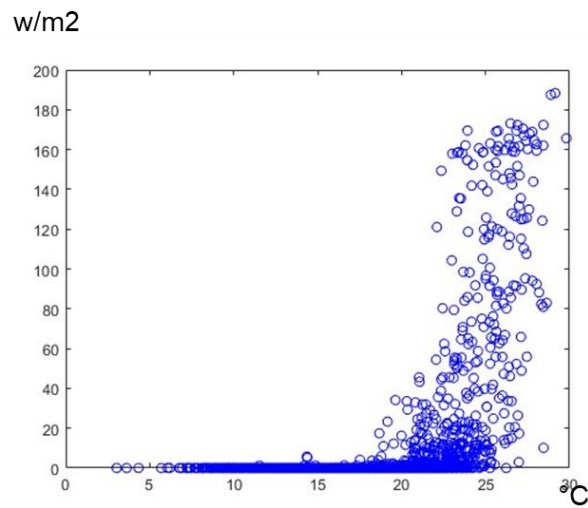


Gráfico 67 Tem vs rad 18 a 24 hrs

ANEXO 3: PENDIENTES EXPERIMENTALES BINES (CADA 3 DIAS)

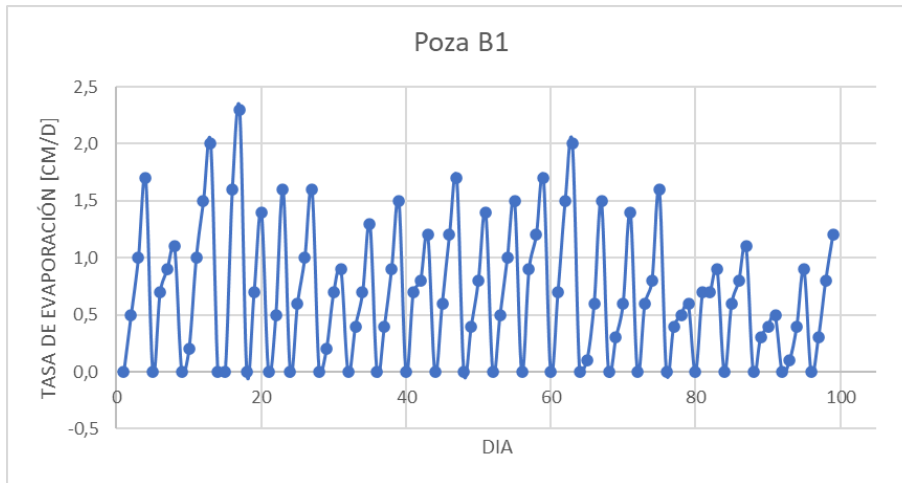


Gráfico 68 Pendientes experimental bin B1

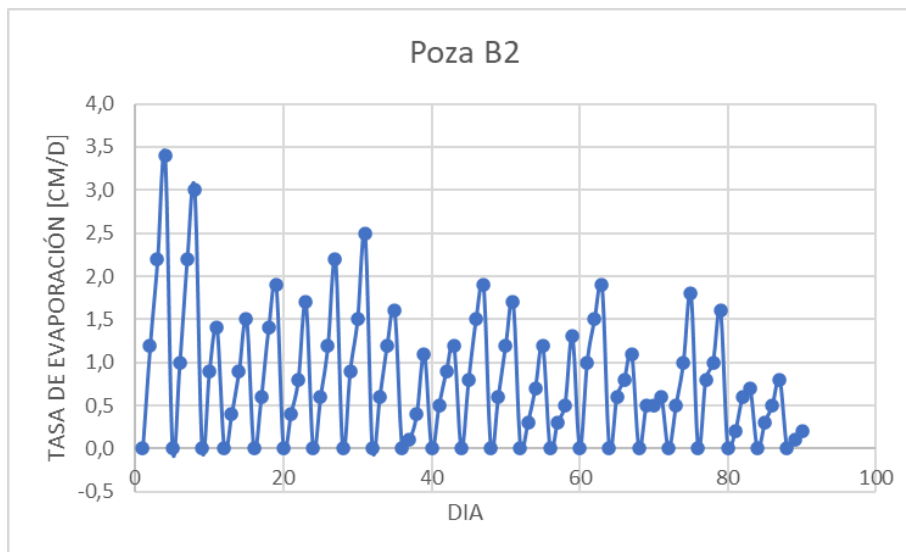


Gráfico 69 Pendientes experimental bin B2

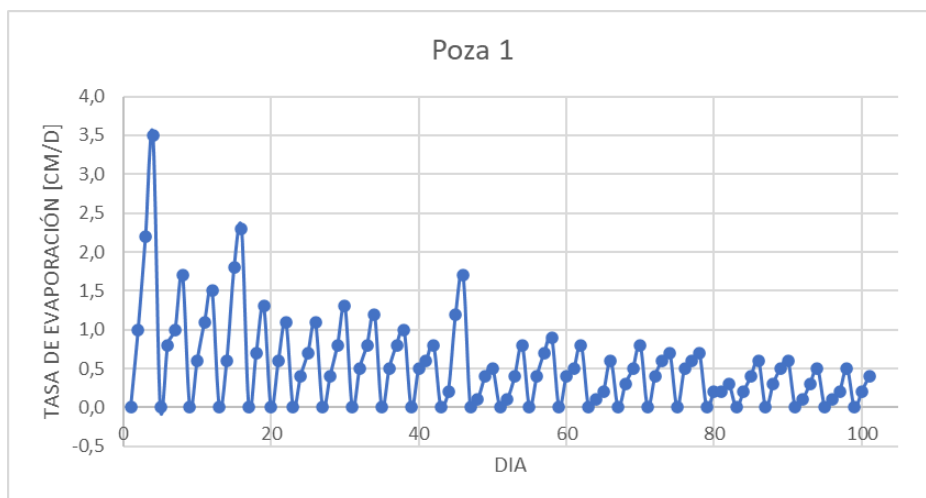


Gráfico 70 Pendientes experimental bin 1

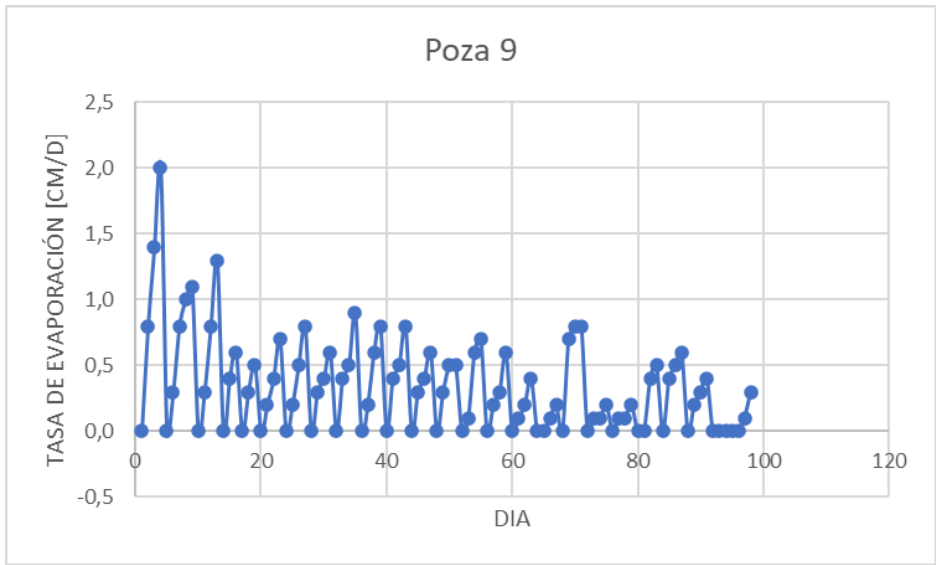


Gráfico 71 Pendientes experimental bin 9

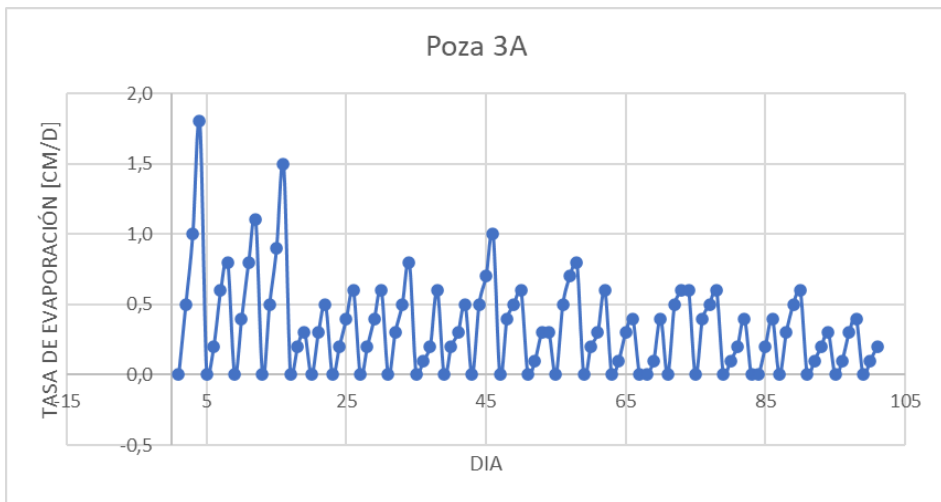


Gráfico 72 Pendientes experimental bin 3A

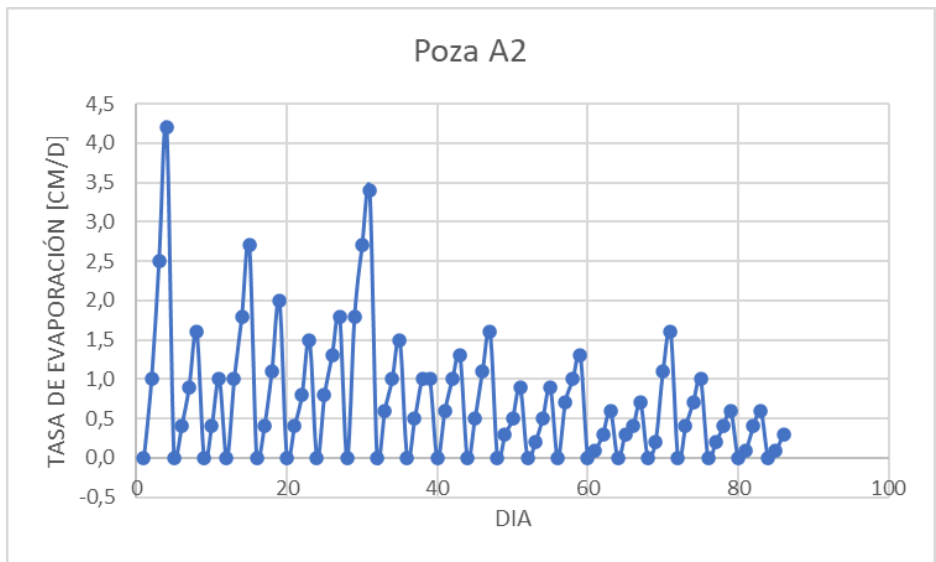


Figura 16 Pendientes experimental bin A2

ANEXO 4: MODELOS FENOMENOLOGICOS

Penman

Se define la tasa de evaporación desde la superficie, que se presenta la ecuación (7)

$$Ev = Ev_p \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (7)$$

De la ecuación (7) se tiene el parámetro Ev_p , que corresponde a la evaporación potencial. Se propone utilizar la expresión simplificada del balance de energía considerando los efectos ambientales α ,

$$Ev_p = \left[\alpha \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) Rn \right] \cdot f_c^{-1} \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (9)$$

α es un parámetro. En este factor se considera el efecto aerodinámico del proceso de la evaporación como proporción del término radiactivo (Rn), dado que las condiciones climáticas varían temporalmente, al igual que este parámetro. La ecuación (11) corresponde al cálculo de la Evapotranspiración de referencia, ET_o .

$$\alpha = \frac{ET_o}{Ev_{eq}} = \frac{ET_o}{\left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot Rn \cdot f_c^{-1}} \quad [-] \quad (10)$$

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 u_2)} \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (11)$$

Luego, se presentan definiciones importantes que se deben tener en cuenta para el cálculo de los parámetros mencionados anteriormente, que corresponden;

- Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor saturado como función de la temperatura media del aire, se calcula a partir de la ecuación (12)

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T_a + 237,3)^2} \left[\frac{kPa}{^\circ C} \right] \quad (12)$$

- e_s es la presión de vapor saturado del aire, y e_a corresponde a la presión de vapor a la temperatura del aire que se puede obtener mediante las siguientes expresiones respectivamente,

$$e_s = 0,6108 \cdot \text{Exp} \left[\frac{17,27 \cdot T_a}{T_a + 237,3} \right] [kPa] \quad (13)$$

$$e_a = \frac{es(T_{min}) \cdot \frac{HR_{max}}{100} + es(T_{max}) \cdot \frac{HR_{min}}{100}}{2} [kPa] \quad (14)$$

- Rn es la radiación neta, esta es obtenida a partir de la siguiente expresión,

$$Rn = \frac{Q_s \cdot 86400}{10^6 \cdot (1 - \alpha)} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (15)$$

- γ es la constante psicrométrica [kPa], que se obtienen de la ecuación presente a continuación,

$$\gamma = \frac{C_{p,a} \cdot P_{atm}}{\varepsilon \cdot \lambda} \left[\frac{kPa}{^\circ C} \right] \quad (16)$$

- $C_{p,a}$, calor específico del aire, el cual puede ser obtenido mediante la siguiente expresión

$$C_{p,a} = 0,001005 \cdot \left(1 - 0,84 \cdot \frac{0,622 \cdot P_a}{P_{atm} - 0,378 \cdot P_a} \right) \left[\frac{MJ}{kg \cdot ^\circ C} \right] \quad (17)$$

- se define el calor latente de vaporización λ , (FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998) expresado en la siguiente ecuación,

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \cdot 10^{-3}) \cdot T_a \left[\frac{MJ}{kg} \right] \quad (18)$$

- fc , factor de conversión de unidades [Wm^{-2}] a [mmd^{-1}], que posee el valor de 28,36
- ε , que corresponde a la relación en peso molecular de vapor de agua/aire seco, asignándose el valor de 0,622 [-].

Existen diferentes modelos complejos para la descripción del cálculo del flujo de calor en el suelo (G), debido a que este flujo es pequeño en comparación de Rn. En ese caso, se tiene que cuando el periodo de tiempo de cálculo es de 24 horas o más, se presenta a continuación,

$$G = 0,14 \cdot (T_i - T_{i-1}) \quad (19)$$

Ley de Dalton

Se considera la superficie líquida como un plano horizontal de área unitaria a la altura z, entonces el flujo de vapor (\dot{m}_v) que asciende por convección, queda dado por la ecuación a continuación;

$$\dot{m}_v = -\rho_a \cdot K_w \cdot \frac{dq_v}{dz} \quad (20)$$

Luego de sustituir y reordenar ecuaciones, se llega a:

$$\dot{m}_v = \frac{K_w \cdot k^2 \cdot \rho_a \cdot (q_{v1} - q_{v2}) \cdot (u_2 - u_1)}{K_m \cdot \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) \right]^2} \quad (21)$$

La ecuación anterior, se conoce con el nombre de la ecuación de Thornthwaite-Holzman para el transporte de vapor. En su aplicación, generalmente se supone que la razón entre los coeficientes

Kw/Km es constante e igual a 1.

Cuando no se dispone de 2 medidas, se utiliza la ecuación anterior suponiendo que z1 coincide con la altura de aspereza z0 y que en esa posición el aire está saturado. De acuerdo a esto, como la humedad específica $q_v=0,622e_s/ P_{atm}$. Las medidas de presión de vapor pueden sustituir a las de humedad específica. En la altura z2, la presión de vapor es la presión de vapor del aire, e_a , y la presión de vapor en la superficie es la presión de vapor saturado correspondiente a la temperatura del aire, e_s . De acuerdo con esto, la ecuación anterior queda:

$$m_v = \frac{0,622 \cdot k^2 \cdot \rho_a \cdot (e_{as} - e_a) v_2}{P_{atm} \cdot \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) \right]^2} \quad (22)$$

Recordando que dm_v/dt (m_v) representa la tasa de evaporación equivalente por unidad de área, $m_v = \rho_w Ev$, entonces reemplazando y reordenando, puede escribirse:

$$Ev = \frac{0,622 \cdot k^2 \cdot \rho_a \cdot u_2}{P_{atm} \cdot \rho_w \cdot \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) \right]^2} \cdot (e_{as} - e_a) \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (23)$$

Parámetros que se debe tener en cuenta son,

- k, que corresponde a la constante de von Karman, para la cual generalmente se adopta el valor 0,4,
- z0, el cual es la altura de las asperezas que puede considerarse como el punto en que la velocidad es nula.

Dado el efecto de la rugosidad (z), está asociada a la altura y es un valor que no se obtiene experimentalmente, el modelo solo queda representado teóricamente y no es usado posteriormente para los cálculos de la tasa de evaporación.

Balance de energía

En primer lugar, se parte con la definición de tasa de evaporación para una superficie de agua se ha determinado por la ecuación de Harberck,

$$Ev = 2,909 \cdot A^{-0,05} \cdot U \cdot (e_s - e_a) \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (24)$$

Expresando la ecuación (s) en W/m2 se obtiene

$$\lambda Ev = h_v \cdot (e_s - e_a) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (25)$$

Donde,

h_v , coeficiente de transferencia de vapor de agua y se obtiene a partir de la siguiente expresión

$$h_v = 3,367 \cdot 10^{-5} \cdot A^{-0,05} \cdot U \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (26)$$

Combinando la fórmula de Penman y el método de transferencia de masa, Penman dedujo,

$$Ev = \frac{\Delta \cdot R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (27)$$

Donde,

E_a , es el poder evaporante del aire

$$E_a = f(u_2) \cdot DPV \quad (28)$$

Donde,

DPV, es el déficit de presión de vapor [kPa], calculado como la diferencia $DPV = (e^*(T_a) - e_a)$, donde $e^*(T_a)$ es la presión de vapor de saturación .

Mientras que la función del viento $f(u_2)$, que fue propuesta por Penman (1948), es;

$$f(u_2) = 2,6 \cdot (1 + 0,54 \cdot U_2) \left[\frac{mm}{d} \right] \quad (29)$$

El segundo método se describen las ecuaciones basadas en la física que usan para representar cada uno de los flujos de energía

$$R_n = G + H + L_v E \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (30)$$

$$E = \frac{R_n - G - H}{L_v} \left[\frac{kg}{s \cdot m} \right] \quad (31)$$

Para esta formulación del balance de energía, R_n es positivo cuando se dirige hacia la superficie del suelo, mientras que G , H y $L_v E$ son positivos cuando se alejan de la superficie del suelo. Aunque en cualquier momento el balance de energía puede no tener cierre (la suma de todos los flujos de energía es exactamente igual a la radiación neta).

La radiación neta se calcula en función de un balance de radiación de la superficie terrestre, generalmente determinado como un balance simple de radiación de onda larga y corta, entrante y saliente:

$$R_n = R_s \cdot (1 - \alpha') + \varepsilon_{ac} \cdot \sigma \cdot T_a^4 - \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (32)$$

Para el caso de obtención del parámetro α se puede derivar a través de la reflectancia en el rango de onda corta, mientras que T_s se puede determinar convirtiendo la radiación infrarroja térmica en temperatura utilizando la ecuación de Plank.

Las mediciones en áreas de suelo desnudo han demostrado que el flujo de calor del suelo tiende a constituir una fracción constante de la radiación neta. Por lo tanto, muchos métodos de cálculo del presupuesto de energía de detección remota estiman el flujo de calor del suelo simplemente como una constante multiplicada por el valor calculado de la radiación neta:

$$G = -c \cdot R_n \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (33)$$

Donde c corresponde a una constante determinada empíricamente. Donde c varía de 0,3 para suelo

húmedo a 0,5 para suelo seco.

En el caso de las tasas de flujo de calor sensibles se relacionan con las características de la temperatura del aire en la superficie y con el límite atmosférico. Para aplicaciones de teledetección, el flujo de calor sensible se puede calcular en función del gradiente de temperatura del aire de la superficie y un término de resistencia aerodinámica que tenga en cuenta los efectos de la capa límite atmosférica:

$$H = \rho_a \cdot C_p \cdot \frac{T_s - T_a}{r_{ah}} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (34)$$

El término r_{ah} es variable y está en función de las características de rugosidad de la superficie terrestre, las características del viento en la capa límite y la estabilidad atmosférica. Existen modelos de presupuesto de energía de detección remota en el que se calculan valores de r_{ah} utilizando un perfil de velocidad vertical, como se representa a continuación,

$$r_{ah} = \frac{\left(\frac{\ln(z - d_0)}{z_0} \right)^2}{k^2 \cdot u} \left[\frac{s}{m} \right] \quad (35)$$

Donde,

z corresponde a la altura de la medición

d_0 es el plano cero de desplazamiento

u es la velocidad del viento a la altura z

$$\varepsilon_{ac} = 1,24 \cdot \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{\frac{1}{7}} [-] \quad (36)$$

ANEXO 5: CORRELACION ECUACIONES DE ANALISIS QUIMICO

Tabla 10 Correlación análisis químico

	%Error	Correlación	Variables
Actual CS	67%	$1,2 * TevAgua + 1,35 * [Mg]^{-0,32}$	[Mg]
Actual SV	50%	$TevAgua * 1,35 * [Mg]^{-0,32}$	[Mg]
Correlaciones Matemáticas	44%	$0,915 + 0,408 * TevAgua - 0,026 * [Mg]$	[Mg]
	37%	$13,765 - 1,173 * TevAgua + 0,111 * [SO4]$	[SO4]
	32%	$6,51 + 0,287 * TevAgua - 0,021 * [NO3]$	[NO3]
	32%	$6,5 + 0,289 * TevapAgua - 0,022 * [NO3] + 0,003 * [Mg]$	[Mg], [NO3]
	36%	$-3,27 + 0,393 * TevAgua - 0,014 * [Mg] + 0,074 * [SO4]$	[Mg], [SO4]
	31%	$4,264 + 0,297 * TevAgua - 0,018 * [NO3] + 0,027 * [SO4]$	[NO3], [SO4]
	33%	$6,058 + 0,290 * TevAgua - 0,024 * [NO3] + 0,007 * [Mg] + 0,015 * [K]$	[Mg], [NO3], [K]
	31%	$4,23 + 0,299 * TevAgua - 0,019 * [NO3] + 0,004 * [Mg] + 0,027 * [SO4]$	[Mg], [NO3], [SO4]
	32%	$3,944 + 0,3 * TevAgua - 0,02 * [NO3] + 0,007 * [Mg] + 0,026 * [SO4] + 0,014 * [K]$	[Mg], [NO3], [SO4], [K]
	32%	$1,414 + 0,201 * TevAgua - 0,040 * [NO3] + 0,115 * [Mg] - 0,029 * [SO4] + 0,042 * [K] + 0,073 * [Na]$	[Mg], [NO3], [SO4], [K], [Na]
Coficiente de Actividad	32%	$300,90 + 0,33 * TevAgua + 0,83 * [Mg] + 17556 * \gamma_{Mg} - 1,47 * [NO3] - 17900 * \gamma_{NO3}$	[Mg], [NO3], γ_{Mg} , γ_{NO3}

Tabla 11 Correlación análisis químico tren MLK

	%Error	Correlación Pozas MLK	Variables
Actual CS	37%	$1,2 * TevAgua + 1,35 * [Mg]^{-0,32}$	[Mg]
Actual SV	47%	$TevAgua * 1,35 * [Mg]^{-0,32}$	[Mg]
Correlaciones Matemáticas	24%	$5,37 + 0,449 * TevAgua - 0,081 * [Mg]$	[Mg]
	36%	$-5,68 + 0,63 * TevAgua + 0,058 * [SO4]$	[SO4]
	30%	$6,23 + 0,438 * TevAgua - 0,025 * [NO3]$	[NO3]
	25%	$5,92 + 0,44 * TevapAgua - 0,008 * [NO3] - 0,057 * [Mg]$	[Mg], [NO3]
	25%	$8,32 + 0,413 * TevAgua - 0,009 * [Mg] - 0,034 * [SO4]$	[Mg], [SO4]
	29%	$11,38 + 0,371 * TevAgua - 0,030 * [NO3] + 0,054 * [SO4]$	[NO3], [SO4]
	23%	$10,7 + 0,488 * TevAgua + 0,012 * [NO3] - 0,156 * [Mg] - 0,08 * [K]$	[Mg], [NO3], [K]
	25%	$10,7 + 0,379 * TevAgua - 0,016 * [NO3] - 0,052 * [Mg] - 0,05 * [SO4]$	[Mg], [NO3], [SO4]
	24%	$12,08 + 0,425 * TevAgua - 0,0016 * [NO3] - 0,111 * [Mg] - 0,035 * [SO4] - 0,047 * [K]$	[Mg], [NO3], [SO4], [K]
	21%	$23,8 + 0,358 * TevAgua - 0,020 * [NO3] - 0,183 * [Mg] - 0,029 * [SO4] + 0,109 * [K] - 0,249 * [Na]$	[Mg], [NO3], [SO4], [K], [Na]
Coficiente de Actividad	20%	$1472,3 + 0,41 * TevAgua + 3,24 * [Mg] + 91546 * \gamma_{Mg} + 2,23 * [NO3] - 93258 * \gamma_{NO3}$	[Mg], [NO3], γ_{Mg} , γ_{NO3}

Tabla 12 Correlación análisis químico tren PDV

	%Error	Correlación Pozas PDV	Variables
Actual CS	60%	$1,2 * TevAgua + 1,35 * [Mg]^{-0,32}$	[Mg]
Actual SV	84%	$TevAgua * 1,35 * [Mg]^{-0,32}$	[Mg]
Correlaciones Matemáticas	42%	$3,27 - 0,145 * TevAgua + 0,037 * [Mg]$	[Mg]
	34%	$-4,55 + 0,210 * TevAgua + 0,121 * [SO4]$	[SO4]
	34%	$6,79 + 0,185 * TevAgua - 0,018 * [NO3]$	[NO3]
	30%	$9,24 - 0,25 * TevapAgua - 0,017 * [NO3] + 0,032 * [Mg]$	[Mg], [NO3]
	34%	$-5,25 + 0,26 * TevAgua - 0,004 * [Mg] + 0,129 * [SO4]$	[Mg], [SO4]
	31%	$0,004 + 0,152 * TevAgua - 0,009 * [NO3] + 0,094 * [SO4]$	[NO3], [SO4]
	30%	$7,65 - 0,185 * TevAgua + 0,008 * [NO3] + 0,029 * [Mg] - 0,126 * [K]$	[Mg], [NO3], [K]
	30%	$3,677 - 0,003 * TevAgua - 0,012 * [NO3] + 0,014 * [Mg] + 0,05 * [SO4]$	[Mg], [NO3], [SO4]
	30%	$2,437 + 0,014 * TevAgua + 0,012 * [NO3] + 0,012 * [Mg] + 0,055 * [SO4] - 0,123 * [K]$	[Mg], [NO3], [SO4], [K]
	26%	$0,897 + 0,037 * TevAgua - 0,007 * [NO3] + 0,004 * [Mg] + 0,058 * [SO4] - 0,021 * [K] + 0,027 * [Na]$	[Mg], [NO3], [SO4], [K], [Na]
Coficiente de Actividad	37%	$322,4 + 0,198 * TevAgua - 8,67 * [Mg] + 8396,5 * \gamma_{Mg} - 2,72 * [NO3] - 8776,4 * \gamma_{NO3}$	[Mg], [NO3], γ_{Mg} , γ_{NO3}