

INDICADORES DEL POTENCIAL DE SECADO SOLAR DE UNA REGION APLICADOS AL NOROESTE ARGENTINO

M. Condori, F. Altobelli

Instituto de Investigación en Energía No Convencional (INENCO)
Universidad Nacional de Salta (UNSa)
Avda. Bolivia 5150, A4408FVY, Salta, Argentina.
Te: 54-387-4258709, Fax: 54-387-4255489, email: condori@inenco.net

Recibido:13-06-09; Aceptado:20-09-09.

RESUMEN.- El conocimiento del recurso energético del que se dispone en una región es fundamental para el correcto diseño de sistemas productivos que aprovechan la energía solar, como es el caso del secado solar a escala industrial. En el presente trabajo se presenta un modelo de evaporación de agua libre en un secador solar ideal simple, que considera dos fuentes de energía: la radiación solar incidente y la capacidad de absorción de humedad del aire ambiente. Como resultado se obtienen indicadores para determinar la potencialidad energética de una región en cuanto al secado solar. Se determinan estos indicadores, el potencial de secado solar y el índice de secado solar, para tres localidades de la provincia de Salta. Se realiza el estudio comparativo del potencial de secado de estas localidades para cada mes del año. Se generaliza el estudio a 18 localidades del noroeste de Argentina (la región NOA) y se mapea la información obtenida interpolando los resultados para toda la región. Los resultados son analizados en escala colorimétrica, de forma anual y mensual.

Palabras Claves: Recurso Energético, Potencial de Secado Solar, Secado Solar.

INDICATORS OF SOLAR DRYING POTENTIAL OF A REGION APPLIED TO THE ARGENTINIAN NORTHWEST

ABSTRACT. - The knowledge of energy resources available in a region is essential for the proper design of production systems that use solar energy, as is the case of industrial solar drying. In this work, a free water evaporation model in a simple ideal solar drier is presented. In this model, the incident solar radiation and the humid absorption capacity of the ambient air are considered as energy sources. As a result, indexes to determine the energetic potential according to solar drying in a region are obtained. Two indexes, the solar drying potential and the solar drying index, are determined for three localities in the province of Salta. The comparative analysis about the drying solar potential for each month of the year for those localities is realized. This study is generalized to 18 localities in the Argentinean northwest (NOA region) and the data obtained are mapped through the interpolation method. The results achieved are analyzed in a colorimetric scale, for annual and monthly scales.

Keywords: Energy Resource, Solar Drying Potential, Solar drying.

1. INTRODUCCIÓN

El óptimo aprovechamiento de cualquier tipo de recurso natural, debe basarse indefectiblemente en el pleno conocimiento de su disponibilidad. Partiendo de esta premisa, se torna fundamental la evaluación de la potencialidad que posee una localidad para emprendimientos productivos tal como puede ser el caso del secado a escala industrial con el uso de energía solar.

En el proceso de secado interactúan las variables características del producto a secar, del secador y del recurso energético que propicia los mecanismos de transferencia de calor y masa. Son las características del secador y del producto las que determinan la eficiencia con la que se utiliza dicho recurso energético. En el caso del secado solar propiamente dicho, deben considerarse los aportes de tres

variables meteorológicas, la radiación solar, la temperatura y la humedad específica ambiente.

En trabajos anteriores (Condori y Saravia, 1998; 2003) se introdujo el concepto de potencial de secado para describir la operación de secadores solares simples y de tipo túnel. Estos conceptos se extienden en el presente trabajo, para determinar el potencial de secado de una región utilizando un modelo de evaporación de agua libre en un secador solar ideal. Se definen entonces dos tipos de potenciales: uno referido a la energía solar disponible y otro correspondiente al déficit de saturación del aire, de la combinación de ambos, surge el potencial total de secado solar de una región.

A partir de este modelo es posible avanzar hacia un mapeo espacio-temporal de la potencialidad de la región en cuanto al recurso disponible para el secado solar. Su análisis,

comprende una valiosa herramienta de decisión, que permite orientar con mayor certeza los esfuerzos y recursos económicos hacia sitios óptimos para este tipo de emprendimientos en mayores escalas de producción.

2. MODELO DE EVAPORACIÓN DE AGUA LIBRE

Un producto fruti-hortícola puede contener el 80 % de su masa en forma líquida, su extracción siempre presenta resistencia debido a las distintas formas de ligaduras que existen entre el agua y la estructura de la materia. Un secado ideal sería el que se realiza con un producto que presente resistencia nula a la extracción. Se puede considerar como aproximación una bandeja con una superficie constante de

agua libre. Esta bandeja evaporará una cierta cantidad de agua de acuerdo a las condiciones ambientales en la que se encuentra, ésta cantidad será mayor si la bandeja se coloca dentro de un secador solar ideal.

En la Figura 1 se muestra un esquema del modelo de evaporación de agua libre dentro de un secador solar simple, que se utilizará para analizar la interacción entre los fenómenos de transferencia de calor y masa involucrados en el proceso. El secador consta de una cubierta transparente a la radiación solar que también sirve para confinar al flujo de aire que circula por entre la cubierta y la bandeja. El aire puede ser impulsado ya sea por medios activos o pasivos.

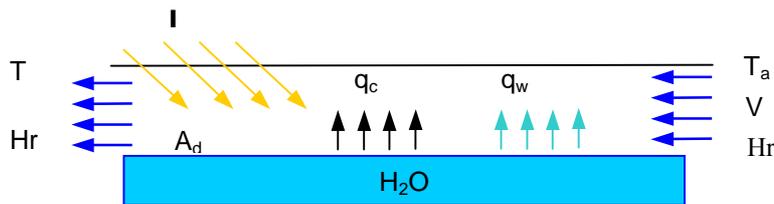


Fig. 1: Esquema de una bandeja de agua libre en un secador solar simple

En la Figura 2 se muestra un esquema para el análisis termodinámico entre las fases agua-aire y las variables que importan en el proceso de transferencia. De la bandeja se considera sólo la película superior de agua libre, donde se supone que las propiedades involucradas en los procesos se mantienen constantes. Por encima de esta película de agua se establece una zona de aire saturado a la temperatura de la superficie del agua, y más arriba, otra zona de aire húmedo

donde se produce la difusión de calor y masa provocado por las diferencias de temperatura y presión de vapor entre la zona de aire saturado y la zona de aire húmedo. Como principal hipótesis se considera que las zonas de aire saturado y aire húmedo tienen una distribución uniforme de temperatura y humedad

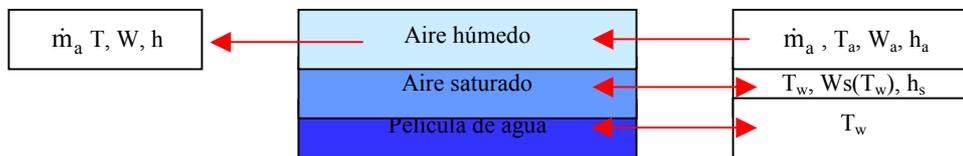


Fig. 2: Esquema de las variables involucradas en el proceso termodinámico

Sobre la superficie de agua libre incide la radiación solar que se transmite a través de la cubierta superior, mientras que el flujo de aire \dot{m}_a remueve continuamente el aire húmedo del secador. Se considera que este flujo es constante durante todo el proceso. Esta suposición es cierta para sistemas de circulación de aire activos, pero con sistemas pasivos la suposición implica utilizar valores promediados en un cierto intervalo de tiempo.

Se considera también que la superficie de agua y el aire saturado, por encima de ésta, se encuentran en equilibrio térmico a temperatura T_w . Entonces el aire saturado tendrá una humedad específica de saturación $W_s(T_w)$, y dado que ésta es mayor que la del aire húmedo, existirá transferencia de masa en forma de vapor hacia la zona de aire húmedo. La temperatura y la humedad dependen de la posición respecto a la entrada del secador. Estas condiciones tienden a uniformizarse si el secador es lo suficientemente largo. Bajo esta consideración es que se plantean los balances que siguen.

Por la ley de difusión de masa de Fick se establece la siguiente relación para la velocidad de evaporación del agua:

$$\dot{m}_w = A_d \sigma_d (W_s(T_w) - W) \quad (1)$$

donde \dot{m}_w (Kg s^{-1}) es la velocidad de evaporación, A_d (m^2) es el área expuesta para la difusión de agua, W_s es la humedad específica de saturación evaluada a la temperatura de la superficie de agua T_w y W es la humedad específica del aire. σ_d ($\text{Kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$) es el coeficiente de difusión de masa correspondiente.

La energía que se necesita para convertir el agua en vapor, con la velocidad \dot{m}_w será:

$$Q_w = \dot{m}_w q_v \quad (2)$$

donde q_v es el calor de cambio de fase del agua o calor latente de evaporación evaluada a la temperatura T_w .

Simultáneamente se forma un gradiente de temperatura entre la temperatura de la superficie de agua T_w y la del aire húmedo T . La "ley de enfriamiento de Newton" establece la siguiente relación entre este gradiente y la difusión de calor:

$$Q_c = h_c A_d (T_w - T) \quad (3)$$

donde h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección expresado en $Wm^{-2}C^{-1}$. T es la temperatura del aire húmedo. En las ecuaciones (1) y (3) se toma el área de difusión térmica igual a la de masa, lo cual es cierto para la bandeja de agua libre pero no necesariamente para otros productos.

Sobre la superficie de agua incide radiación solar, y la potencia efectiva asociada se calcula por la siguiente expresión:

$$Q_I = (\tau\alpha)A_d I \quad (4)$$

donde I es la radiación solar que incide por unidad de superficie de agua libre, es decir sobre superficie horizontal, τ es la transmisividad de la cubierta y α el coeficiente de absorción del agua para la radiación solar.

La energía utilizada en producir la evaporación se determina a partir del balance de energía sobre la superficie de agua, en régimen estacionario. Es decir:

$$q_v \dot{m}_w = (\tau\alpha)A_d I + h_c A_d (T - T_w) + h_r A_d (T_w - T_c) \quad (5)$$

Esta ecuación tiene en cuenta el aporte de la energía solar antes mencionado, la transferencia térmica por convección y el intercambio neto de radiación con la cubierta superior. Este intercambio puede ser despreciado si las temperaturas de las superficies son iguales o si la emisividad es nula.

En la Figura 3 se muestra el diagrama sicrométrico correspondiente al proceso. El aire ambiente ingresa al secador con humedad específica W_a , temperatura T_a y entalpía específica h_a . Si no tiene aportes o pérdidas de energías el proceso de evaporación debe seguir la "curva de saturación adiabática", es decir un proceso a entalpía h_a constante, en la que el aire saturado se halla a la humedad específica $W_s(T_w)$, línea de trazos en la figura. Como en nuestro caso se cuenta con el aporte de energía solar, la entalpía de salida del aire húmedo será mayor, es decir $h > h_a$, línea sólida en el gráfico. Para este caso el aire en contacto con la película de agua incorpora vapor hasta alcanzar la humedad específica W , disminuyendo su temperatura seca hasta la temperatura T debido al fenómeno de "enfriamiento evaporativo", punto 2 de la figura 3. Si el aporte de energía es suficiente el proceso puede continuar hasta la curva de saturación del aire donde la temperatura seca será T_s y la humedad específica de saturación $W_s(T_s)$, punto 3 de la figura 3.

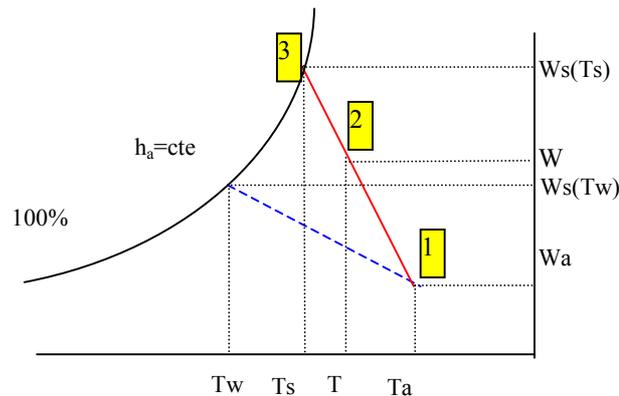


Fig. 3: Diagrama sicrométrico correspondiente al secador ideal simple

Considerando el punto 2 de la grafica, el aumento de humedad específica del aire se debe a la incorporación de agua evaporada. El balance de masas establece la siguiente relación para la velocidad de evaporación:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (W - W_a) \quad (6)$$

Donde \dot{m}_a es el flujo másico del aire en el secador, que se considera constante durante el proceso.

2.1. El potencial e índice de secado

El máximo potencial de secado se obtiene colocando un producto ideal dentro del secador ideal. Se define como secador ideal a uno con eficiencia máxima posible, esto es sin pérdidas térmicas ni ópticas, incluyendo máxima

absorción de radiación. Bajo esta consideración el intercambio por convección con la cubierta superior se puede despreciar y el cambio de calor sensible del aire húmedo, en este caso disminución por enfriamiento evaporativo, es igual a la transferencia de calor por convección desde el aire a la película de agua.

$$C_p \dot{m}_a (T - T_a) = A_d h_c (T_w - T) \quad (7)$$

donde C_p el calor específico del aire húmedo.

Para el secador ideal la ecuación (5) se modifica como sigue:

$$A_d I = (q_v \dot{m}_w)_{ideal} + A_d h_c (T_w - T) \quad (8)$$

Es decir que la energía solar total incidente en el área del secador y la energía que cede el aire por convección se utilizan en la evaporación del agua. Incorporando la ecuación (7) en la (8) se muestra claramente que la evaporación de agua libre se puede producir por dos fuentes de energía: la radiación solar absorbida y el cambio de calor sensible del aire.

$$(q_v \dot{m}_w)_{ideal} = A_d I + \dot{m}_a C_p (T_a - T) \quad (9)$$

La máxima cantidad de agua que se puede evaporar en un secador ideal se debe corresponderse con el aprovechamiento del máximo de estos dos potenciales de secado.

El potencial correspondiente a la energía solar es la radiación solar incidente sobre el plano del secador con absorción igual a la unidad. Es decir, la máxima posible:

$$P_i = (q_v \dot{m}_w)_{max}^I = A_d I \quad (10)$$

La ecuación (9) muestra que se puede secar sin radiación solar si el potencial de secado del aire es lo suficientemente alto. La máxima cantidad de agua que se puede evaporar en ausencia de radiación solar se produce sólo por el aporte del cambio de calor sensible del aire, siguiendo la curva de saturación adiabática hasta el estado de saturación (línea de trazos de la Figura 3).

$$P_a = \dot{m}_a C_p (T_a - T_w) \quad (11)$$

Utilizando la ecuación de balance de masa se puede determinar la velocidad de secado, en ausencia de radiación solar, cuando el aire está bajo esta condición de saturación:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a [W_s(T_w) - W_a] \quad (12)$$

En consecuencia, el máximo potencial de secado del aire, sin radiación solar, expresado en unidades de potencia es:

$$P_a = (q_v \dot{m}_w)_{max}^a = q_v \dot{m}_a [W_s(T_w) - W_a] \quad (13)$$

Esta ecuación expresa la cantidad de energía asociada al agua que podría incorporarse al aire ambiente saturándolo a temperatura de bulbo húmedo. En este sentido $[W_s(T_w) - W_a]$ puede considerarse como el déficit de saturación del aire ambiente en ausencia de aportes de energía externa.

Se define como potencial de secado a la potencia total relacionada con la máxima tasa de evaporación posible que se obtiene de utilizar el máximo de ambos potenciales:

$$P_T = P_i + P_a = (q_v \dot{m}_w)_{max}^I + (q_v \dot{m}_w)_{max}^a \quad (14)$$

El potencial total de secado solar, de acuerdo a las ecuaciones (10) y (13) se obtiene de:

$$P_T = A_d I + q_v \dot{m}_a [W_s(T_w) - W_a] \quad (15)$$

Este potencial se puede determinar para cada región y se requiere el conocimiento de la radiación solar, la temperatura ambiente y la humedad específica ambiente del lugar.

Para proceder a comparar la producción que tendría el secador solar ideal en distintos lugares es necesario fijar las condiciones de funcionamiento del mismo. En lo que concierne a la ecuación (15), se requiere convenir valores para el área del secador y el flujo másico de operación, como así también fijar el calor latente de evaporación de referencia. La elección no es totalmente arbitraria sino que se realiza sobre la base de valores ciertos y de la experiencia para obtener valores razonables de comparación. En lo que sigue se utilizarán los siguientes valores: flujo másico del aire $0,1 \text{ kg.s}^{-1}$, área de secador 1 m^2 y un valor constante para el calor latente de vaporización de 2380 kJ.kg^{-1} .

El potencial de la ecuación (15) puede variar mes a mes de acuerdo cambian las condiciones climáticas del lugar y su determinación puede servir para comparar regiones en cuanto a su potencial de secado para cada época del año según el tiempo de cosecha del producto que se esté considerando. Por ejemplo si un producto se cosecha en varias regiones de enero a marzo, se puede comparar el potencial de secado de estas regiones para determinar cuál es la más conveniente para realizar el secador solar de acuerdo al recurso de cada región.

A los fines del diseño de un secador real puede ser conveniente saber cuál de los dos potenciales de secado es el más importante en el lugar y de acuerdo a ello favorecer más el área de colección solar o el uso de aire ambiente. Para lo cual, a partir de la definición del potencial total de secado de la ecuación (14), se introduce una variable adimensional, el índice de secado Z , que se define como:

$$Z = \frac{P_a}{P_i + P_a} \quad (16)$$

Es decir que este índice de secado me permite medir el porcentaje del potencial de secado del aire respecto al potencial total disponible. Los valores de Z se encuentran dentro del intervalo $[0,1]$. El valor $Z=0$ corresponde al caso de tener ingresando al colector aire ambiente saturado, que no contribuye al potencial total de secado. El valor $Z=1$ ocurre cuando no hay radiación solar. Por ejemplo el valor $Z=0,6$ implica que el potencial de radiación es $2/3$ del potencial del aire.

La ecuación (15) está expresada en términos de unidades de potencia, vatios, y es más apropiada para comparar el potencial de secado entre regiones, en cambio el índice adimensional de la ecuación (16) permite mesurar el porcentaje del potencial del secado del aire frente al solar para una dada región, y a partir de éste tomar decisiones de diseño para el secador.

2.2. Índice de evaporación y eficiencia de un secador

Se puede expresar el potencial de secado en términos de masa de agua, es decir, los kilogramos de agua evaporada con la energía disponible en un intervalo de tiempo dado:

$$M_{ideal} = \frac{P_T}{q_v} \Delta t \quad (17)$$

Esta requiere la determinación del potencial de secado en el intervalo Δt , tiempo expresado en segundos.

Se puede obtener un método estándar para calcular la eficiencia de secado de un secador solar real utilizando el potencial de secado de uno ideal que opera bajo las mismas condiciones.

En el caso de evaporar bandejas de agua y utilizando la ecuación (17), la eficiencia del secador real se define como el cociente entre la masa de agua que evapora el secador real y la que evapora el secador ideal en el mismo intervalo de tiempo.

$$\eta_{\text{sec}} = \frac{M_{\text{real}}}{M_{\text{ideal}}} \quad (18)$$

La metodología para la determinación de la eficiencia del secador real sería medir mediante una balanza la pérdida de agua de las bandejas y todas las variables necesarias para determinar la masa evaporada del secador ideal según la ecuación (17).

3. DIAGRAMAS DE POTENCIAL E INDICE DE SECADO

3.1. Análisis del recurso

Para la determinación del potencial de secado en una región, de acuerdo a la ecuación (15), es necesario conocer los recursos de radiación solar sobre el plano del colector, la temperatura ambiente y la humedad específica ambiente.

Los valores del recurso generalmente están expresados como valores medios mensuales, y para que tenga mayor rigor estadístico sobre una base de datos de varios años. No muchos lugares cuentan con observatorios meteorológicos que recogen estos datos en forma sistemática. Pero también se cuenta con el aporte de satélites meteorológicos, cuya información se puede disponer en sitios de Internet.

Hay diferencias entre los datos obtenidos para la radiación solar y las otras variables meteorológicas en cuanto al tiempo utilizado para el promedio diario. Obviamente, el de radiación se corresponde con la longitud del día solar que se mide como el tiempo entre la salida y puesta del sol. Pero en el caso de las otras variables, el tiempo de promedio son las 24 horas de registro.

Por lo general valores promediados en 24 horas pueden estar subestimados respecto a los de horas de sol pero en términos de realizar una comparación cuantitativa y cualitativa entre dos lugares no pierden sentido, ya que se utilizará la misma referencia temporal.

3.2. Metodología

- Para el cálculo del potencial de radiación solar se ha seguido el procedimiento estándar para la geometría solar (Duffie y Beckman, 2006). Se parte de valores diarios medios mensuales de radiación global sobre plano horizontal para una determinada región, estos expresados en MJm^{-2} .
- Se calcula para el día medio del mes, n , la declinación mediante la ecuación

$$\delta = 23,45 \text{sen}\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \quad (19)$$

- Con la declinación δ y la latitud del lugar ϕ , se calcula la longitud del día solar mediante la ecuación:

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\text{tg}\theta \text{tg}\delta) \quad (20)$$

- Se divide la radiación global del ítem a) por la longitud del día N expresada en segundos, con lo que se obtiene la potencia instantánea media diaria por metro cuadrado, I .
- Se refieren los cálculos de la ecuación (10) a un área de colección de 1 m^2 , con lo que se obtiene P_T , el potencial de secado debido al recurso solar.
- Para el cálculo del potencial de secado del aire se utilizan datos diarios medios mensuales de temperatura ambiente (T_a) y de humedad relativa ambiente (HR). Para poder automatizar los cálculos de Contenido de Humedad y Presiones de Saturación, fueron empleadas ecuaciones de tipo ASHRAE (1989) para gases ideales.

$$\ln P_{ws} = -5.8002206 E^3 / T + 1.3914993 + -4.8640239 E^{-2} \times T + 4.1764768 E^{-5} \times T^2 + -1.4452093 E^{-8} \times T^3 + 6.5459673 \times \ln T \quad (21)$$

$$P_w = \text{HR} \times P_{ws} \Big|_{T_a} \quad (22)$$

$$W_a = 0.62198 \left(\frac{P_w}{P - P_w} \right) \quad (23)$$

$$W_s = 0.62198 \left(\frac{P_{ws}}{P - P_{ws}} \right) \quad (24)$$

Donde P es la Presión atmosférica, P_w es la Presión de vapor, P_{ws} la Presión de vapor de saturación y W_s es la Humedad específica de saturación

La temperatura ambiente T_a y la humedad específica ambiente W_a determinan una dada temperatura de bulbo húmedo. Siguiendo el proceso a esta temperatura de bulbo húmedo constante, se obtiene la humedad específica de saturación del aire ambiente, $W_s(T_w)$, y con ella se calcula el déficit de saturación del aire $W_s(T_w) - W_a$.

- Considerando un flujo másico de $\dot{m}_{\text{ar}} = 0,1 \text{ kg s}^{-1}$ se obtiene el potencial de secado del aire P_a utilizando la ecuación (13).

- Se calcula el potencial total de secado P_T mediante la ecuación (15) y el índice de secado Z mediante la ecuación (16).

3.3. Ejemplos.

A continuación se calcula como ejemplo el potencial de secado para tres ciudades de la provincia de Salta. Se han utilizado datos medios mensuales obtenidos del atlas climatológico elaborado por el INENCO para la región NOA, proyecto IPDUV (1980).

Estos datos se muestran como gráficos de barras en las figuras 4, 6 y 8 respectivamente.

Ejemplo 1: Cálculo del potencial de secado para la capital de la provincia de Salta, Argentina, (24° 48' S, 65° 25' O, 1180 msnm). Localizada en zona tropical con verano moderado y un invierno seco y templado.

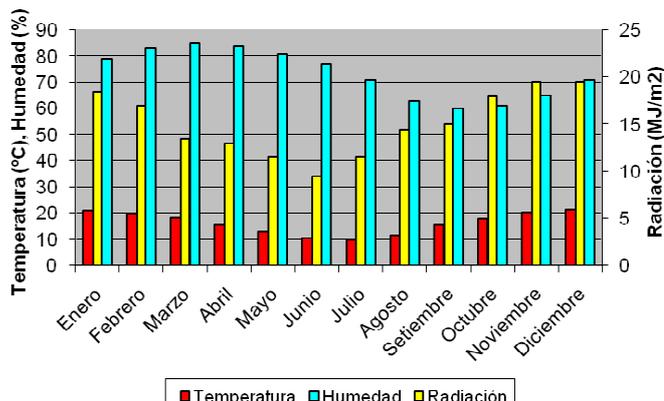


Fig.4: Datos diarios medios mensuales de Temperatura ambiente, Humedad relativa ambiente y Radiación solar global sobre plano horizontal para Salta capital.

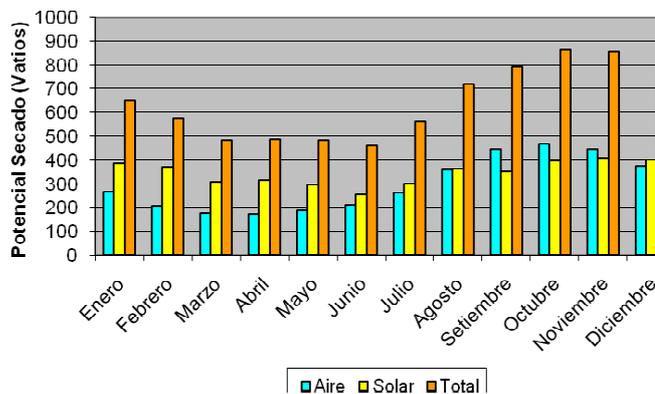


Fig. 5: Valores calculados para el potencial de secado para Salta capital.

Se observa que el potencial de secado de marzo a junio tienen valores similares, mientras que los niveles de radiación decrecen en ese período, porque aumenta la sequedad del ambiente. Que el potencial del aire de agosto a noviembre es tan importante o mas alto que el potencial de radiación, coincidiendo con la época de lluvias escasas.

Ejemplo 2: Cálculo del potencial de secado para la ciudad de San Carlos, provincia de Salta, que se encuentra a 200 km al oeste de la ciudad de Salta, (25° 54' S, 65° 57' O, 1710 msnm). Tiene un clima seco y árido con grandes amplitudes térmicas y días soleados. Lluvias escasas mayormente en el verano menor a los 200 mm anuales.

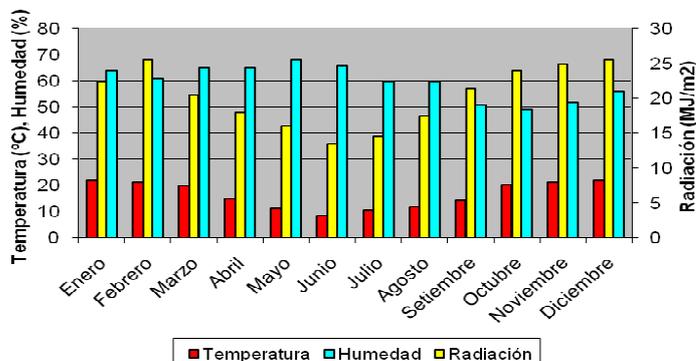


Fig. 6: Datos diarios medios mensuales de Temperatura ambiente, Humedad relativa ambiente y Radiación solar global sobre plano horizontal para la ciudad de San Carlos.

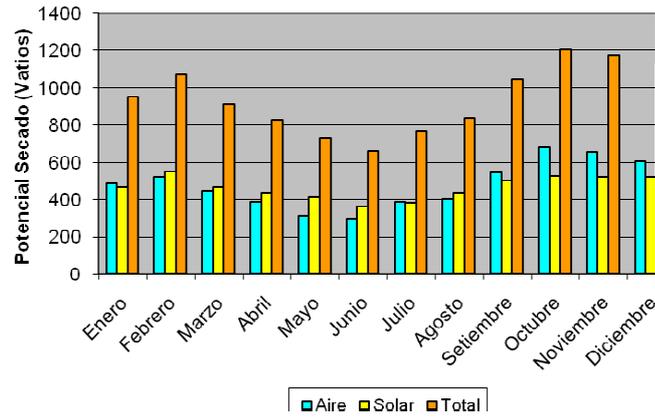


Fig. 7: Valores calculados para el potencial de secado para la ciudad de San Carlos.

Ejemplo 3: Cálculo del potencial de secado para la ciudad de Tartagal, provincia de Salta, que se encuentra a 365 km al norte de la ciudad de Salta, (22° 30' S, 65° 50' O, 502 msnm). Tiene un clima tropical con lluvias cercanas a los 1000 mm anuales.

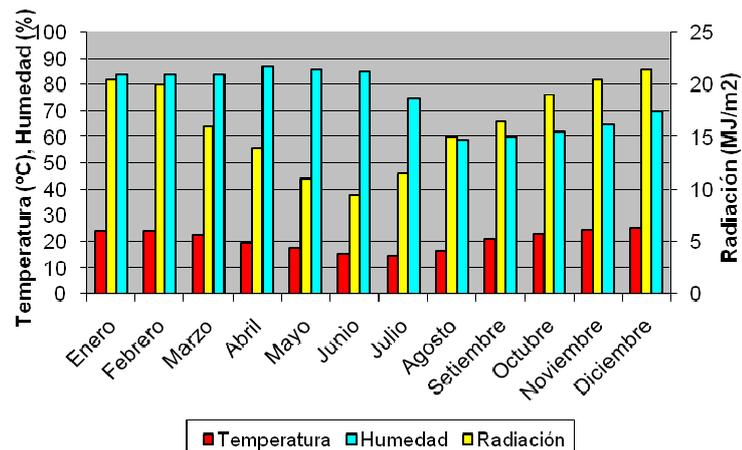


Fig. 8: Datos diarios medios mensuales de Temperatura ambiente, Humedad relativa ambiente y Radiación solar global sobre plano horizontal para la ciudad de Tartagal.

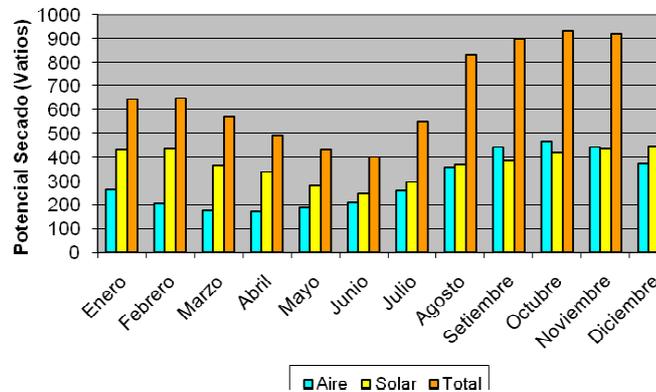


Fig. 9: Valores calculados para el potencial de secado para la ciudad de Tartagal.

En las Figuras 10 y 11 se compara para cada mes del año el potencial de secado y el índice de secado para estas tres ciudades. El mayor potencial de secado lo presenta la zona de San Carlos que está incluida en los Valles Calchaquíes y donde se practica el secado a cielo abierto de pimiento para pimentón entre los meses de enero a mayo. Sin embargo los mayores valores de potencial lo presenta de setiembre a diciembre, lo que sugiere la incorporación de un cultivo alternativo con cosecha en agosto. Los valores de índice de secado para San Carlos tienen prácticamente un valor 0,5 para todo el año indicando que en esa zona, y de acuerdo a

las referencias tomadas, el potencial de secado del aire y el de radiación son comparables. Esto sugiere que los secadores también funcionan bien por las noches aprovechando la sequedad del ambiente.

Los potenciales de secado de la ciudad de Salta y la ciudad de Tartagal son comparables a pesar de que la segunda pertenece a clima de selva. El menor potencial de secado lo presenta Tartagal en el mes de junio, el índice de secado es del orden del 40% debido a la alta humedad relativa.

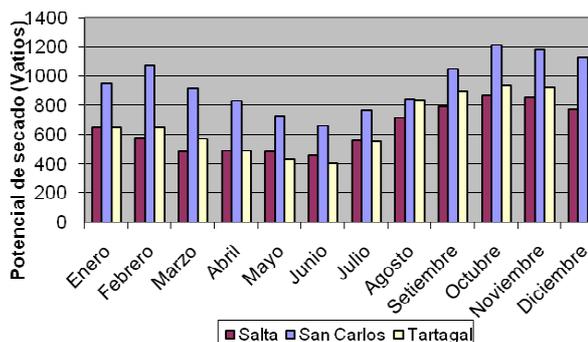


Fig. 10: Potencial de secado para las ciudades de Salta, San Carlos y Tartagal.

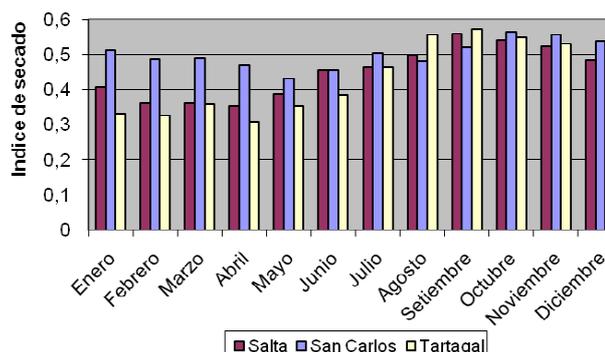


Fig. 11: Índice de secado para las ciudades de Salta, San Carlos y Tartagal.

4. MAPEO DE LA REGION NOA

El Potencial e Índice de Secado fueron aplicados y mapeados para la región NOA de la República Argentina. Se empleó para ello información proveniente del Centro de Información Meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional y del Atlas Climático elaborado por el INENCO (Proyecto IPDUV, 1960-1980). Los datos correspondientes a Cerrillos fueron cedidos por la Estación Experimental EEA INTA Cerrillos. Por su parte, para el caso de Salar El Rincón, se trabajó con datos medidos a campo para el período 2007, tomados de Salazar (2009).

Con respecto a la variable radiación, escasamente medida en la zona, se debieron aplicar correlaciones de estimación. Luego de evaluar diversos modelos, la correlación desarrollada por Hargreaves et al (Citado por Raichijk et al, 2005), fue seleccionada. Esta correlación para el índice de claridad comprende una expresión lineal de la raíz cuadrada del promedio de la amplitud térmica diaria:

$$\bar{K}_t = a + b \times \sqrt{(\bar{T} - t)} \quad (25)$$

Donde:

- \bar{K}_t = Índice de claridad
- a y b = Constantes relacionadas al lugar de origen de los datos
- T = Temperatura media máxima
- t = Temperatura media mínima

Para su aplicación en el área de estudio fueron empleadas las constantes calculadas por Raichijk et al (2005), para diversas localidades argentinas las cuales se muestran en la Tabla 1. Dada la característica del área de estudio y las localidades para las cuales se tenía datos, fueron seleccionadas las constantes de Famaillá y Cerrillos, adoptando un criterio de proximidad a las estaciones requeridas. En el caso de Salar El Rincón, se contaba con datos de radiación medidos, no requiriendo el empleo de estimaciones.

Tabla 1: Constantes aplicadas a cada localidad para estimar radiación.

Localidad	Latitud	Longitud	Estación	Constantes	
				a	b
La Quiaca	-22.01	-65.62			
Orán	-23.13	-64.33			
Humahuaca	-23.2	-65.35			
Rivadavia	-24.18	-62.90			
Jujuy	-24.18	-65.30	Cerrillos	0.1283	0.0948
Salta	-24.51	-65.29			
La Poma	-24.72	-66.22			
Cerrillos	-24.78	-65.42			
Cachi	-25.12	-66.18			
San Carlos	-25.88	-65.95			
Tartagal	-22.53	-63.82			
Rosario de la Frontera	-25.80	-64.97			
Tucumán	-26.80	-65.20			
Famaillá	-27.05	-65.40	Famaillá	0.0911	0.1056
Santiago del Estero	-27.78	-64.27			
Tinogasta	-28.07	-67.57			
Catamarca	-28.47	-65.78			

El error medio (RSME) reportado por Raichijk et al (2005), para esta estimación es del 11%. Si se considera la propagación de errores en las ecuaciones de potenciales e índice de secado, en el modelo aquí presentado no debería esperarse un error inferior al 17-18%. A pesar de esto, todas las variables tenidas en cuenta son susceptibles de ser medidas con mayor precisión, con lo cual, se estima sería posible disminuir el error global al 10%, con bases de datos actualizadas.

4.2. Metodología de mapeo.

Una vez que se contó con los datos de potencial e índices de secado para cada una de las localidades evaluadas, se procedió a efectuar su mapeo. Se empleó para esto el programa ArcGis 9.0, dentro del cual se realizaron procedimientos de interpolación con el fin de visualizar de manera continua la distribución de estas variables en el terreno. Dada la espacialidad de los puntos con datos, así como las características de las variables mapeadas, se optó, entre los múltiples tipos de interpolación por el método Kriging para valores anuales.

Este es un método geoestadístico que emplea una poderosa técnica estadística para predecir valores derivados de medir la relación entre los datos, y emplea sofisticadas técnicas de peso promedio. Para el caso de los resultados mensuales, fue elegido el módulo IDW de interpolación, dada la suavidad de curvas que genera. En ambos casos fueron elegidas 10 categorías en escala colorimétrica.

Primeramente fueron mapeados los valores medios anuales, para proceder luego a la representación espacial de aquellos referidos a datos mensuales. Para este último caso, fueron escogidos meses representativos de cada estación (Diciembre, Marzo, Junio y Septiembre), a los fines de visualizar la variación estacional.

De las localidades analizadas, Salar El Rincón resultó con el mayor valor de potencial total (Q_T) de secado, seguido por Rivadavia, La Poma y La Quiaca.

Para el primer caso, fueron determinantes la baja humedad relativa y la alta disponibilidad de radiación solar de este paraje puneño; mientras que para el segundo las altas temperaturas del Chaco ejercen una marcada influencia.

Con respecto al Índice de secado, la situación óptima es presentada por Rivadavia, seguida por Catamarca y Tinogasta. Esto implica que, dadas las condiciones climáticas imperantes, las tres estaciones poseen potenciales de secado próximos a los máximos posibles (Tabla 2).

Teniendo en cuenta la estacionalidad de la región con respecto a los factores temperatura, radiación y humedad, se consideró conveniente para el mapeo de los valores mensuales los meses de: Diciembre, Marzo, Junio y Septiembre.

En las figuras 12, 13, 14 y 15 se muestran los mapas anuales en los cuales puede apreciarse un ajuste entre los valores representados y las formaciones florísticas del noroeste argentino. Puede verse también la influencia directa, así como el peso que poseen, para el caso del potencial de secado del aire, los valores de humedad, registrándose los sectores de mayor potencial hacia el este (Región de Chaco Salteño), el sudoeste (Región de Monte) y el oeste (Región Altoandina).

Por su parte, el potencial de secado de la radiación solar, presenta sus mayores valores hacia el sector occidental, de mayor altitud (Región Puneña). Se destacan también los Valles Calchaquíes y la Quebrada de Humahuaca.

El sector central de la región ostenta los menores valores en concordancia con menor irradiación y mayores contenidos de humedad, correspondiéndose a su vez con la formación de Yungas.

Tabla 2: Resultados obtenidos por localidad en promedios anuales.

Localidad	Latitud	Longitud	Altitud	Radiación	HR	P _i	P _w	P _r	Z
La Quiaca	-22.01	-65.62	3442	23.5	47.7	542.0	480.1	1022.1	0.47
Tartagal	-22.53	-63.82	490	16.3	75.1	371.4	301.3	672.7	0.43
Oran	-23.13	-64.33	362	15.5	76.2	354.0	291.8	645.8	0.43
Humahuaca	-23.2	-65.35	2939	18.2	52.6	417.5	486.6	904.0	0.54
Salar El Rincón	-23.97	-67.11	3730	27.4	22.3	623.0	791.0	1414.0	0.55
Rivadavia	-24.11	-62.88	205	16.0	43.1	366.4	695.9	1062.2	0.65
Jujuy	-24.18	-65.3	921	15.7	67.2	359.2	384.1	743.4	0.50
Salta	-24.51	-65.29	1189	15.1	73.3	345.6	292.4	638.0	0.44
La Poma	-24.72	-66.22	3015	22.0	47.3	504.5	529.4	1034.0	0.51
Cerrillos	-24.78	-65.42	1240	15.4	72.0	352.3	309.8	662.2	0.46
Cachi	-25.11	-66.18	2280	17.6	51.2	404.1	510.1	914.3	0.56
Rosario de la Frontera	-25.8	-64.97	791	15.5	70.5	354.3	338.3	692.6	0.47
San Carlos	-25.88	-65.95	1710	20.3	59.7	466.1	472.0	938.2	0.50
Tucumán	-26.82	-65.22	426	15.1	73.7	344.6	302.0	646.6	0.46
Famaillá	-27.05	-65.42	361	15.3	76.5	349.2	267.0	616.2	0.42
Santiago del Estero	-27.78	-64.27	199	15.8	61.9	359.1	446.8	806.0	0.54
Tinogasta	-28.07	-67.57	1204	17.7	54.2	403.7	530.5	934.2	0.56
Catamarca	-28.47	-65.78	531	15.3	56.2	349.7	560.3	910.0	0.60

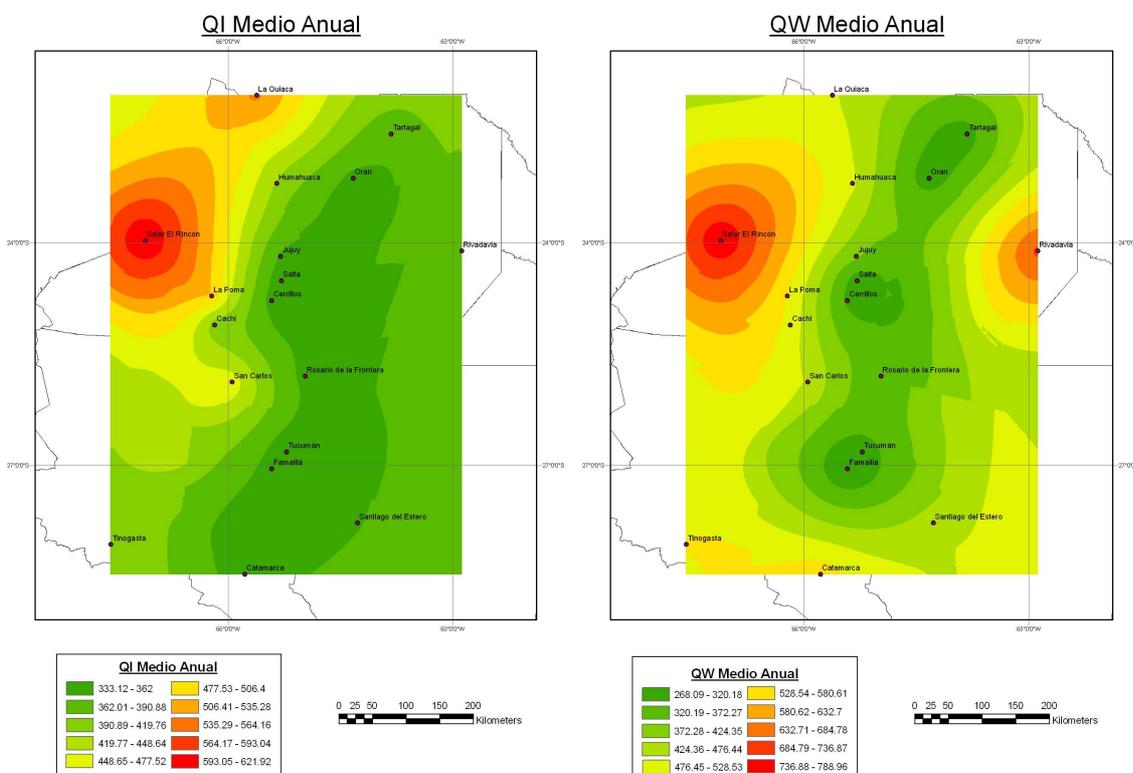


Fig. 12: Mapa P_i Anual del NOA.

Fig. 13: Mapa P_w Anual del NOA

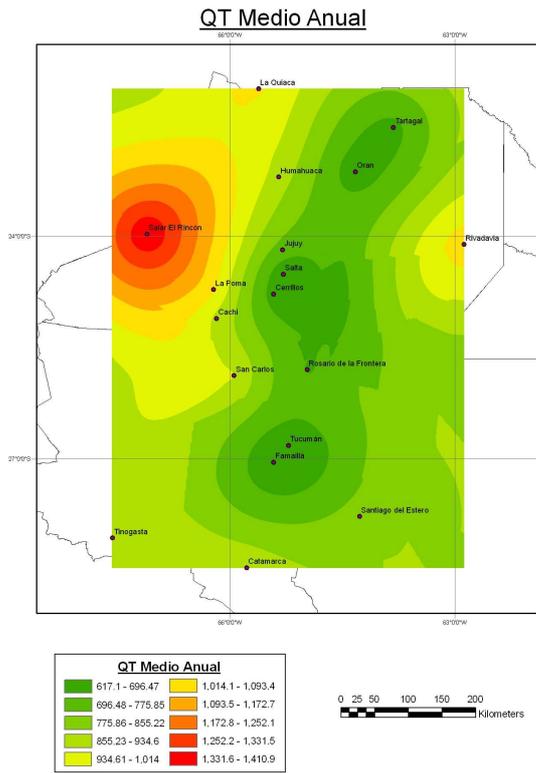


Fig. 14: Mapa P_T Anual del NOA.

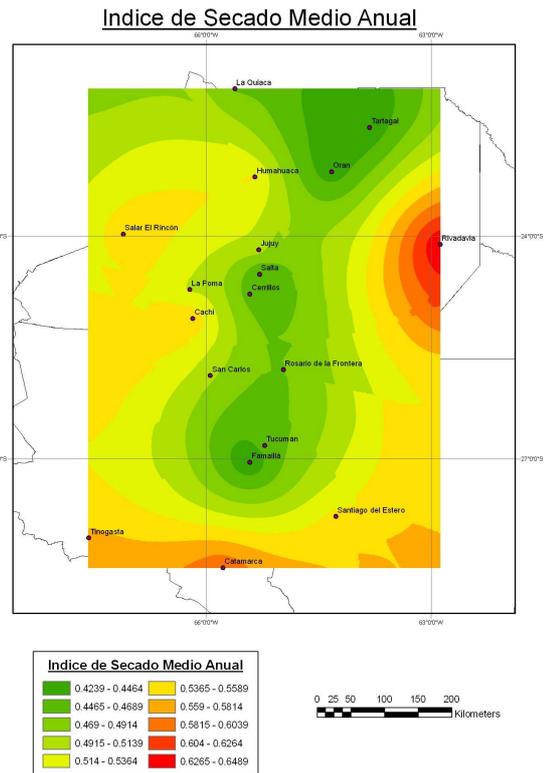


Fig. 15: Mapa Índice de Secado Anual del NOA

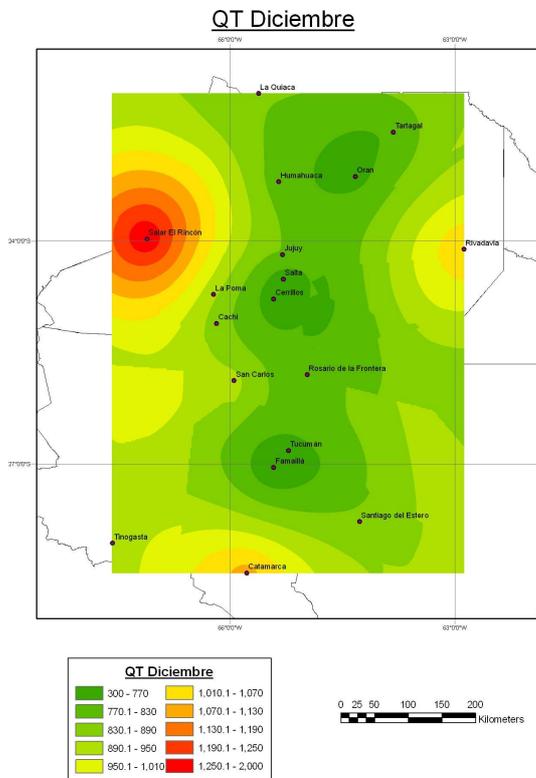


Fig. 16: Mapa P_T para el mes de Diciembre.

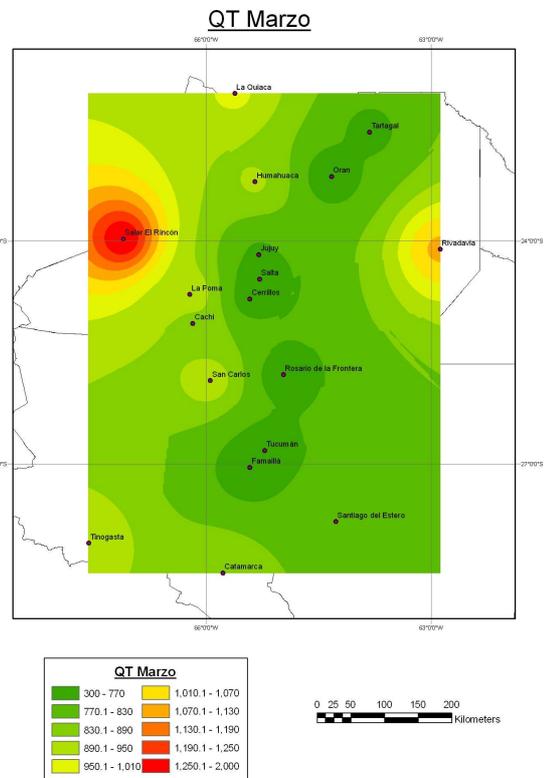


Fig. 17: Mapa P_T para el mes de Marzo

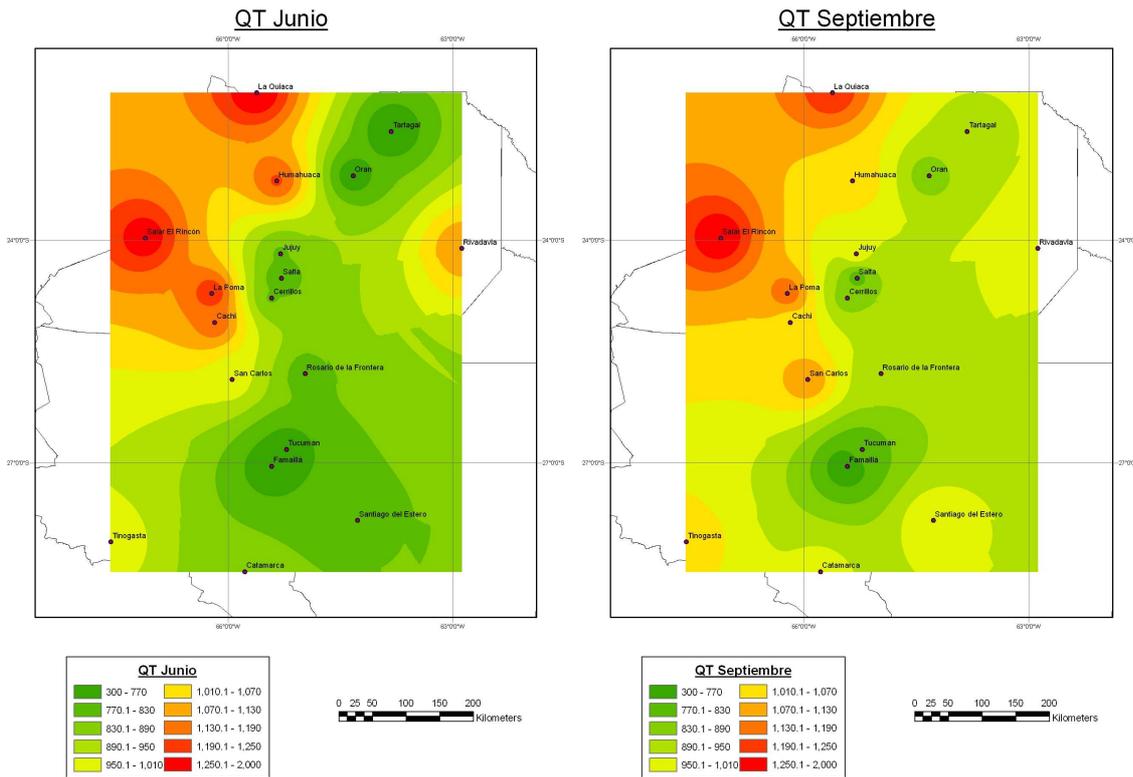


Fig. 18: Mapa P_T para el mes de junio.

Fig. 19: Mapa P_T para el mes de septiembre

Con respecto al análisis de la evolución mensual de los resultados, se observa una correspondencia entre los mapas y la variación climática estacional de la región. Puede apreciarse la influencia de las precipitaciones estivales como elemento de descenso de PT para casi toda el área de estudio. Es en esta estación del año (verano) donde se destacan por el alto potencial las localidades de El Rincón, Catamarca, y Rivadavia (Figura 16). Luego, en Marzo, y de manera representativa de la estación otoñal, la tendencia se mantiene (Figura 17). Durante Junio los sectores de mayor altitud, caracterizados por su baja humedad y sus cielos diáfanos, manifiestan una elevada aptitud para este análisis, contrastando con las bajas temperaturas de las otras locaciones (Figura 18).

Finalmente, el mes de septiembre (y en sí la estación primaveral), comprende la temporada de mayor importancia para el secado de toda la región. La combinación del período de bajas precipitaciones invernales, seguido por el inicio de altas temperaturas y la influencia del viento zonda, generan condiciones apropiadas para el secado de productos agrícolas (Figura 19).

De esta manera, y en términos generales, la temporada de primavera puede ser definida como la de mayor importancia con respecto al secado solar, mientras que los valores menores se corresponden con los meses de la estación invernal. Sin embargo, en todos los casos se mantiene la localización de los máximos potenciales de la región en torno a las mismas localidades.

En particular, el mapa de potencial de radiación solar (P_i) fue contrastado con Atlas de Energía Solar de la República Argentina (Grossi Gallegos y Righini, 2007), comprobando la existencia de tendencias similares. Puede decirse, sin

embargo, que no fue posible lograr un mayor ajuste con estos atlas debido a la escasez de datos correspondientes al sector oriental y sur oriental de la región

Si bien al tenerse en cuenta los errores de estimación de la irradiación y aquellos que se propagan en los cálculos de los potenciales e índice de secado, no tendría sentido físico el espaciado entre las estaciones elegidas (por ejemplo Tucumán-Famailá), no obstante se optó por dejar a las mismas con la idea de lograr suavizar las curvas resultado del mapeo.

5. CONCLUSIONES

Se ha elaborado un modelo de evaporación de agua libre dentro de un secador solar ideal. Mediante su aplicación se obtuvieron indicadores que permiten evaluar el potencial energético de la radiación solar incidente en un lugar para evaporar agua, como así también el potencial energético del déficit de saturación del aire ambiente para incorporar agua. Se han definido dos de estos indicadores: El potencial de secado solar y el índice de secado solar. El primero tiene en cuenta el aporte acumulado del potencial de radiación y del aire. El segundo indica que porcentaje representa el potencial del aire frente al total.

Estos dos indicadores permiten evaluar el recurso energético naturalmente disponible en una región para realizar secado solar. Esta evaluación es de carácter espacial y temporal por lo que se puede realizar un mapeo de regiones más extensas. Este tipo de mapas puede tener importancia en decisiones que tienen que ver con: a) el diseño y la determinación de la eficiencia de trabajo de secadores tecnológicos, b) el lugar de emplazamiento de nuevos secadores solares del tipo industrial, c) la decisión sobre cultivos alternativos a los

existentes en una región para aprovechar otros meses con buen potencial de secado, d) el análisis de recursos de planes estratégicos de producción o planes territoriales a fin de determinar o favorecer el acceso y la provisión de energía básica para el funcionamiento de plantas de procesos relacionadas con el secado.

En referencia al mapeo regional efectuado, puede decirse que la evaluación de potenciales del presente trabajo acompañan las clasificaciones fitogeográficas del NOA, tanto por la distribución espacial, como por los resultados obtenidos para los diferentes sitios. Sin embargo, no es suficiente el análisis de estos parámetros ecoambientales para arribar a conclusiones similares que con la aplicación de los potenciales de secado, en referencia a la factibilidad técnica de instalación de emprendimientos para el aprovechamiento de la energía solar.

Finalmente, si bien los resultados obtenidos reflejan la factibilidad técnica de ciertas localidades para secado solar, para la selección definitiva de sitios de emplazamiento de estos proyectos, deberían tenerse en cuenta otras alternativas que pueden surgir de la inclusión de evaluaciones de posibilidades de desarrollo, con aspectos tales como el tipo de actividad económica, aspectos demográficos, vías de acceso, infraestructura, etc, de la región.

REFERENCIAS

- American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) (1989). ASHRAE Handbook. Fundamentals. SI Edition. Atlanta, United States of America.
- Condorí M., Saravia L. (1998) *The Performance of Forced Convection Greenhouse Driers*. Renewable Energy, Vol. 13, N°4, pp.453-469, Elsevier Science, Great Britain.
- Condorí M., Saravia L. (2003) *Analytical Model for the Performance of the Tunnel-type Greenhouse Drier*. Renewable Energy, vol.28, nro. 3, pp 467-485, Elsevier Science, Great Britain.
- Duffie J. A.; Beckman W. A. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 3° edition. Wiley Interscience, New York.
- Grossi Gallegos H.; Righini R. (2003). Aproximación a un trazado de nuevas cartas de irradiación solar para Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 7, 2, p 11.07-11.11.
- Grossi Gallegos H.; Righini R. (2007). *Atlas de energía solar de la Republica Argentina*. Editado por SECYT y Universidad Nacional de Luján.
- Raichijk C.; Grossi Gallegos H.; Righini R. (2005). Evaluación de un método alternativo para la estimación de valores medios mensuales de irradiación global en Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 9, p 11.05-11.08.
- Salazar G. (2009). *Estudio y caracterización de patrones de radiación solar a grandes altitudes mediante métodos globales y espectrométricos*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de Salta.
- Salazar G.; Hernández A.; Cadena C.; Saravia L.; Romero G. (2008). *Caracterización de valores de radiación solar global para día claro en sitios de altura en el noroeste de la República Argentina*. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 12, p 11.33-11.40