

# Informe de balance hídrico modelado en base a sondas de capacitancia TEROs10

PARA CULTIVO DE MAÍZ CON COBERTURA DE PELO DE  
MATTEROFTRUST.ORG

RODRIGO MÁRQUEZ ANTIVILO  
INGENIERO AGRÓNOMO

## Contenido

Resumen Ejecutivo.....	2
Objetivos .....	3
Metodología y antecedentes.....	4
Inputs del suelo:.....	5
Inputs de cultivo: .....	6
Inputs de clima:.....	7
Inputs de manejo: .....	8
Resultados .....	9
Correlación modelo-sonda sin cubierta .....	9
Correlación modelo-sonda con cubierta .....	10
Diferencias de correlación entre tratamientos.....	10
Resultados del balance hídrico por tratamiento comparado.....	11
Conclusiones.....	14
Bibliografía .....	15
Anexos.....	16

## Resumen Ejecutivo

Por medio del presente informe se analiza el comportamiento de la humedad de suelo en un cultivo de maíz sujeto a dos tratamientos, el primero sin cobertura y el segundo con una cubierta superficial de suelo del producto denominado Agropelo. Estos ensayos se realizan en un clima árido, propio de la comuna de Calama, con riego por surcos durante los meses de septiembre de 2021 a febrero de 2022.

La hipótesis de la comparativa anterior indicaría que debiese existir una diferencia entre ambos tratamientos debido a la disminución de la evaporación directa de agua del suelo por efecto aislante generado por la cubierta de Agropelo. La cuantificación de este efecto no está determinada ni comprobada, pero referencias de FAO, indican que cubiertas plásticas y orgánicas poseerían un efecto positivo en el ahorro de agua.

Para fines de este análisis, se obtuvieron datos de sensores de humedad en los primeros 15 cm de suelo, para utilizarse los valores registrados, de forma comparativa con el modelo de balance hídrico de coeficiente de cultivo dual. El objetivo es obtener indirectamente la variable de evaporación directa del suelo.

El ajuste del modelo de coeficiente de cultivo dual jugó solo con la cobertura equivalente sobre el suelo, es decir solo se modificó esta variable para lograr ajuste entre sensores y modelamiento. El objetivo del ajuste fue la minimización de las diferencias entre la humedad de suelo simulada versus los datos de las sondas de humedad instaladas en terreno. Se consideró como mayor ajuste del modelo a la maximización de la correlación de humedad promedio diaria entre sensor y modelo, es decir maximizar el  $R^2$  al variar la cobertura dentro del modelo. Las correlaciones obtenidas fueron de 93,6% en el análisis sin cubierta y 86,9% para el tratamiento con cubierta de Agropelo, correlaciones que permiten validar el modelo de balance.

En cuanto al balance hídrico, se concluye que el cultivo de maíz bajo riego por surcos en la localidad de Calama, se beneficia del uso de la cubierta de Agropelo, al ver **reducida la pérdida de agua por evaporación directa del suelo en un 71%** al mismo tiempo que favorecen la productividad del cultivo **aumentando un 15% el agua utilizada para fotosíntesis.**

Al considerar el balance combinado de evaporación directa y transpiración, se estima un **ahorro de agua del 6,9%** en el caso de la utilización de cubiertas para la condición dada.

Es importante considerar el componente de producción por hectárea de cada tratamiento, de modo de obtener la huella hídrica, lo que es una comparación más adecuada al evaluar el éxito de esta implementación tecnológica.

## Objetivos

Determinar el efecto en ahorro de agua de riego de una cubierta de suelo (Agropelo), considerando el proceso de evaporación directa desde el suelo, teniendo como base la información de sensores de capacitancia para humedad de suelo (TEROS10), sobre los que se reconstituye el balance hídrico bajo el modelo de coeficiente de cultivo dual.

## Metodología y antecedentes

En literatura especializada (FAO 56), se hace referencia al “Efecto Mantillo” como el efecto que tienen las cubiertas de distinto tipo sobre el suelo. Aunque se ha descrito sobre todo para cubiertas plásticas o cubiertas orgánicas vegetales y no para la cubierta de suelo Agropelo, sujeta a este análisis.

Se ha indicado que las coberturas de plástico producen una reducción significativa de la evaporación del agua en la superficie del suelo, especialmente bajo sistemas de riego por goteo. Lo anterior, asociado con la reducción de la evaporación, donde además existirá un incremento general de la transpiración de la vegetación, debido a la transferencia de calor sensible y radiativo desde la superficie de la cobertura de plástico hacia las adyacencias de la vegetación. Aunque la tasa de transpiración de cultivos bajo plástico puede incrementarse en un promedio de 10-30% a lo largo de la temporada, comparado con la ausencia de la cobertura plástica, el valor de  $K_c$  disminuye en un promedio de 10-30% debido a la reducción de la evaporación en el suelo, estimada en un 50-80%. Generalmente, tanto la tasa de crecimiento del cultivo como la productividad vegetal se incrementan por el uso de la cobertura de plástico.

Es propio de este análisis, comparar el efecto de la cubierta de Agropelo, con las cubiertas plásticas de referencia en la literatura.

Para la estimación de demanda hídrica en base a los ensayos realizados, La metodología utilizada implica el uso del modelo de “Coeficiente de cultivo dual ( $k_c$  dual) - Evapotranspiración de referencia” indicado en el Manual FAO N°56 (Allen, R. G. et al., 1998 y 2005, Jensen y Allen 2006) el cual permite implementar un balance hídrico en el suelo utilizando el coeficiente de cultivo ( $K_{cb}$ ), un coeficiente de estrés ( $K_s$ ) asociado al agotamiento de humedad en el suelo, un coeficiente de evaporación directa ( $K_e$ ) y la demanda ambiental ( $ET_o$ ) del sitio siguiendo la relación  $ET_c = (K_{cb} * K_s + K_e) * ET_o$ .

El modelo fue alimentado con 4 antecedentes esenciales: 1) la información meteorológica de la plataforma AGROMET para estimar la demanda ambiental local (obtener la  $ET_o$  diaria, (ASCE-EWRI, 2004); 2) información del ciclo de crecimiento del cultivo obtenida a partir de imágenes satelitales multispectrales (Calera et al., 2010, 2017); y 3) información de la curva característica de retención de humedad en el suelo (medida en laboratorio junto a otras propiedades físicas derivadas de ecuaciones pedogenéticas (Saxton et. al. 2006) y el modelamiento de la conductividad hidráulica y ascenso capilar (Van Genuchten 1980, Wösten et al. 1999 y 2001)).

Los resultados del modelamiento anterior fueron comparados con la humedad de suelo evaluada mediante sensores capacitivos, de tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry) modelo TEROS10 instalado en cada uno de los 2 tratamientos, la comparación fue en base al promedio de humedad volumétrica diaria. La única variable modificada en el modelo de coeficiente dual fue la cobertura equivalente, entre los valores de 0% a 100% para cada tratamiento, hasta lograr una máxima correlación ( $R^2$ ) entre el modelo numérico y los datos de las sondas.

Los inputs del modelo se describen a continuación separándose en inputs de suelo, de cultivo, de clima y de manejo.

## Inputs del suelo:

Las variables de suelo consideradas en el modelamiento se resumen en la tabla 1. Estas variables son iguales para ambos tratamientos. Además, se considera una cobertura máxima de 75% sobre el teórico debido a los problemas de salinidad y nutrición del agua de riego utilizada.

		horizonte A (superficie)	horizonte B	horizonte C	horizonte D
Características del suelo (Horizonte)		Franco Arenosa (Fa) Mullido	Franco Arenosa (Fa) Normal	Franco Arenosa (Fa) denso	Franco Arenosa (Fa) Normal
Profundidad del Horizonte	(mts.)	0,15	0,25	0,25	0,25
Pedregosidad	(% vv)	0,0%	5,0%	10,0%	15,0%
Pedregosidad	(% g/cc)	9,6%	8,7%	15,5%	24,3%
CC Horizonte	(%)	19,00	17,90	16,80	17,90
PMP Horizonte	(%)	8,10	8,10	8,10	8,10
Humedad Crítica (UR)	(%)	14,10	13,49	12,89	13,49
Densidad aparente	(g/cm <sup>3</sup> )	1,31	1,46	1,60	1,46
Capacidad de Campo ponderado (%)	17,78	17,78			
Punto de marchitez ponderado (%)	8,10	8,10			
Humedad crítica UR ponderado (%)	13,42	13,42			
Profundidad efectiva (- % piedras) (m)	0,82				
Tasa de infiltración suelo saturado		horizonte A (superficie) (mm/h)	horizonte B	horizonte C	horizonte D
		72,33	46,66	25,66	39,80
Reducción de cond. hidráulica por pedregosidad		0,93	0,93	0,86	0,79
		Infiltración adecuada	Infiltración adecuada	Infiltración adecuada	Infiltración adecuada

Tabla 1: Inputs del modelo de coeficiente de cultivo dual para modelamiento de la humedad de suelo.

En la tabla 1 anterior se describen principalmente las características físicas del suelo y sus consecuentes efectos en el comportamiento del agua del suelo en términos de capacidad de almacenamiento (Capacidad de Campo) y velocidad de flujo (infiltración).

### Inputs de cultivo:

Las variables del cultivo consideradas en el modelamiento se resumen en la tabla 2. Estas variables se mantienen constantes o automáticas para ambos tratamientos, con excepción de suelo cubierto/seco en superficie, que es sobre la variable que se busca el ajuste con los datos de las sondas. La variable Cobertura relativa ( $K_{cb}$ ) se deriva de información satelital adjunta en los anexos al final del documento.

características del cultivo		Referencia literatura CULTIVO	CEREAL Maize field (dry grain to 18% moisture mass base), junio, Arid Climate	
Umbral de riego, prom. Ajustado (%)	0,67	UR de referencia	0,55	
$K_c$ promedio del ciclo (real)	0,70	$k_{cb_{ini\ ref}}$	$k_{cb_{mid\ ref}}$	$K_{cb_{end\ ref}}$
		0,15	1,15	0,15
Duración del ciclo de cultivo (días)	.->	Fase inicial	fase media	fase final
Factor % crec. Raíz respecto a max. teórico (cm día)	50	25,00	40,00	45,00
Profundidad max. de Raíces (m)	1,00		1,00	
Altura max. del Cultivo (m)	2,00		2,00	
Cobertura relativa ( $K_{cb}$ ) o sombreado (%)	75,00			
Profundidad Inicial Raíces(m)	0,08			
Día hasta 90% de emerg. (raíces)	5,00			
Día en que se alcanza prof. Máxima de raíces	65,00			
Factor de forma (n) crec. Raíces [1 lineal]	10,00			
Ancho máximo raíces (m)	0,73	Factor f de forma convexa	Punto medio SIG	
Curva de respuesta al Estrés	Convexa	15,0	0,05	
Sensación de estrés en planta según:	H. Min H1-H4			
Suelo cubierto/seco en superficie (%)	0-100			

Tabla 2: parámetros de cultivo considerados para el coeficiente de cultivo dual, con la variable de suelo cubierto/seco en superficie remarcada en amarillo.

En la tabla 2 1 anterior se describe la forma de crecimiento del cultivo, tanto en su parte aérea (follaje), como subterránea (raíces), este crecimiento se divide en las etapas inicial, media y final para cada una de las etapas fonológicas del cultivo de maíz, según se ha descrito en la referencia técnica de FAO.

Inputs de clima:

La información climática se obtuvo de la red agrometeorológica de INIA, con su estación en la localidad de Calama, los datos registrados y calculados de evapotranspiración de referencia y precipitaciones se presenta en la figura 1.

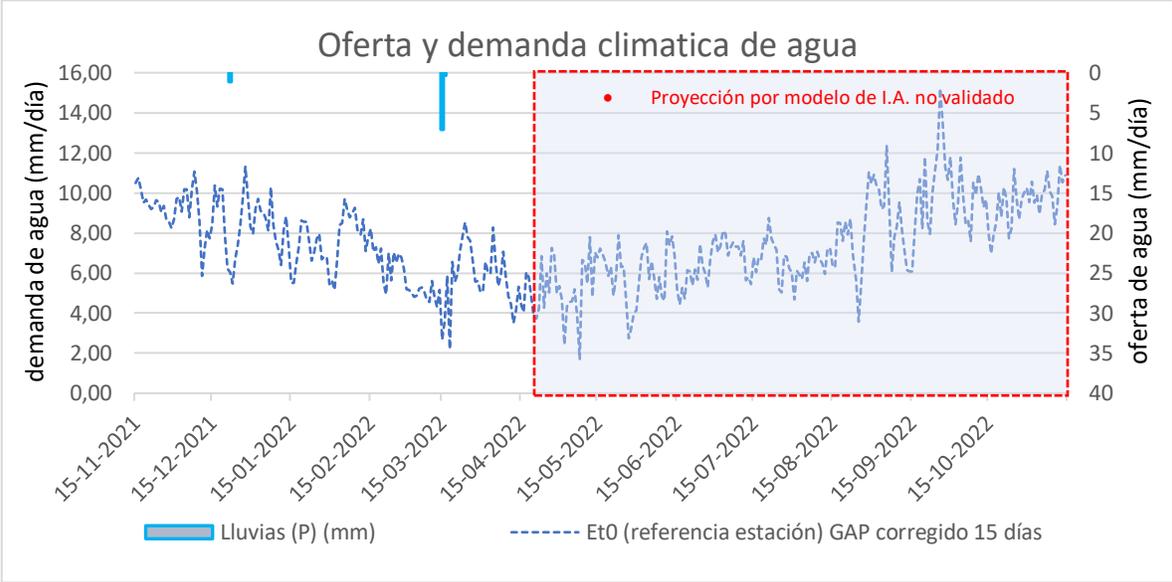


Figura 1: información climática obtenida desde la estación agrometeorológica de INIA en Calama.

En la figura 1 anterior se presenta la demanda evapotranspirativa ambiental a la que está sujeta el cultivo en la localidad de estudio (Calama). La información hasta el 15 de mayo corresponde a datos registrados, mientras que posterior a eso son datos proyectados por un algoritmo de inteligencia artificial basado en datos de años anteriores. Cabe señalar que solo se utilizaron en este estudio datos registrados.

## Inputs de manejo:

El manejo considerado respecto al riego se presenta en el siguiente en la tabla 3, cabe señalar que para el caso de la cobertura de Agropelo, se considero un 85% de eficiencia de aplicación sobre los tiempos presentados acá, esto debido a la impermeabilidad propia de este tipo de coberturas, lo cual es conocido, pero no se ha evaluado en literatura científica. Este valor de 85% es un criterio experto al cual se llegó en forma de prueba y error al ajustar ambos modelos.

<b>Fecha de riego</b>	<b>frecuencia</b>	<b>Tiempo (hh:mm)</b>
miércoles, 15 de septiembre de 2021	0,0	6:05
lunes, 20 de septiembre de 2021	5,0	6:05
lunes, 11 de octubre de 2021	21,0	6:05
sábado, 16 de octubre de 2021	5,0	6:05
martes, 19 de octubre de 2021	3,0	6:05
jueves, 28 de octubre de 2021	9,0	20:17
viernes, 5 de noviembre de 2021	7,0	16:53
martes, 9 de noviembre de 2021	4,0	9:41
sábado, 13 de noviembre de 2021	4,0	9:41
miércoles, 17 de noviembre de 2021	4,0	9:41
domingo, 21 de noviembre de 2021	4,0	9:05
domingo, 28 de noviembre de 2021	7,0	3:23
domingo, 12 de diciembre de 2021	14,0	11:41
miércoles, 22 de diciembre de 2021	10,0	10:41
martes, 28 de diciembre de 2021	6,0	6:59
domingo, 2 de enero de 2022	5,0	8:05
miércoles, 5 de enero de 2022	3,0	8:05
viernes, 7 de enero de 2022	2,0	7:05
sábado, 8 de enero de 2022	1,0	3:35

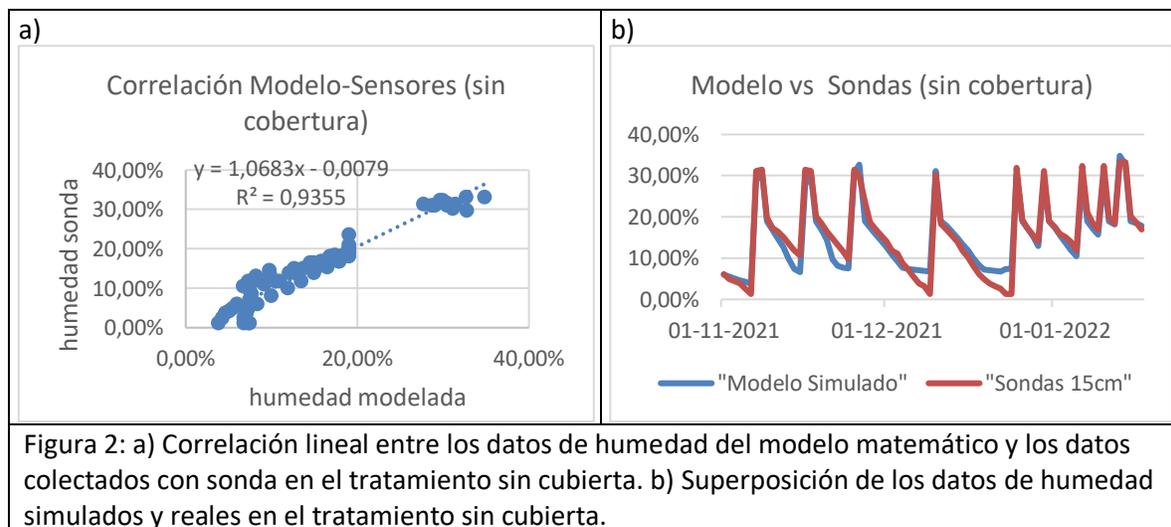
Tabla 3: calendario de riegos reconstituidos como manejo base.

## Resultados

Los resultados del modelo matemático en comparación con los datos colectados con sonda se presentan a continuación tanto para el tratamiento sin cubierta (figura 2) como el con cubierta (figura 3).

### Correlación modelo-sonda sin cubierta

Como se aprecia en la figura 2 (a), la correlación entre el modelo matemático y los datos de la sonda alcanza una alta correspondencia de  $R^2 = 0,9355$ , es decir un 93,6% de las variaciones de humedad del suelo a lo largo de la temporada se explican por las variables del modelo de coeficiente de cultivo dual respecto a las sondas de humedad de suelo. Lo anterior permite dar validez a la aplicación de este modelo para el caso de riego sin cubierta. Además, en la figura 2 (b), se puede corroborar visualmente el ajuste anteriormente descrito.



## Correlación modelo-sonda con cubierta

Como se aprecia en la figura 3 (b), la correlación entre el modelo matemático y los datos de la sonda alcanza una alta correlación de  $R^2 = 0,8691$ , es decir un 86,9% de las variaciones de humedad del suelo a lo largo de la temporada se explican por las variables del modelo de coeficiente de cultivo dual respecto a las sondas de humedad de suelo. Lo anterior permite dar validez a la aplicación de este modelo para el caso de riego sin cubierta. Además, en la figura 3 (b), se puede corroborar visualmente el ajuste anteriormente descrito.

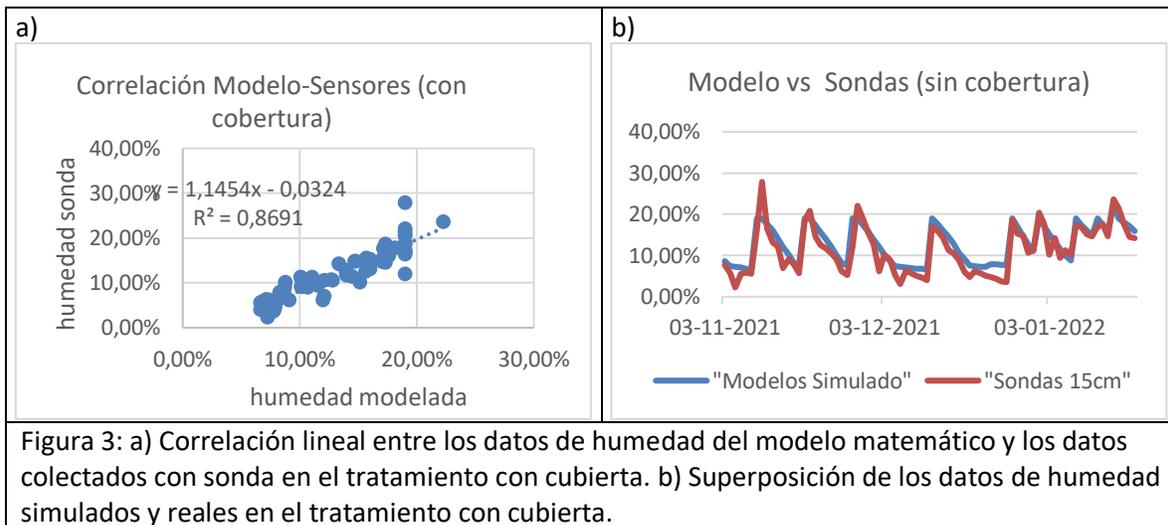


Figura 3: a) Correlación lineal entre los datos de humedad del modelo matemático y los datos colectados con sonda en el tratamiento con cubierta. b) Superposición de los datos de humedad simulados y reales en el tratamiento con cubierta.

## Diferencias de correlación entre tratamientos.

Las diferencias en la correlación entre el modelo sin cubierta ( $R^2 = 0,9355$ ) y con cubierta ( $R^2 = 0,8691$ ) se podrían atribuir a variables no consideradas en el modelo matemático implementado, mayormente relacionadas a la cubierta de Agropelo, entre las variables no consideradas cabe señalar el grosor de la cubierta, sus características de retención de humedad, ascenso capilar y capacidad de sustentar crecimiento radical. Sin embargo, se considera que ambos modelamientos son suficientemente altos en cuanto a correlación, como para validar los resultados de balance hídrico que se presentan a continuación.

## Resultados del balance hídrico por tratamiento comparado

Se puede ver en las figuras 4 y 5 las diferencias de destino del agua entre cada tratamiento en lo que respecta a evaporación directa del suelo y a transpiración del cultivo. Los valores completos del balance, que incluyen drenaje subsuperficial, se presentan como anexos de este documento.

En el caso de la pérdida de agua directa del suelo, es un uso no deseable del agua (figura 4), se puede apreciar una diferencia de **1.168 m<sup>3</sup>/ha de agua ahorrada** con el uso de la cubierta de Agropelo. Lo anterior se traduce en un **ahorro calculado de agua cercano al 71% respecto a la condición sin cubierta**. Esta proporción de ahorro se sostiene durante todos los meses debido al cubrimiento no total del follaje sobre el terreno ( $K_{cb}$  máximo estimado de 75%), sin embargo, es posible estimar que ante cultivos de mayor cobertura este ahorro disminuiría, mientras que en cultivos de menor cobertura el ahorro de agua aumentaría. Este valor equivale a una eficiencia de cobertura de 75% para la cubierta de Agropelo

Un factor importante para la alta proporción de pérdida por evaporación directa en este caso, el sistema de riego por surcos, del cual se asume un majamiento total de la superficie de suelo, favoreciendo la evaporación directa. Por lo anterior, es de presumir que, bajo una condición de riego localizado, como el goteo, las diferencias acá cuantificadas serían ostensiblemente menores.

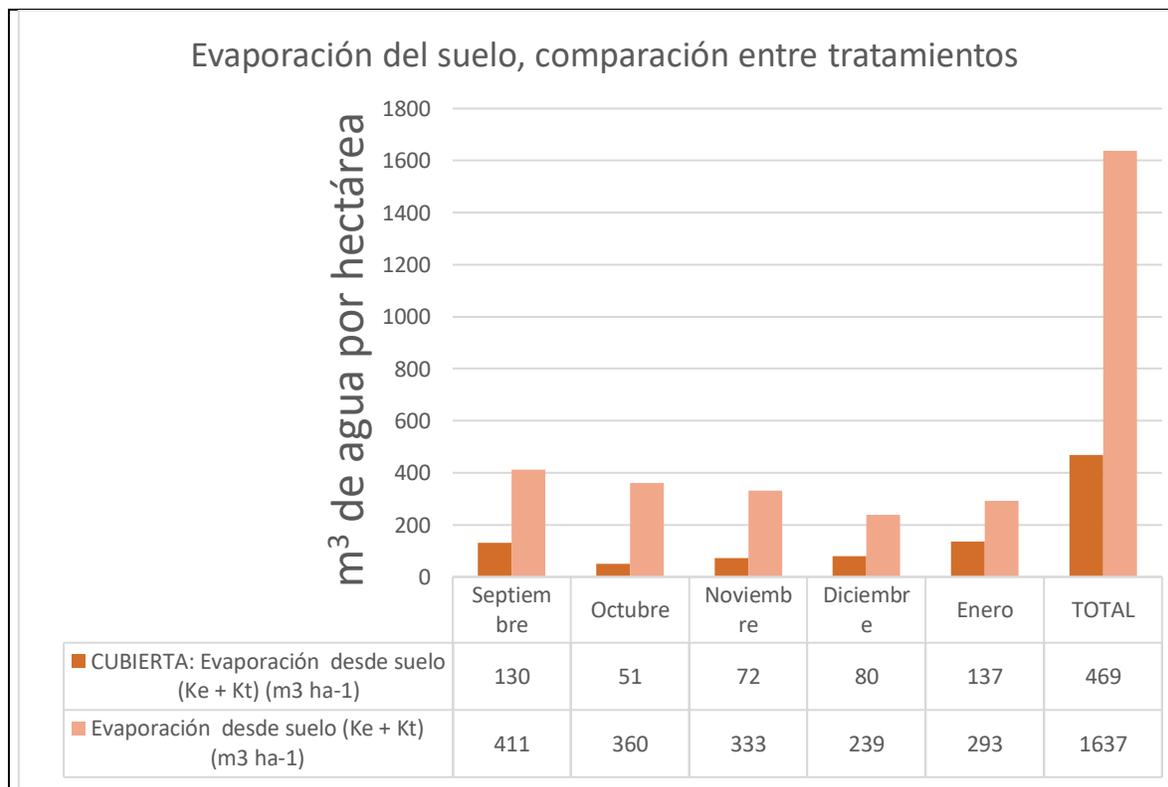
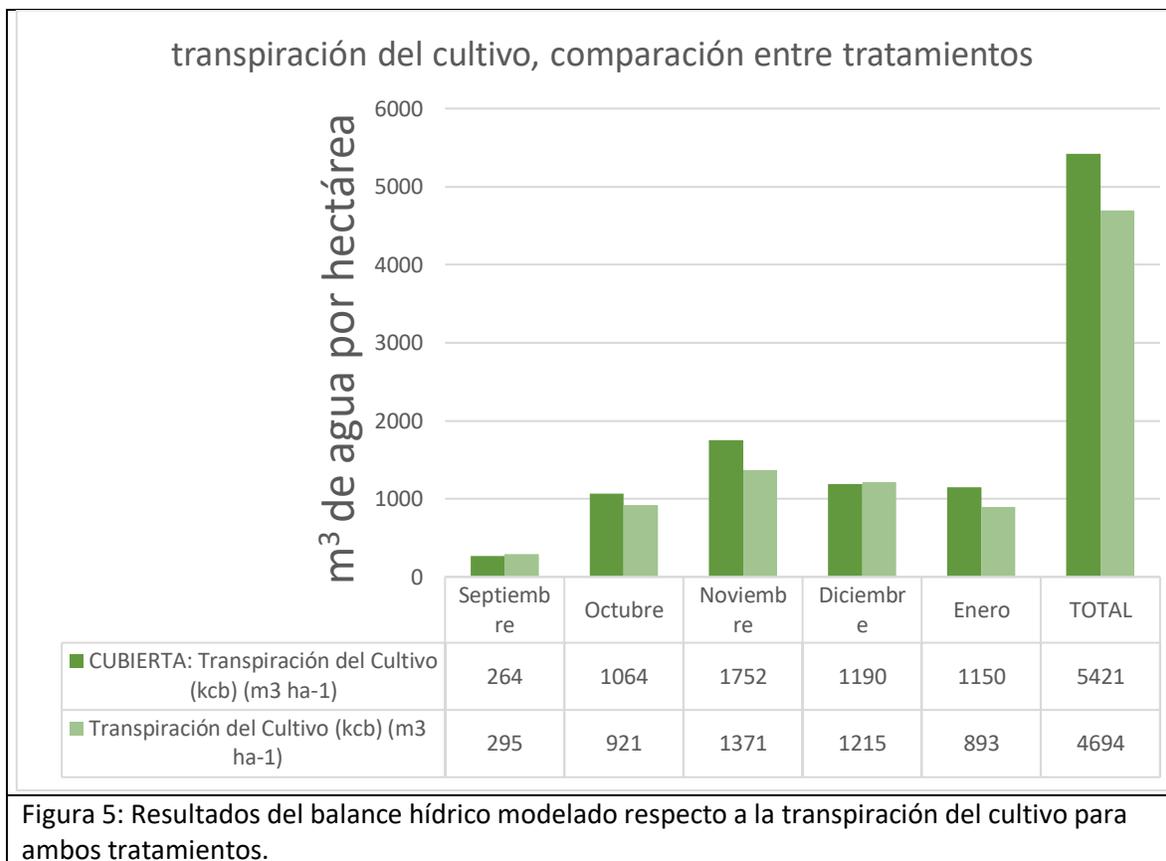


Figura 4: Resultados del balance hídrico modelado respecto a la evaporación directa de agua del suelo para ambos tratamientos.

La transpiración directa del cultivo es un uso deseable del agua, como se aprecia en la figura 5, es mayor en el caso del tratamiento con cubierta de Agropelo respecto al que no posee cubierta. Este mayor gasto transpirativo equivale a 727 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> adicionales (15% mayor de gasto), que se explicaría debido a la mejor disponibilidad de agua para la planta en el suelo, de este modo, el agua ahorrada en evaporación directa del suelo (figura 4) quedaría disponible para sostener el proceso fotosintético, lo que posibilita una mayor productividad final.



Una observación relevante para recalcar, es que para este modelo se estimó que la cubierta de Agropelo estaría reduciendo el agua que efectivamente ingresa al suelo debido a su hidrofobia propia, como no se tienen antecedentes de literatura, se consideró un 85% de eficiencia respecto a la aplicación del tratamiento sin cubierta y con riego por surcos.

Al considerar ambos componentes de balance hídrico, evaporación directa y transpiración, el uso de cubiertas habría consumido 5.891 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> vs 6.331 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, lo que significa una disminución del uso del agua de un 6,9% a lo largo de la temporada.

Los resultados de este análisis se comparan con los datos de literatura como se muestra en la siguiente tabla (4):

	Literatura (goteo) (Allen et. al. 2005)	Balance modelado (surcos) Cubierta de Agropelo
Transpiración foliar ( $K_{cb}$ )	-10 % a +30 %	<b>+15 %</b>
Evaporación del suelo ( $K_{t+e}$ )	-40 % a -90 %	<b>-71 %</b>
Evapotranspiración ( $K_c$ )	- 5 % a -35 %	<b>- 6,9 %</b>

Tabla 4: Comparación entre información de literatura (FAO 56 en varios cultivos) y los resultados obtenidos en este estudio.

En la tabla 4 anterior, se puede ver que la cubierta de Agropelo aumentaría un 15% la transpiración foliar, lo que está dentro de los rangos previstos por literatura; a su vez la evaporación del suelo disminuiría en un 71%, también dentro de los rangos mas favorables descritos por literatura. Finalmente, la evapotranspiración (suma de transpiración y evaporación) habría disminuido un 6,9%, alienado con los datos más conservadores de literatura.

## Conclusiones

En base a información de humedad de suelo obtenida de sondas capacitivas (TEROS10), se logró generar un modelo de balance hídrico de alta correlación y significancia al evaluar el ajuste de humedades de suelo modeladas y medidas.

A partir de este modelo construido, se concluye que el cultivo de maíz bajo riego por surcos en la localidad de Calama, se beneficia del uso de la cubierta de Agropelo, al ver reducida la pérdida de agua por evaporación directa del suelo en un 71% al mismo tiempo que favorecen la productividad del cultivo aumentando un 15% el agua utilizada para fotosíntesis.

Al considerar el balance combinado de evaporación directa y transpiración, se estima un ahorro de agua del 6,9% en el caso de la utilización de cubiertas para la condición dada.

Es importante considerar el componente de producción por hectárea de cada tratamiento, de modo de obtener la huella hídrica, lo que es una comparación más adecuada al evaluar el éxito de esta implementación tecnológica.

Por medio del análisis efectuado se ha cumplido el objetivo de obtener el balance hídrico con un componente de evaporación de suelo calculado como se planteó en los objetivos, así como se demostró la hipótesis del ahorro de agua con el uso de cubiertas de Agropelo.

## Bibliografía

ASCE-EWRI. 2004. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. 173 p.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration —guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization, Rome.

Calera, A, Campos, I, Osann, A, D'Urso, G and Menenti, M (2017) Remote sensing for crop water management: from ET modelling to services for the end users. Sensors 17, article no. 1104. 1–25 doi: 10.3390/s17051104.

Jensen, M. and R. Allen. 2016. Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements. Manuals and Reports on Engineering Practice No.70. Second Edition. Environmental & Water Resources Institute. ASCE. 744 p.

K. E. Saxton and W. J. Rawls (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions.

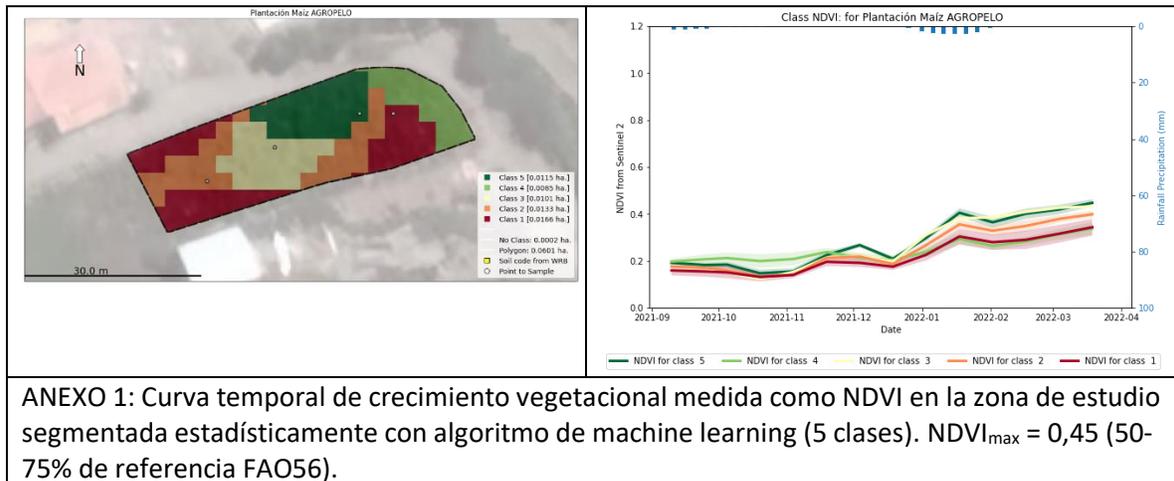
Richard G. Allen, Luis S. Pereira, Martin Smith, Dirk Raes and James L. Wright (2005). FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions.

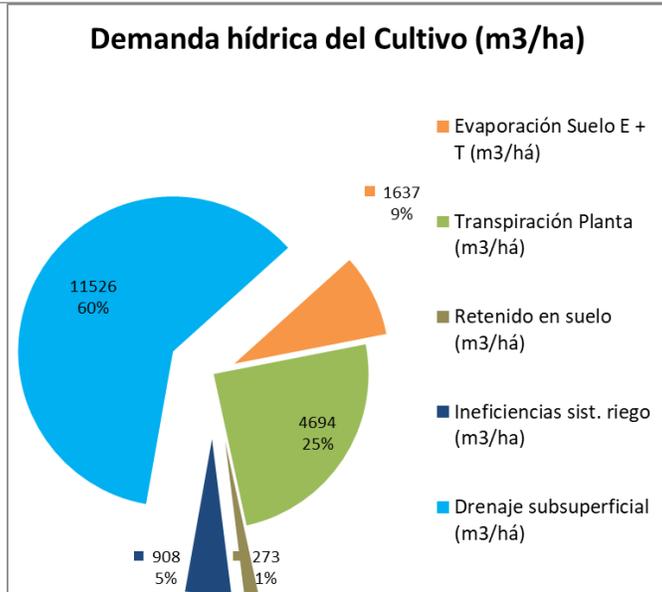
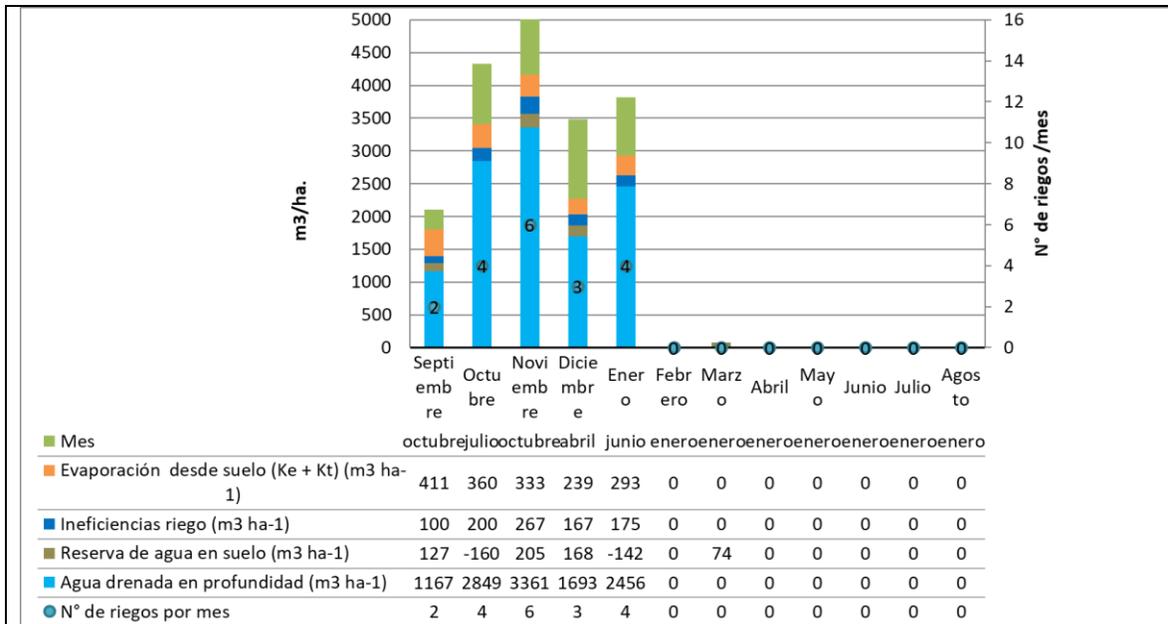
Van Genuchten, M.TH., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of American Journal 44, 892-898.

WÖSTEN, J.H.M.; LILLY, A.; NEMES, A. & LE BAS, C. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. Geoderma, 90:169-185, 1999.

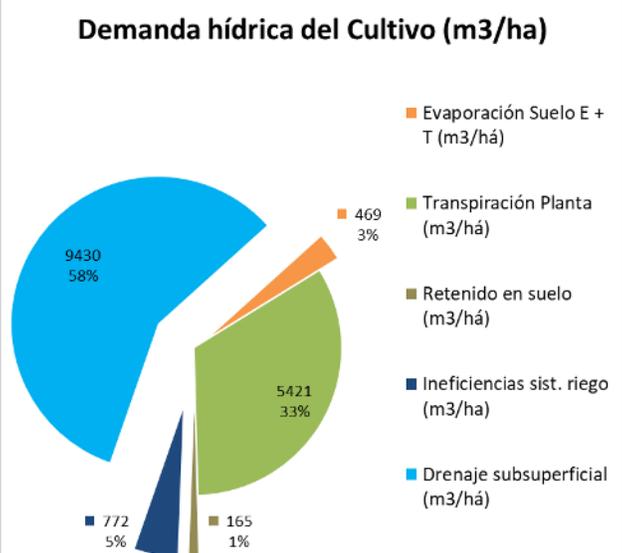
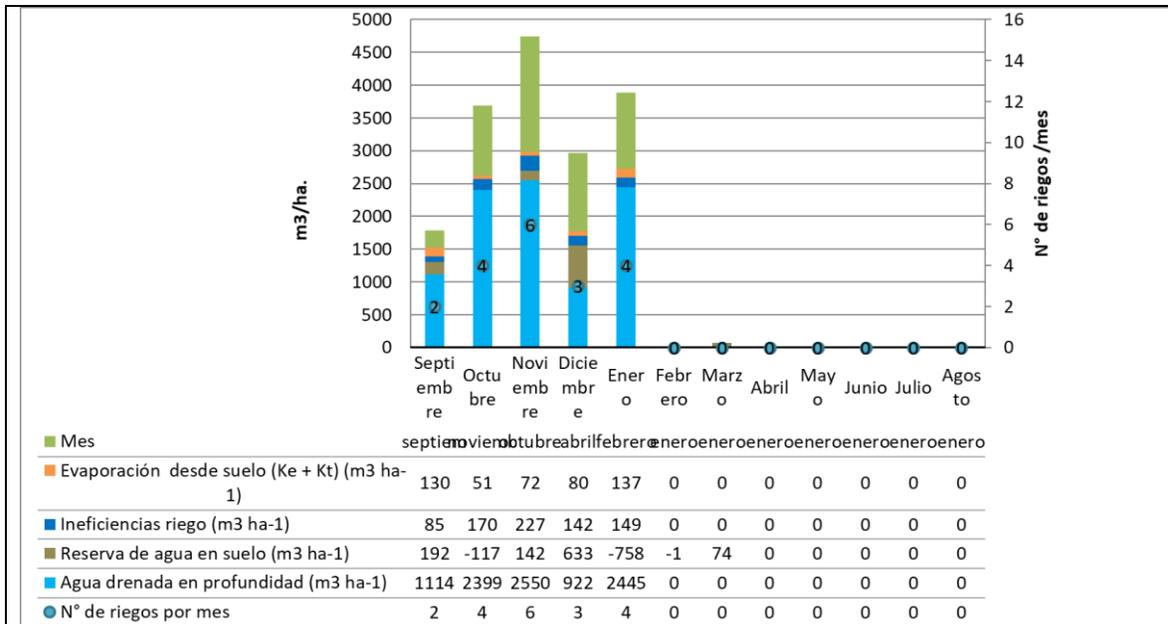
WÖSTEN, J.H.M.; PACHEPSKY, Y.A. & RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. J. Hydrol., 251:123-150, 2001.

## Anexos





ANEXO 2: Balance hídrico completo para tratamiento sin cubierta.



ANEXO 3: Balance hídrico completo para tratamiento con cubierta.