



DEPARTAMENTO DE AGRONOMÍA

Programa de Doctorado

**Ingeniería Agraria, Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural Sostenible
por la Universidad de Córdoba y la Universidad de Sevilla**

TESIS DOCTORAL

**Transferencia de la gestión del riego: evaluación y estudio de caso
del sistema de riego del Río Dulce, Argentina**

Irrigation management transfer: evaluation and study case of the
Río Dulce irrigation scheme, Argentina

Autor:

Ramiro Salgado

Dirigida por:

Dr. Luciano Mateos Íñiguez

Codirigida por:

Dr. Daniel Ricardo Prieto Garra

CÓRDOBA, MARZO 2021

TITULO: *TRANSFERENCIA DE LA GESTIÓN DEL RIEGO: EVALUACIÓN Y ESTUDIO DE CASO DEL SISTEMA DE RIEGO DEL RÍO DULCE, ARGENTINA*

AUTOR: *Ramiro Salgado*

© Edita: UCOPress. 2021
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
ucopress@uco.es



TÍTULO DE LA TESIS: Transferencia de la gestión del riego: evaluación y estudio de caso del sistema de riego del Río Dulce, Argentina.

DOCTORANDO/A: RAMIRO SALGADO

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma)

El doctorando ha tenido una excelente trayectoria en la realización del programa de doctorado de la UCO, partiendo de su gran interés y dedicación al mismo. Su compromiso con el programa ha sido total y su evolución en el tiempo, muy importante.

De los resultados de su investigación que se plasman en su tesis doctoral, se han producido dos artículos científicos de impacto, uno de ellos ya publicado y otro que ya ha sido aceptado para su publicación:

Artículo 1: Evaluation of different methods of estimating ET for the performance assessment of irrigation schemes. Publicado en Agricultural Water Management

Artículo 2: Irrigation management transfer. The experience of the Rio Dulce irrigation scheme, Argentina. Publicado en Irrigation and Drainage

Además, Ramiro Salgado ha presentado comunicaciones científicas con resultados de su tesis en congresos nacionales de Argentina y España.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 17 de marzo de 2021

Firma del/de los director/es

Fdo.: _____

Fdo.: Daniel Ricardo Prieto Garra



TÍTULO DE LA TESIS: Transferencia de la gestión del riego: evaluación y estudio de caso del sistema de riego del Río Dulce, Argentina.

DOCTORANDO/A: RAMIRO SALGADO

INFORME RAZONADO DEL TUTOR

(Ratificando el informe favorable del director. Sólo cuando el director no pertenezca a la Universidad de Córdoba)

Como tutor de la tesis del Ing. Ramiro Salgado ratifico el informe favorable del director de la tesis en base a la trayectoria excelente del candidato y a su productividad, evidenciada en la publicación de dos artículos en revistas internacionales de impacto con anterioridad a la lectura de su tesis doctoral.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 17 de marzo de 2021

Firma del responsable de línea de investigación

Fdo.: _____

Contenidos

Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tablas.....	vii
Lista de Símbolos y Abreviaturas.....	vii
Agradecimientos.....	xv
Abstract.....	xvii
Resumen.....	xxi
Capítulo 1. Introducción.....	25
1.1. La transferencia de la gestión de los sistemas de riego.....	27
1.2. La gestión del riego en el mundo.....	29
1.3. La gestión del riego en Argentina.....	41
1.4. La evaluación del desempeño de los sistemas de riego.....	42
1.5. La teledetección como apoyo a la evaluación del desempeño.....	45
1.6. El sistema de riego del Río Dulce en la provincia de Santiago del Estero, Argentina.....	49
1.7. Definición del problema	57
1.8. Objetivos de esta tesis.....	59
Bibliografía.....	60
Capítulo 2. Irrigation management transfer. The experience of the Rio Dulce irrigation scheme, Argentina.....	67
2.1. Abstract of Chapter 2.....	69
2.2. Resumen del Capítulo 2.....	69
2.3. Introduction.....	70
2.4. Material and Methods.....	71
2.4.1. Study area.....	71
2.4.2. Data collection.....	74
2.5. Results.....	77

2.5.1. Management, operation and maintenance of the transferred and non-transferred subsystems.....	77
2.5.2. Irrigation performance of the transferred and non-transferred subsystems...	79
2.5.3. Farmers' perception of the water delivery service.....	85
2.6. Discussion.....	88
2.7. Conclusions.....	90
References.....	91
 Capítulo 3. Evaluation of different methods of estimating ET for the performance assessment of irrigation schemes.....	 97
3.1. Abstract of Chapter 3.....	99
3.2. Resumen del Capítulo 3.....	100
3.3. Introduction.....	101
3.4. Material and Methods.....	104
3.4.1. Remote sensing-based evapotranspiration models.....	104
3.4.1.1. The FAO56 method to obtain K_c and VI-derived K_c	104
3.4.1.2. Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) application.....	108
3.4.2. Study area.....	110
3.4.3. Crop, weather, soils, and satellite image data.....	111
3.4.4. Analyses applied to cultivated fields in SRRD.....	114
3.4.5. Simulation analysis of interpolation errors.....	117
3.5. Results.....	119
3.5.1. Comparison of methods of estimating ET_c	119
3.5.2. Interpolation results.....	125
3.6. Discussion.....	130
3.7. Conclusions.....	133
References.....	133
 Capítulo 4. Conclusiones Generales.....	 143

Lista de Figuras

Figura 1.1. Ubicación de la provincia de Santiago del Estero en la región Noroeste de la República Argentina (NOA).	51
Figura 1.2. Ubicación del sistema de riego del Río Dulce (SRRD) en la provincia de Santiago del Estero.	51
Figure 2.1. Location of the subsystems El Alto and San Martín and boundaries of all subsystems in the Rio Dulce irrigation scheme. Location of the weather stations (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA; Servicio Meteorológico Nacional – SMN) in the Rio Dulce irrigation scheme.	72
Figure 2.2. Organizational structure of the transferred (San Martín) and non-transferred (El Alto) subsystems in the Rio Dulce irrigation scheme.	73
Figure 2.3. Relationship between the discharge measured at the farm blocks turnouts (Q_{measured}) and the discharge estimated by the water masters using local ratings (Q_{declared}) in El Alto and San Martín subsystems, Rio Dulce irrigation scheme. Current meters used: SEBA Universal Current Meter F1 (SEBA) and FP111 Global Water Flow Probe current meter (FP111).	75
Figure 2.4. Percentage of farmers interviewed who belong to a first-order water user association (WUA1st) in the farm block, receive water under arranged rotation in the farm block, measure the flow rate at the farm entrance and perceive problems with the irrigation supply. El Alto and San Martín subsystems in the Rio Dulce irrigation scheme.	78
Figure 2.5. Percentage of farmers interviewed who perceive that the water tariff in the El Alto and San Martín subsystems of the Rio Dulce irrigation scheme is low, fair, high or free.	79
Figure 2.6. Irrigation Intensity for El Alto and San Martín subsystems and for smallholder (SFB) and commercial (CFB) farm blocks, in the Rio Dulce irrigation scheme. Capital letters indicate statistically significant differences between subsystems (right box) and between farms block types within subsystems (left boxes). Lowercase letters indicate statistically significant differences between subsystems/year (left box) and between farms block types/year within subsystems (right boxes). 95% probability level (LSD test).	80
Figure 2.7. Cumulative frequency of the Irrigation Intensity for smallholder farm blocks (SFB) (a) and commercial farm blocks (CFB) (b) in three irrigation seasons, El Alto and San Martín subsystem, Rio Dulce irrigation scheme.	81
Figure 2.8. Percentage of area of alfalfa, cotton and other crops for subsystem (El Alto and San Martín), type of farm block (smallholder farm blocks, SFB, and commercial farm blocks, CFB) and irrigation season.	82

Figure 2.9. Number of irrigation turns (a) and irrigation depth applied (b) for subsystem (El Alto and San Martín), type of farm block (smallholder farm blocks, SFB, and commercial farm blocks, CFB) and irrigation season. Capital letters indicate statistically significant differences between subsystems (right box) and between farms block types within subsystems (left boxes). Lowercase letters indicate statistically significant differences between subsystems/year (left box) and between farms block types/year within subsystems (right boxes). 95% probability level (LSD test).	83
Figure 2.10. Relative Irrigation Supply (RIS) for subsystem (El Alto and San Martín), type of farm block (smallholder farm blocks, SFB, and commercial farm blocks, CFB) and irrigation season. Capital letters indicate statistically significant differences between subsystems (right box) and between farms block types within subsystems (left boxes). Lowercase letters indicate statistically significant differences between subsystems/year (left box) and between farms block types/year within subsystems (right boxes). 95% probability level (LSD test).	84
Figure 2.11. Percentage of interviewed farmers who perceive problems in the irrigation supply according to bivariate condition of the water supply, irrigation association and advice in the El Alto and San Martín subsystems.	85
Figure 2.12. Percentage of interviewed farmers who perceive problems in the irrigation supply according to the bivariate socio-economic conditions in the El Alto and San Martín subsystems.	86
Figure 2.13. Percentage of farmers interviewed who address supply claims and requests to management levels of increasing hierarchy in El Alto and San Martín subsystems.	87
Figure 2.14. Percentage of interviewed farmers who, having a first-order water users association (WUA1st) in their farm block, and participate in the WUA1st, are satisfied with the performance of the WUA1st and would accept being involved in its management in El Alto and San Martín subsystems.	88
Figure 3.1. Location of the study case Río Dulce irrigation scheme (Santiago del Estero, Argentina), the selected irrigation subsystems (El Alto and APAZ-IV), the selected crops fields, the two weather stations used in the study.	111
Figure 3.2. Segmented curve for the standard basal crop coefficient ($K_{cb,standard}$), mean VI-derived basal crop coefficient obtained from VI ($K_{cb,VI}$) for the dates of overpass satellites for cotton (a) and alfalfa (c). Segmented curve for the standard crop coefficient ($K_{c,standard}$), synthetic crop coefficient on the dates of satellite overpass and daily synthetic crop coefficient for cotton (b) and alfalfa (d). Averages are of 84 and 161 cotton crops fields and 42 and 1344 alfalfa crops fields in the El Alto and APAZ-IV subsystems, respectively, in season 2014-15. Vertical bars indicate standard deviations.....	120

Figure 3.3. Relationship between evapotranspiration estimated with the synthetic crop coefficient ($ET_{c,synthetic}$) and obtained using $K_{cb,VI}$ and computing K_s and K_e running a water balance for a given irrigation schedule and ($ET_{c,VIact}$) for the 30 selected crops fields in APAZ-IV in the season 2014-15. Triangles represent maize fields (7) and circles represent cotton fields (23).

122

Figure 3.4. Relationship between crop coefficients obtained from EEFlux ($K_{c,EEFlux}$) and the corresponding a) crop coefficient ($K_{c,VIact}$) obtained from $K_{cb,VI}$ and computing K_s and K_e running a water balance for a given irrigation schedule or b) synthetic crop coefficients ($K_{c,synthetic}$). Triangles represent maize fields and circles cotton fields on dates of overpass satellite in season 2014-15.

123

Figure 3.5. Relationship between reference evapotranspiration provided by EEFlux ($ET_{o,EEFlux}$) and recorded at the INTA weather station ($ET_{o,INTA}$) on dates of satellite overpass in the years 2014-18.

124

Figure 3.6. Evolution of $K_{c,truth}$, $K_{cb,truth}$, $K_{cb,interpolated}$, $K_{c,synthetic}$, and $K_{c,interpolated}$ in the interpolation simulation analysis for season 2014-15 and satellite overpass intervals of 15 (a) and 35 (b) days. Satellite overpass dates are indicated by diamonds. The simulation analysis was carried out for a cotton crop in the conditions of APAZ-IV.

125

Figure 3.7. Root Mean Square Error (RMSE) of daily ET_c obtained from $K_{c,interpolated}$ and $K_{c,synthetic}$ with respect to the “truth” value as a function of the hypothetical interval of satellite overpass and assuming full irrigation strategy. The simulation analysis was carried out for a cotton crop in the conditions of APAZ-IV and 30 climate years (July 1, 1988 - June 30, 2018). The vertical bars indicate the standard deviation.

126

Figure 3.8. Relative Error (RE) of seasonal ET_c obtained from $K_{c,interpolated}$ and $K_{c,synthetic}$ with respect to the “truth” value as a function of the hypothetical interval of satellite overpass and assuming full (a) and deficit (b) irrigation strategy. The simulation analysis was carried out for a cotton crop in the conditions of APAZ-IV and 30 climate years (July 1, 1988 - June 30, 2018). The vertical bars indicate the standard deviation.

127

Figure 3.9. Seasonal ET_c in 30 selected crop fields obtained by interpolating K_c derived from actual and reference evapotranspiration provided by EEFlux on days of satellite overpass represented against: a) ET_c derived from interpolation of $K_{cb,VI}$ on the days of satellite overpass and computing K_s and K_e running a water balance for a given irrigation schedule and b) ET_c derived from the synthetic crop coefficient method. In a) and b), the reference evapotranspiration was recorded at the INTA weather station. The crops were maize and cotton in APAZ-IV grown in the season 2014-15.

128

Figure 3.10. Evolution of $K_{cb,VI}$, $K_{c,VIact}$, $K_{c,interpolated}$ from EEFlux (obtained by interpolating K_c derived from actual and reference evapotranspiration provided by EEFlux) and $K_{c,synthetic}$, in a cotton field (a) and a maize field (b) from the 30 crop fields selected in APAZ-IV in the season 2014-15. Satellite overpass dates are indicated by diamonds.

129

Lista de Tablas

Table 3.1. Properties of the typical soil profile of soil classes El Simbol and La María in the study area (Angueira and Zamora, 2007). 113

Table 3.2. Series of images of satellites Landsat 7 and Landsat 8 used from EEFlux plataform. 114

Table 3.3. Area and number of fields for each crop in the study area, crop parameters used for computing evapotranspiration using the FAO56 standard procedure and from VI-derived crop coefficients. $K_{cb,standard}$: standard basal crop coefficient; $K_{c,standard}$: standard crop coefficient; $Z_{r\ max}$: maximum effective root depth; $f_{c,Kcbmax}$: fraction of soil surface covered by vegetation for maximum K_{cb} value; $NDVI_{max}$ and $NDVI_{min}$: the Normalized Difference Vegetation Index maximum and minimum, respectively; p : soil water depletion fraction for no stress. 116

Table 3.4. $ET_{c,standard}$, $ET_{c,VIopt}$ and $ET_{c,synthetic}$ of each subsystem in season 2014-15. 121

Lista de Símbolos y Abreviaturas

Símbolo/Abreviatura	Descripción	Unidad
APAZ-IV	Asociación de Productores Agropecuarios de la Zona IV	-
APAZ-V	Asociación de Productores Agropecuarios de la Zona V	-
APRA	Asociación de Productores Rurales y Afines	-
ARS	Servicio de Investigación Agrícola/Agricultural Research Service	-
c_p	specific heat of air at constant pressure	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
CFB	commercial farm blocks	-
D_r	root zone water depletion	mm
DP	water loss out of the root zone by deep percolation	mm
EEFlux	Earth Engine Evapotranspiration Flux	-

ET	evapotranspiración/evapotranspiration	mm d ⁻¹
ET_{c,interpolated}	crop evapotranspiration obtained using K _{c,interpolated}	mm d ⁻¹
ET_{c,EEFlux}	crop evapotranspiration obtained from the EEFlux platform	mm d ⁻¹
ET_{c,standard}	crop evapotranspiration obtained from the FAO56 standard procedure, using K _{c,standard}	mm d ⁻¹
ET_{c,synthetic}	ET _c obtained using K _{c,synthetic}	mm d ⁻¹
ET_{c,VIact}	ET _c obtained using K _{cb,VI} and computing K _s and K _e running a water balance for a given irrigation schedule	mm d ⁻¹
ET_{c,VIopt}	ET _c obtained using K _{cb,VI} and computing K _s and K _e running a water balance for an optimal irrigation schedule that simulates irrigation when the soil water content reaches the allowable depletion	mm d ⁻¹
ET_c	evapotranspiración de los cultivos/crop evapotranspiration	mm d ⁻¹
ET_{inst}	instantaneous evapotranspiration flux at the time of satellite overpass	mm h ⁻¹
ET_o	(grass) reference crop evapotranspiration	mm d ⁻¹
ET_r	evapotranspiración de referencia/alfalfa reference crop evapotranspiration	mm d ⁻¹
ET_{r,F}	reference ET fraction calculated as the ratio of the computed instantaneous ET _{inst} from each pixel to the instantaneous reference ET _r (mm h ⁻¹)	-
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	-

$f_{c,max}$	f_c corresponding to $K_{cb, mid}$	-
$f_{c,Kcbmax}$	f_c corresponding to $K_{cb,max}$	-
f_c	fraction of soil surface covered by vegetation (as observed from overhead)	-
f_{ew}	fraction of soil that is both exposed and wetted (from which most evaporation occurs)	-
G	soil heat flux	$W m^{-2}$
GIS	sistemas de información geográfica	-
GPS	sistemas de geo-posicionamiento global	-
H	sensible heat flux	$W m^{-2}$
I	irrigation depth	mm
ICID	Comisión Internacional de Riego y Drenaje	-
II	Irrigation Intensity	-
IMT	transferencia de la gestión del riego/irrigation management transfer	-
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria	-
IPTRID	Programa Internacional de Tecnología e Investigación en Riego y Drenaje	-
IWMI	Instituto Internacional de Gestión del Agua	-
$K_{c end}$	crop coefficient at end of the late season growth stage	-
$K_{c ini}$	crop coefficient during the initial growth stage	-
$K_{c mid}$	crop coefficient during the mid-season growth stage	-

$K_{c,VI}$	crop coefficient obtained from VI	-
$K_{c,VIact}$	crop coefficient obtained from $K_{cb,VI}$ and computing K_s and K_e running a water balance for a given irrigation schedule	-
$K_{c,bare soil}$	crop coefficient for bare soil	-
$K_{c,EEFlux}$	crop coefficient obtained from dividing $ET_{c,EEFlux}$ by reference evapotranspiration provided by EEFlux	-
$K_{c,interpolated}$	daily K_c obtained by interpolation of K_c determined on days of satellite overpass	-
$K_{c,max}$	maximum value of crop coefficient (following rain or irrigation)	-
$K_{c,standard}$	crop coefficient obtained from segmented crop coefficient curve determined by the values of K_c at the initial, mid-season and end-season, respectively $K_{c ini}$, $K_{c mid}$ and $K_{c end}$	-
$K_{c,truth}$	crop coefficient simulated with the daily water balance using the dual approach and assumed to be the "true" value for the interpolation analysis	-
$K_{c,synthetic}$	crop coefficient obtained from $K_{cb,VI}$ and Eq. 6	-
K_c	crop coefficient	-
$K_{cb end}$	basal crop coefficient at end of the late season growth stage	-
$K_{cb ini}$	basal crop coefficient during the initial growth stage	-
$K_{cb mid}$	basal crop coefficient during the mid-season growth stage	-

$K_{cb,interpolated}$	daily K_{cb} obtained by interpolation of VI-derived K_{cb} on the days of satellite overpass	-
$K_{cb,max}$	maximum value of basal crop coefficient	-
$K_{cb,standard}$	basal crop coefficient obtained from segmented basal crop coefficient curve determined by the values of K_{cb} at the initial, mid-season and end-season, respectively $K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ and $K_{cb\ end}$	-
$K_{cb,truth}$	basal crop coefficient assumed to be the "true" value for the interpolation analysis	-
$K_{cb,VI}$	basal crop coefficient obtained from VI	-
K_{cb}	basal crop coefficient	-
K_e	soil evaporation coefficient	-
K_r	soil evaporation reduction coefficient	-
K_s	water stress coefficient	-
λ	latent heat of vaporization	$J\ kg^{-1}$
λET	latent heat flux	$W\ m^{-2}$
METRIC	mapeo de la evapotranspiración a alta resolución con calibración internalizada/mapping evapotranspiration with internalized calibration	-
MINARET	MonitorING irrigated AgricultuRe ET	-
NDVI	normalized difference vegetation index	-
NOA	Noroeste de la República Argentina	-
O&M	operation and maintenance	-

P	precipitation	mm
p	soil water depletion fraction for no stress	-
r_a	aerodynamic resistance corresponding to ΔT	s m ⁻¹
ReSET-Raster	modelo rasterizado del balance de energía superficial/surface energy balance rasterized model	-
RIS	Relative Irrigation Supply	-
R_n	net radiation	W m ⁻²
RO	rainfall runoff from the soil surface	mm
SEBAL	algoritmo de balance de energía de la superficie de la tierra/surface energy balance algorithm for land	-
SFB	smallholder farm blocks	-
SMN	Servicio Meteorológico Nacional	-
SRRD	sistema de riego del Río Dulce/Río Dulce irrigation scheme	-
SWAP	modelo hidrológico suelo-agua-atmósfera-planta/hydrological model soil-water-atmosphere-plant	-
T_R	radiometric surface temperature	K
UER	Unidad Ejecutora del Servicio de Riego del Río Dulce	-
USDA	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos/United States Department of Agriculture	-
VI	índice de vegetación/vegetation index	-
VI_{max}	maximum vegetation index	-
VI_{min}	minimum vegetation index	-

WUA	asociación de usuarios del agua/water users associations	-
WUA_{1st}	WUA that take responsibility for water management within the farm block	-
WUA_{2nd}	WUA that take responsibility for water management of a tertiary canal	
WUA_{subsystem}	WUA that take responsibility for water management of a secondary canal	
Z_r	depth of the root zone	m
Z_{r max}	maximum effective root depth	m
Z_{r min}	effective root depth during the initial stage of crop growth	m
ΔT	near-surface vertical temperature difference	K
θ_{FC}	soil water content at field capacity	m ³ m ⁻³
θ_{WP}	soil water content at the permanent wilting point	m ³ m ⁻³
ρ_a	mean air density	kg m ⁻³

A mis padres

A la memoria de mis abuelos

A María Susana, Juan Cruz y María Candelaria

AGRADECIMIENTOS

A continuación menciono a diferentes personas e instituciones como una forma de agradecimiento y reconocimiento:

Tomando un orden cronológico, me gustaría agradecer a Gabriel Angella y Daniel Prieto, quienes me motivaron a realizar mi doctorado en la Universidad de Córdoba, España, y fueron quienes me recomendaron a Luciano Mateos como director de mi tesis, dada su amplia trayectoria en el riego y los sistemas colectivos de riego, temática en la cual me encontraba trabajando hace ya tiempo junto a ellos.

En 2014 tuve la posibilidad de conocer a Luciano en un congreso internacional en Fortaleza, Brasil, y pudimos comenzar a darle forma al trabajo plasmado en esta tesis como así también definir los detalles de lo que sería la puesta en marcha de mi doctorado en Córdoba.

A partir de allí, apliqué a las becas de perfeccionamiento que ofrece a sus profesionales el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA, de Argentina. La beca que INTA me brindó, me dio la posibilidad económica de radicarme por más de cuatro años en Córdoba y poder dedicarme exclusivamente a mi doctorado.

Fue así como a mediados de 2015 junto con mi mujer, María Susana, nos embarcamos para Córdoba, España, un lugar totalmente desconocido para nosotros, pero con todas las ilusiones, ansiedades y emociones que nos quitaban los temores de dejar todo atrás y nos permitían soltar amarras hacia esta nueva experiencia.

Apenas arribamos a Córdoba nos recibió David Lozano, quien fue nuestro primer contacto con lo que sería nuestro nuevo hogar e inmediatamente nos puso en órbita en la nueva ciudad.

Luciano y Helena Gómez Macpherson fueron nuestros guías permanentes en Córdoba como también parte de nuestra familia en toda nuestra estancia.

Desde allí en adelante cada persona que se cruzó en nuestras vidas aportó su granito de arena para ayudarnos tanto en la vida familiar como en mi doctorado, Elías Fereres, Hava Rapoport, Carmen Ruz, Daniel Lozano, Manolo Salmoral, Manolo López, Elena Navarro, Francisco Javier Rodríguez, Anderson Vasco, Juan Benavides, Tomás Roquette Tenreiro, David Moldero, Ángel Gonzales, Margarita García, Álvaro López, José Antonio Jiménez Berni, Carlos Salamanca, Francisco Cantero, Estela García Ponce y el resto de personas que compartieron día a día las instalaciones del Instituto de Agricultura Sostenible, IAS, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de Córdoba, el lugar de trabajo durante la realización de mi doctorado.

Fueron fundamentales los aportes y consejos técnicos de María Patrocinio González Dugo y Manuel Arriaza Balmon, claves en el desarrollo de los capítulos centrales de la tesis.

A su vez, no quiero dejar de mencionar a José Salvatierra, amigo, ejemplo de vida y compañero incondicional en el trabajo de campo, a Carlos Mitre, colega con un conocimiento del terreno invaluable, a los agricultores regantes del canal San Martín y El Alto, siempre predispuestos a compartir su día a día, a los tomeros, técnicos y profesionales de la Unidad Ejecutora del Servicio de Riego del Río Dulce de la provincia de Santiago el Estero por una cooperación sincera y completa. Todos ellos aportaron los insumos primordiales para poder desarrollar el trabajo de tesis.

También agradecer a mis padres, Paula y José Manuel, mis suegros, Susana y Jorge, y a todos los integrantes de nuestras familias que estuvieron presentes siempre, dándonos apoyo, contención y compañía.

Por último, y no menos importante, a María Susana, mi mujer y compañera de vida, por haber dejado de lado sus prioridades personales y profesionales y decidir acompañarme incondicionalmente en esta aventura que fue el doctorado.

Abstract

In a scenario of growing competition for water resources between irrigation and other sectors, such as urban or industrial, irrigation has the challenge of designing and implementing strategies to increase the use of water, guaranteeing equity and avoiding the loss of quality or the depletion of its non-renewable sources. This implies changes in consciousness and institutional necessary for users to become more active and assume shared responsibilities for water management in their region. Irrigation management transfer (IMT) involves delegating responsibilities or transferring management authority for some or all functions of diversion and / or distribution of water, maintenance and rehabilitation of infrastructure, management of disputes related to water, allocation water rights or planning crop schedules to water users associations (WUA) or other types of non-governmental organizations. The experiences of IMT in different parts of the world have been very varied, as have the approaches adopted in its implementation and the impacts of the reforms on the performance of irrigation schemes. To performance assessment of an irrigation scheme, it is advisable to use simple, effective and universally applicable indicators. Its estimation with tools related to information and communication technologies on large irrigated areas have become relevant and especially on those indicators related to the water balance that require a precise estimation. These are directly related to an improvement in the estimation of evapotranspiration (ET), the main source of water consumption in an irrigation scheme.

The Río Dulce irrigation scheme (SRRD, acronym in Spanish) is located in the north-western region of Argentina, in the province of Santiago del Estero. Despite not having a government program linked to the IMT, from 2006 to 2011 agreements were formalized for the transfer of operation and maintenance (O&M) of the secondary canals up to the level of farm block (last level of the collective system irrigation) with seven WUAs. In the SRRD, performance assessment has been on several occasions, but in no case have the results been related to the type of management, possibly because irrigation management had not been transferred to farmers or did not have a long enough period to be evaluated.

This thesis presents a comparative performance assessment of two SRRD subsystems, one where O&M has been transferred to the WUAs with another where management remains under the responsibility of the government. To performance assessment, conventional and validated indicators were used. Using technical evaluations and social

inquiry, the attitude of users in relation to their production systems, perception of the water supply service, and their participation and involvement in the WUAs were contrasted. In the subsystem where management was transferred to users, management allowed flexible delivery schedules that facilitated a diversified cropping pattern, greater irrigation intensity, and resulted in greater use of water, although it did not imply an increase in the relative irrigation supply, which denoted overall under-irrigation. Farmers in the transferred subsystem were more aware of irrigation service problems than farmers in the non-transferred subsystem. The perception of problems in the non-transferred subsystem increased with the level of professionalism and technical knowledge of the farmer. The transmission of requests and complaints from farmers to managements was more transparent in the subsystem transferred than in the non-transferred one.

With the need for precise and disaggregated information, key to the estimation of performance indicators of an irrigation scheme, a comparative evaluation of the two main remote sensing approaches for the estimation of crop evapotranspiration (ET_c), an important component of the water consumption from agriculture, was carried out. The approaches evaluated were the surface energy balance and the approach based on FAO56, which uses the ability of multispectral vegetation indices (VI) to trace the crop's growth and estimate the crop coefficient.

The first analysis used field-specific, VI-derived basal crop coefficients obtained for 1743 fields using series of 9 to 29 satellite images along the 2014-15 irrigation campaign. The second analysis used 30 fields (grown with cotton and maize) where the actual irrigation schedules in the 2014-15 irrigation campaign were known. A root zone soil water balance was computed in these fields using the FAO56 dual approach with field-specific, VI-derived basal crop coefficients. The ET_c obtained from the water balance was compared with the ET_c estimated using a single crop coefficient approach that uses field-specific VI and takes into account soil evaporation (herein called synthetic approach), and with the ET_c obtained with the METRIC surface energy balance model as facilitated by the EEFlux application. The third analysis was a simulation analysis of errors in the estimation of the ET_c due to the interpolation to daily values of single crop coefficients and basal crop coefficients determined at hypothetical satellite overpass intervals of longer than one day. The VI-derived basal crop coefficient curves obtained for the 1743 fields of the first analysis were below the locally adopted standard (not field-specific) basal crop coefficient. Crop evapotranspiration in the 8005 ha covered by this analysis was about 20 % higher when

applying standard non-field specific curves than when applying VI-derived curves. This difference pointed to the importance of using field-specific estimations of ET_c . In the analysis carried out on the 30 selected fields, the ET_c estimated using the VI-based approach agreed well with the ET_c obtained from the water balance except under water deficit conditions. The crop coefficients obtained for these fields using the METRIC model correlated with those obtained by applying the VI-based method, although the former tended to be higher than the latter in the lower value range. The analysis of interpolation errors showed that when satellite overpass frequency is greater than one week and water deficit is mild or inexistent, the interpolation of crop coefficients (for instance, of those derived from an energy balance) gives errors of ET_c estimations that are greater than those resulting from the VI-based approach. Under water deficit conditions, the VI-based approach systematically overestimates evapotranspiration.

Resumen

Frente a un escenario de creciente competencia por los recursos hídricos entre el riego y otros sectores, como el urbano o el industrial, el riego enfrenta el desafío de diseñar e implementar estrategias para aumentar el aprovechamiento del agua, garantizando la equidad de su uso y evitando la degradación de su calidad o el agotamiento de sus fuentes no renovables. Esto implica cambios de conciencia e institucionales necesarios para que los agricultores se vuelvan más activos y asuman responsabilidades compartidas de la gestión del agua en su región. La transferencia de la gestión del riego (IMT, sus siglas en inglés) implica delegar responsabilidades o transferir la autoridad de gestión para algunas o todas las funciones de desvío y/o distribución de agua, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura, gestión de disputas relacionadas con el agua, asignación de derechos de agua o planificación de calendarios de cultivos a asociaciones de usuarios del agua (WUA, su acrónimo en inglés) u otros tipos de organizaciones no gubernamentales. Las experiencias sobre la IMT en diferentes partes del mundo han sido muy variadas, al igual que los enfoques adoptados en su implementación y los impactos de las reformas sobre el desempeño de los sistemas de riego. Para la evaluación del desempeño de un sistema de riego es recomendable utilizar indicadores simples, efectivos y universalmente aplicables. Su estimación con herramientas vinculadas a las tecnologías de la información y comunicación sobre grandes áreas irrigadas han tomado relevancia y en especial sobre aquellos indicadores relacionados con el balance hídrico que requieren de una estimación precisa. Estos se relacionan directamente con una mejora en la estimación de la evapotranspiración (ET), principal fuente de consumo de agua en un sistema de riego.

En la región noroeste de la República Argentina, en la provincia de Santiago del Estero, se encuentra ubicado el sistema de riego del Río Dulce (SRRD). A pesar de no contar con un programa de gobierno vinculado a la IMT, desde el año 2006 al 2011 se formalizaron convenios de transferencia de la operación y mantenimiento (O&M) de los canales secundarios hasta nivel de derivaciones de riego (último nivel del sistema colectivo de riego) con siete WUAs. En el SRRD se ha evaluado su desempeño en varias ocasiones, pero en ningún caso se han relacionado los resultados con el tipo de gestión, posiblemente porque la gestión del riego no había sido transferida a los agricultores o no tenía un período suficientemente largo como para ser evaluado.

Esta tesis doctoral presenta una comparación del desempeño de dos subsistemas del SRRD donde en uno la O&M se ha transferido a las WUAs y en el otro la gestión permanece bajo responsabilidad del gobierno. Para evaluar el desempeño se emplearon indicadores comúnmente utilizados y validados y utilizando técnicas de evaluación social se contrastó la actitud de los usuarios en relación a sus sistemas productivos, percepción sobre el servicio de suministro de agua y su participación e involucramiento en las WUAs. En el subsistema donde se transfirió la gestión a los usuarios la gestión permitió horarios de entrega flexibles que facilitaron un patrón de cultivo diversificado, una mayor intensidad de riego y dieron como resultado un mayor uso de agua, aunque no implicó un aumento en el suministro relativo de riego, lo que denotó en general una subirrigación. Los agricultores del subsistema transferido estaban más conscientes de los problemas del servicio de riego que los agricultores del subsistema no transferido. La percepción de problemas en el subsistema no transferido aumentó con el nivel de profesionalismo y conocimiento técnico del agricultor. La transmisión de solicitudes y quejas de los agricultores a los administradores fue más transparente en el subsistema transferido que en aquel donde no se había transferido su gestión.

Con la necesidad de información precisa y disgregada, clave para el cálculo de indicadores de desempeño de un sistema de riego, se incluyó una evaluación comparativa de los dos enfoques basados en teledetección para la estimación de la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), componente clave del consumo de agua de la agricultura. Los enfoques evaluados fueron el balance de energía superficial y el enfoque basado en FAO56, que utiliza la capacidad de los índices de vegetación (VI, por sus siglas en inglés) para rastrear el coeficiente de cultivo.

En un primer análisis se utilizaron coeficientes de cultivo basales derivados de VI específicos de campo obtenidos para 1743 campos utilizando series de 9 a 29 imágenes satelitales a lo largo de la campaña de riego 2014-2015. En un segundo análisis se utilizaron 30 campos (cultivados con algodón y maíz) donde se conocían los programas de riego reales de la campaña de riego 2014-2015. En estos campos se calculó un balance hídrico del suelo en la zona de la raíz utilizando el enfoque dual de FAO56 con coeficientes de cultivo basales derivados del VI específicos de campo. La ET_c obtenida del balance hídrico se comparó con la ET_c estimada usando un enfoque de coeficiente de cultivo único que usa VI específico de campo y tiene en cuenta la evaporación del suelo (enfoque sintético), y con la ET_c obtenida del balance de energía superficial con el modelo de mapeo de la evapotranspiración a alta

resolución con calibración internalizada (METRIC, por sus siglas en inglés) facilitado por la aplicación Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) de Google, Inc. En un tercer análisis de simulación analizó los errores en la estimación de la ET_c debido a la interpolación a valores diarios de coeficientes de cultivo y coeficientes de cultivo basales determinados en intervalos hipotéticos de paso de satélites de más de un día. Las curvas de coeficiente de cultivo basales derivadas de VI obtenidas para los 1743 campos del primer análisis estaban por debajo del coeficiente de cultivo basal estándar adoptado localmente (no específico del campo). La ET_c en las 8005 ha cubiertas por este análisis fue aproximadamente un 20% mayor cuando se aplicaron curvas estándar no específicas de campo que cuando se aplicaron curvas derivadas de VI. Esta diferencia señaló la importancia de utilizar estimaciones específicas de campo de ET_c . En el análisis realizado en los 30 campos seleccionados, la ET_c estimada utilizando el enfoque basado en VI coincidió bien con la ET_c obtenida del balance hídrico del suelo excepto en condiciones de déficit hídrico. Los coeficientes de cultivo obtenidos para estos campos utilizando el modelo METRIC se correlacionaron con los obtenidos aplicando el método basado en el VI, aunque los primeros tendieron a ser más altos que los segundos en el rango de valores más bajos. El análisis de errores de interpolación mostró que cuando la frecuencia de paso elevado del satélite es superior a una semana y el déficit hídrico es leve o inexistente, la interpolación de los coeficientes de cultivo (por ejemplo, de los derivados de un balance energético) arroja errores de estimaciones de ET_c superiores a los resultantes del enfoque basado en VI. En condiciones de déficit de agua, el enfoque basado en VI sobreestima sistemáticamente la evapotranspiración.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1.

Introducción

1.1. La transferencia de la gestión de los sistemas de riego

La agricultura y la ganadería son los responsables del 70% del consumo mundial de agua y, en algunos países en desarrollo, del 95%. Probablemente, el uso de agua para riego aumentará a medida que el crecimiento de la población mundial y el desarrollo económico demanden más alimentos. Actualmente, el agua es un bien cada vez más escaso y mal gestionado. Si los patrones de consumo actuales continúan igual, en muchos lugares el agua, y no la tierra, pasará a ser el factor que limite la producción (FAO, 2018a)

Frente a un escenario de creciente competencia por los recursos hídricos entre el riego y otros sectores, como el urbano o el industrial, el riego enfrenta el desafío de diseñar e implementar estrategias para aumentar el aprovechamiento del agua, garantizando la equidad de su uso y evitando la degradación de su calidad o el agotamiento de sus fuentes no renovables.

En este sentido, es trascendental identificar el ámbito donde una gestión mejorada del riego y la aplicación de tecnología adecuada son necesarias para alcanzar con éxito los objetivos que se plantean (Perry et al., 2009).

Generalmente, las políticas vinculadas al agua buscan fomentar el uso sostenible del agua, ya que un requisito básico es que la demanda y el suministro (oferta) de agua se equilibren entre sí. Por lo tanto, cambios de conciencia e institucionales son necesarios para que los agricultores se vuelvan más activos y asuman responsabilidades compartidas de la gestión del agua en su región, donde un enfoque de gestión integral alentará a los agricultores a asumir más responsabilidades y, al mismo tiempo, reducirá su aversión a los cambios institucionales abruptos (Alcon et al., 2014).

En aquellos gobiernos de países con un sector del riego significativo, un componente clave de la política han sido las orientadas a reformas en la gestión del riego con el objetivo de delegar la recaudación de tarifas y la resolución de los conflictos, mejorar el rendimiento

de la gestión, aumentar la rentabilidad de la agricultura bajo riego y reducir el gasto público recurrente sobre la O&M de los sistemas de riego. Esto ha ido acompañado de incentivos para aumentar la participación activa de los usuarios del agua (Garces-Restrepo et al., 2007).

FAO (2018b) clasificó los proyectos de riego según la naturaleza de la propiedad en: sistemas de riego de propiedad pública; sistemas de riego de propiedad privada; y sistemas de riego de propiedad conjunta público-privada. Los arreglos institucionales pueden ser diversos y estar integrados por representantes de diversas partes interesadas, incluidos departamentos gubernamentales, instituciones/equipos de operación y mantenimiento (O&M) y los agricultores usuarios de los sistemas.

En una revisión sobre la gobernanza de las áreas bajo riego en los países en desarrollo, Playán et al (2018) definieron tres modelos básicos basados en la propiedad de los sistemas de riego: i) redes públicas de distribución con fincas de propiedad privada; ii) de propiedad pública, colectiva y privada; y iii) de propiedad colectiva y privada. En lo referido a la gestión, la situación es mucho más compleja y las variantes y arreglos institucionales son diversos.

El proceso de transferencia de la gestión de los sistemas de riego es un movimiento global con muchas variaciones y resultados. La transferencia de la gestión del riego (IMT) implica delegar responsabilidades o transferir la autoridad de gestión para algunas o todas las funciones de desvío y/o distribución de agua, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura, gestión de disputas relacionadas con el agua, asignación de derechos de agua o planificación de calendarios de cultivos a asociaciones de usuarios del agua u otros tipos de organizaciones no gubernamentales. La IMT no significa necesariamente la retirada total del gobierno, ni la privatización de los activos del sistema de riego (Vermillon & Sargardoy, 1999).

Vermillon & Sargardoy (1999) distinguieron diferentes modelos organizativos no gubernamentales básicos que se utilizan para gestionar los sistemas de riego en todo el mundo. Cada modelo tiene una forma distintiva de organizar las siguientes cuatro funciones básicas del servicio de gestión del riego: determinar cuál debería ser el servicio, regularlo, prestarlo y pagarlo.

En los países en desarrollo estas nuevas gestiones han comenzado con un modelo basado en una intervención pública muy fuerte en la mayoría de los casos y luego los procesos de IMT han dado lugar a las asociaciones de usuarios como gestores de estos

sistemas de distribución hasta la entrega final en finca (Playán et al, 2018). Estas nuevas organizaciones son comúnmente conocidas como asociaciones de usuarios del agua (WUA).

Las WUA son entidades que reúnen a los agricultores que reciben servicios de una infraestructura de riego determinada y actúan como una interfaz entre estos y las agencia de riego para la resolución de conflictos y la cooperación, y también para crear sinergia entre todas las partes interesadas (Kulkarni & Tyagi, 2012).

Las experiencias sobre la IMT en diferentes partes del mundo han sido muy variadas, al igual que los enfoques adoptados en su implementación y los impactos de las reformas sobre el desempeño de los sistemas de riego.

Para evaluar el desempeño de un sistema de riego es recomendable utilizar indicadores de desempeño simples, efectivos y universalmente aplicables y así poder someterlos a una comparación con otros sistemas o internamente a lo largo del tiempo.

La estimación de estos indicadores sobre grandes áreas irrigadas realizadas con herramientas como sensores remotos, telemetría, sistemas de información geográfica (GIS), Google Earth Engine, Internet y otras tecnologías vinculadas a los medios de comunicación han tomado relevancia en los últimos años debido a los bajos costes y ventajas físicas (González-Dugo et al., 2013; Akdim et al., 2014; Saadi et al., 2015; Calera et al., 2017; de Oliveira Costa et al., 2020).

Los indicadores de desempeño vinculados con el balance hídrico requieren de una estimación precisa, ya que se relaciona directamente con una mejora en la estimación de la evapotranspiración (ET), principal fuente de consumo de agua en un sistema de riego. Mejoras en las estimaciones precisas se pueden alcanzar utilizando técnicas de teledetección (Kustas y Norman, 1996; Bos et al., 2005).

Una vez estimados estos indicadores de manera precisa, se podrá evaluar de manera realista el potencial de mejora en la gestión del riego y poder determinar la variabilidad espacial en el rendimiento del riego entre los agricultores y definir los puntos de mejora dentro de un sistema de riego.

1.2. La gestión del riego en el mundo

El siguiente Cuadro presenta un breve resumen de algunos antecedentes sobre las experiencias en diferentes partes del mundo y se describen algunos casos que representan las

situaciones de IMT en diferentes partes del mundo, antes de referir en el apartado 1.3 el caso específico de Argentina.

ASIA

India

Desde 1985, el Ministerio de Recursos Hídricos de la India ha promovido la participación de los agricultores en la distribución del agua y la gestión del sistema terciario en los proyectos de riego y ha sido aceptado como una política del Gobierno de la India con el esfuerzo para involucrar a los agricultores de manera progresiva en varios aspectos del manejo de los sistemas de riego, particularmente en la distribución de agua y la recolección de las tarifas de agua (Shamiyulla, 2010).

Pero, existe una falta de respaldo legal y cambios de política en muchos Estados de la India donde la política no es clara a nivel gubernamental para adoptar la IMT. Además, existen problemas en los sistemas de riego deteriorados, sin seguridad y flexibilidad en las entregas de agua, sumado al temor de que, en ausencia de garantías financieras, les resulte difícil cumplir con el requisito de fondos para la operación y el mantenimiento, lo que impide que los agricultores se hagan cargo de la gestión del sistema por razones técnicas y financieras (Shamiyulla, 2010).

Un ejemplo de la IMT en India es la cuenca del río Krishna al sur de India, donde a partir de 2002 se introdujo una gestión participativa del riego con el fin de reestructurar la gestión de los Recursos Hídricos devenido de políticas implementadas a nivel nacional. Estas políticas se basaron en una antigua tradición de participación de los agricultores en el riego que fueron motivados por la necesidad de un aumento en la producción agrícola, sumado a los problemas crónicos de viabilidad fiscal, crisis presupuestarias, baja recuperación de los costos e intentando lograr un aumento en los niveles de recaudación de las tarifas. Pero, la poca claridad sobre los conceptos del nuevo sistema de gestión y la falta de autonomía financiera de las WUAs han limitado la independencia en la toma de decisiones. Esto trajo consecuencias negativas sobre la garantía en la distribución del agua, sin reglas bien definidas y sin una mejora del nivel de recuperación de costos de O&M, poca o nula resolución de conflictos, a pesar de un aumento en la productividad y área regada con el riesgo del

aumento de los monocultivos como la caña de azúcar y el arroz en el área (Poddar et al., 2011).

China

En la cuenca del río Heihe, al norte de China, en un contexto de amplio desarrollo económico y de reformas políticas enfocadas en la gestión integrada de los Recursos Hídricos, se implementó la IMT a las WUAs para encargarse de la asignación y distribución del agua, el mantenimiento de infraestructura e implementar el cobro de tarifas a los usuarios (Zhao et al., 2015).

La transferencia de la gestión se ha traducido en un aumento de la recaudación de las tarifas y la mejora en la prestación de los servicios. En lo que respecta a la participación de los usuarios, las instituciones son relativamente nuevas en la cuenca del río Heihe en sistemas de riego de propiedad estatal administrados por las WUAs y los agricultores han sido reacios a asumir las responsabilidades del gobierno donde no es obligatoria la participación, sumado a la falta de comprensión de la política de aguas y la falta de confianza en el liderazgo (Chen et al., 2005).

Zhao et al. (2015) destacaron la necesidad de un marco de planificación del agua en toda la cuenca río Heihe donde no hubo estrategias prácticas de asignación de agua en diferentes secciones dentro de toda la región y es necesaria una coordinación adecuada entre todos los actores.

Algunos casos con resultados positivos se han dado en WUAs siguiendo las premisas del Banco Mundial en las provincias Gansu, Hubei y Hunan. Estas WUAs han aumentado la eficiencia en el uso del agua, con menos conflictos entre usuarios que se extiende más allá de los límites de las WUAs, y con la percepción por parte de los usuarios de que la gestión del agua ha mejorado en general (Wang et al., 2010).

Uzbekistán

Luego de la independencia de Uzbekistán de la Unión Soviética en 1991, las reformas institucionales, implementadas de forma exógena desde arriba hacia abajo en el área de la agricultura de regadío, se basaron en la IMT impuestas a asociaciones

de usuarios de los sistemas de riego locales llamadas Asociaciones de Consumidores del Agua (Hamidov et al., 2015).

Esto ha generado que una diversidad de modelos de WUAs convivan en las áreas de riego de Uzbekistán. La mayoría de estas WUAs se establecieron entre 2003 y 2006 y han jugado un papel importante en la asignación y distribución del agua de riego, la recaudación de las tarifas del servicio y el mantenimiento de la infraestructura de riego (Abdullaev & Rakhmatullaev, 2015).

A pesar del apoyo gubernamental, la interacción entre las organizaciones estatales de gestión del agua y las WUAs han atravesado desafíos que fueron sorteados en gran medida por las acciones de los usuarios en la gestión diaria. Pero las WUAs no han producido los resultados esperados en la gestión de los recursos, sufriendo un proceso de transformación difícil, donde la transferencia de las responsabilidades de operación y mantenimiento de los canales de riego ha generado un abandono y un evidente deterioro de la infraestructura (Hamidov et al., 2015), en un contexto de aumento rápido en el número de usuarios en los sistemas, diversificación de cultivos con diferentes requisitos de agua y capacidades financiera y técnicas deficientes de las instituciones recientemente establecidas (Abdullaev & Rakhmatullaev, 2015).

Turquía

En Turquía, la transferencia de la responsabilidad de los sistemas de riego a sus usuarios se inició en la década de 1950, acelerándose en los 90. El ímpetu para este cambio dramático fue el efecto combinado de un crisis presupuestaria nacional y rápido crecimiento de los costos de mano de obra, reducción de las asignaciones presupuestarias a las agencias gubernamentales vinculadas al riego, que trajo aparejada una necesidad inminente de rehabilitación generalizada de los sistemas de riego a gran escala. En tres años, el gobierno logró la transferencia de cerca de 1 millón de hectáreas, el 61% de los sistemas de riego de gestión pública en el país, a las unidades administrativas locales o WUAs, movido por que los sistemas de riego presentaban problemas estructurales, de mantenimiento e infraestructura en constante deterioro junto con la necesidad de operar y gestionar los Recursos Hídricos de manera eficaz y eficiente (Groenfeldt and Svendsen, 2000; Kiymaz & Hamdy, 2014,

Aydogdu et al., 2015).

Parte del programa de transferencia de la gestión a las aldeas con acuerdos informales en ocasiones ha llevado a un mantenimiento deficiente de los sistemas de riego sumado a dificultades como el cumplimiento de los horarios de riego y la recaudación de tarifas de agua. En los casos de transferencias a grupos de regadores hubo un bajo recupero de los costos de O&M, baja participación y renuncia de los usuarios a hacerse cargo de la gestión de los sistemas de riego (Groenfeldt and Svendsen, 2000).

Aydogdu et al., (2015) analizaron el desempeño de las WUAs en la llanura de Harran, dentro del área del Proyecto del Suroeste de Anatolia, desde la percepción de los usuarios y destacaron su falta de satisfacción en las decisiones tomadas por los gestores. Observaron diversas ineficiencias en el aprovechamiento del agua de riego, recolección de la información y apoyo técnico a los agricultores, que se tradujeron en una falta de manejo equitativo y justo de los recursos.

Por el contrario, en Bergama, una ciudad de la provincia de Izmir en la región del Egeo, el sistema de riego operado por el Kestel WUA ha logrado aumentar la eficiencia del personal de la WUA, el suministro de agua de riego, altos niveles de recaudación de tarifas y un leve aumento de la intensidad del área bajo riego cultivada y su productividad. Los agricultores se encontraron satisfechos con las entregas de agua, los servicios de mantenimiento y reparación del sistema y en general la mayoría estuvieron de acuerdo en que se ha producido un cambio positivo en el riego con la IMT (Uysal and Atış, 2010).

Otro caso de IMT es el de la cuenca del Gediz que ha propiciado un aumento en la recaudación de las tarifas, pero con un aumento del suministro de agua de riego dado por una falta de mantenimiento y manejo inadecuado del agua por parte de los agricultores dentro de sus unidades de riego, sin un aumento significativo en el área regada (Kiymaz & Hamdy, 2014).

ÁFRICA

Sudán

En el este de Sudán, en el continente africano, sobre el Proyecto de Riego del Gash se ha implementado la IMT del sistema bajo la creencia de que el rendimiento de un sistema de riego depende en gran medida de la intervención de las WUAs.

El éxito de las WUAs en esta región se vinculó a una mayor participación de las mujeres y un mejor cumplimiento de las normas. En contraposición, uno de los problemas destacados es la falta de mantenimiento de la infraestructura y rehabilitación del sistema de riego debido a la recaudación insuficiente de las tarifas para financiar la O&M. Los usuarios, en su mayoría, son reacios a pagar las tarifas por falta de confianza y transparencia en el destino de estos fondos. A esto se le suma no pertenencia de las infraestructuras a las WUAs. Por el contrario, hay una buena labor en lo que respecta a la equidad en la distribución del agua y la resolución de los conflictos relacionado con su base tribal (Ngirazie et al., 2015).

Elshaikh et al. (2018) analizaron en el sistema de riego de Gezira, al sudeste de Sudán, a lo largo de 44 años (1970 al 2015) el papel organizativo y su impacto en el desempeño, un sistema modelo para muchos sistemas de riego en África subsahariana. A partir de 2005 la gestión del sistema de riego fue compartida, donde los canales menores pasaron a ser responsabilidad de las WUAs y el resto del sistema del estado. Durante este período, el suministro de agua fue el más alto de todos los periodos analizados y superó el 80% de las necesidades de riego de los cultivos y el desempeño del riego no mostró ningún progreso, por el contrario, el sistema enfrentó un mayor deterioro.

FAO (2015a) destacó que en Sudan la calidad de las WUAs era débil con una mala gestión del agua de riego a nivel de campo debido a que emplea personal sin experiencia. Se presentaron conflictos en la gestión del agua y disputas por demoras y entrega inadecuada del agua de riego a los campos, sumado a que no presentaban líneas presupuestarias y sin fondos para cumplir con sus obligaciones. Las WUAs sin experiencia se vieron socavadas por la administración del sistema e influencias externas a sus administraciones.

Sudáfrica

Luego de la democratización de Sudáfrica en 1994, las responsabilidades de gestionar el agua de riego fue delegada a las comunidades de agricultores a través de la adopción de la IMT. La IMT tenía como objetivo la cooperación exitosa entre los agricultores para minimizar los conflictos sobre las asignaciones de agua y el mantenimiento del sistema basado en asegurar que la limpieza y las reparaciones se realicen a lo largo de los canales primarios y subordinados de manera oportuna y efectiva (Van Averbeké, 2008).

Un ejemplo de la IMT en Sudáfrica fue el de los sistemas de riego en la provincia de Limpopo que cuenta con 57.7% de los sistemas de riego para pequeños agricultores del país. La transferencia y el retiro progresivo del estado produjeron un aumento gradual en el poder del agricultor, cambiando la interpretación de las reglas que regían la gestión del agua y propiciando a los usuarios un mayor margen de maniobra. Esto dio lugar a grandes desigualdades en el acceso al agua de riego, provocando ineficiencias económicas y exigiendo grandes cantidades de tiempo y esfuerzo por parte de los gestores para mantener los sistemas operativos, destacando la necesidad de incorporar estructuras de gestión a niveles superiores para hacer cumplir las reglas (Van Averbeké, 2008).

En un sistema de riego del río Mooi en la región de Midlands de la provincia de KwaZulu-Natal, la IMT a comités formados por agricultores aumentó los valores de eficiencia de transporte en comparación a cuando el mismo sistema era administrado por el gobierno, pero con desigualdades en los tiempos de entrega y suministro de agua de riego a los agricultores. Los agricultores han sugerido formas de mejorar el rendimiento priorizando el cumplimiento de la programación de riego y luego la inspección de infraestructura de riego de rutina, reemplazar los canales por tuberías, revestir canales, introducir tarifas sobre el agua de riego, reutilizar el agua de la cola y, con una menor prioridad, aplicar una medición volumétrica del uso del agua de riego en cada bloque administrado por los comités (Gomo et al., 2014).

Particularmente, en los sistemas de riego transferidos a los pequeños productores sudafricanos el complejo contexto de limitaciones productivas y económicas que enfrentaron les impidió absorber el costo adicional y la responsabilidad de gestionar los sistemas de riego (Shah et al., 2002).

Mauritania

En la República de Mauritania, la agricultura se limita a una estrecha franja a lo largo del Río Senegal, donde se concentra la mayor parte de la producción de alimentos del país.

Las políticas de desarrollo de los años 1990 se orientaron al riego a pequeña escala y fueron promovidas como el enfoque y la escala correctos para lograr el crecimiento económico y el desarrollo rural a través de la transformación social y el acceso a las tecnologías subvencionadas. Pero las Juntas de las Cooperativas, gestores de los sistemas de riego, no lograron satisfacer el servicio de suministro de agua, agravado por la falta de mantenimiento con un abandono progresivo de las parcelas agrícolas (García-Bolaños et al., 2011).

Los grandes sistemas de riego se encuentran cogestionados por agencias privadas y representantes de las cooperativas, con una gestión mixta privada-pública o gestiones públicas en proceso de transferencia. Los actores del gobierno lo hacen a nivel de canales principales y secundarios junto a uniones de cooperativas, las cooperativas a nivel terciario y los agricultores a nivel de parcela. Estos sistemas presentan una gran variabilidad en el desempeño y la intensidad del riego, problemas de mantenimiento y una difusa distribución de las tareas entre gestores sumado a factores económicos y socio-organizativos (Borgia et al., 2012).

Sin embargo, ni el tipo de gestión o la escala del sistema han tenido influencias en el desempeño de los sistemas de riego, ya que la variabilidad y la brecha de rendimiento junto a la eficiencia técnica se presentan como grandes problemas en todas las situaciones y tipos de sistemas (Borgia et al., 2013).

AMÉRICA LATINAMéxico

El gobierno mexicano inició el programa de IMT a finales de la década de 1980 en respuesta a las crecientes presiones presupuestarias en un momento de crisis financiera en México. Los objetivos de la IMT fueron: asegurar la sostenibilidad de los distritos regados, reducir la carga financiera sobre el gobierno, pasar la

responsabilidad de O&M a los usuarios, aumentar la eficiencia del uso del agua, mejorar y mantener el rendimiento del sistema y reducir el número de empleados públicos en los distritos de riego (Johnson, 1997).

A su vez, el gobierno mexicano quería la participación de los usuarios del agua en el esfuerzo por llevar los distritos de riego a sus antiguos niveles altos de productividad. Además, su objetivo era mejorar su viabilidad, al mismo tiempo que reduciría los costes tanto para los agricultores como para el gobierno (Rap, 2006).

Como resultado, la IMT ha reducido el gasto público en la gestión del riego al lograr un mayor grado de recuperación de costos, con un alto grado de autosuficiencia y autonomía financiera al poco tiempo de implementada (Johnson, 1997), pero debido al proceso inflacionario y el contexto político esto se revirtió y las tarifas no se ajustaron a la inflación monetaria (Rap, 2006).

La IMT no ha tenido un impacto importante en el aumento de la producción de cultivos (Johnson, 1997). En algunos casos, las WUA no han mejorado la distribución del agua, pero si en los servicios de mantenimiento de la infraestructura (Groenfeldt & Svendsen, 2000; Rap, 2006). En otros, el agua no se distribuye por volumen, como se especifica en la ley, la cual presenta deficiencias al respecto (Groenfeldt & Svendsen, 2000).

Colombia

En Colombia, a principios de la década de 1970 la transferencia de la administración de los distritos de riego a las WUAs comenzó como resultado de una iniciativa aislada de un grupo de agricultores en lugar de como una política o programa específico de desarrollo de tierras (Groenfeldt & Svendsen, 2000).

La IMT solo implicó la entrega de la administración de los distritos a las WUAs. La infraestructura y los activos involucrados continuaron siendo propiedad del gobierno limitando el sentido de propiedad por parte de la WUA e inhibiendo el desarrollo de su capacidad administrativa, con una transferencia lenta e incluso dilatoria. A su vez, las restricciones presupuestarias retrasaron la rehabilitación en muchos distritos y, en otros, la finalización de la misma. (Groenfeldt & Svendsen, 2000).

Por el contrario, las prácticas de gerenciamiento se ajustaron más a la realidad de los usuarios, con una administración más comprometida, no solo con los agricultores locales, sino también con la prestación de servicios siendo oportunos y equitativos (Groenfeldt & Svendsen, 2000).

En una segunda etapa de IMT lanzada por el gobierno colombiano alrededor de los 90, se transfirió el sistema de riego Samaca, al este del departamento Boyaca en el centro de Colombia. Luego de un proceso lento y con los agricultores asumiendo el incremento en las tarifas de riego, la WUA obtuvo todas las responsabilidades. La IMT no tuvo efectos sobre los suministros de agua de riego, la capacidad de entrega de agua de riego del sistema o el área cultivada bajo riego. La WUA, luego de la transferencia, continuó aplicando los mismos procedimientos de manejo del sistema que la agencia del gobierno, con una reducción drástica de los subsidios para mantenimiento y una disminución de la recaudación de las tarifas de riego a pesar de poder cubrir los costos de O&M (De Fraiture & Garces-Restrepo, 1997).

Chile

En Chile, las sociedades de regantes, datan del siglo XIX y actualmente administran el agua tanto a nivel de sistema de riego, como de ríos (Palerm-Viqueira & Martínez Saldaña, 2009).

En 1981 la reforma del Código Nacional de Agua chileno permitió que los derechos de propiedad fuesen transferibles entre privados para el uso del agua (Hearne & Easter, 1995). La liberalización del agua en Chile (1998-2005) asignó los derechos de agua perpetuos sin vincularlos a la tenencia de la tierra, lo que generó un mercado de agua activo (Playán et al., 2018).

Los mercados del agua se introdujeron con el objetivo de incrementar la disponibilidad del recurso a través del aumento de su eficiencia (física y económica), explorar nuevas fuentes, mejorar la calidad y minimizar el impacto ecológico evitando el efecto a terceros (Gazmuri, 1994).

Las WUAs han sido las propietarias y encargadas de todos los sistemas de riego del país y pertenecen y están operadas por sus miembros. Cobran tarifas basadas en sus costos de capital y de operación, mantienen los sistemas de canales, llevan un

registro de titulares de derechos, distribuyen el agua a los titulares de derechos individuales y son las encargadas de hacer cumplir los derechos de agua (Hearne & Easter, 1995). En algunos casos están bien organizadas y con capacidades para mantener y mejorar su infraestructura de riego. Son un modelo participativo y ofrece garantías a los miembros (Playán et al., 2018).

La IMT ha implicado mejoras en el mantenimiento de los sistemas ajustándose a las prioridades de los agricultores. La mejora en la viabilidad financiera se relacionó con la alta productividad agrícola y económica del regadío, donde los impactos financieros de la IMT se han dado sobre los costos del riego con una disminución del gasto gubernamental, un aumento en el costo del riego para los agricultores y el aumento en el cobro de tasas a los agricultores (Vermillion, 1997).

Por el contrario, la ausencia de un organismo de ejecución que oriente y organice las WUAs locales y la gestión de grandes sistemas hidrológicos está provocando una mala coordinación y una mala planificación hidrológica en áreas donde los recursos hidrológicos son críticos (Playán et al., 2018).

AUSTRALIA Y ESPAÑA

Australia

Un contexto de aumento de los costos, una operación deficiente de los sistemas de riego y la propia iniciativa de los agricultores para hacerse cargo de la gestión, junto a la implementación de los mercados de agua en la cuenca del Murray-Darling en Australia, motivaron la transferencia de la propiedad y la gestión a empresas, fideicomisos o cooperativas privadas, siempre compuestas por los regantes como accionistas (Mapson & Poulton, 2001).

La misma trajo aparejada una reducción de la inversión por parte del gobierno dada por un aumento en la eficiencia en la recaudación de tarifas, la calidad del mantenimiento y la puntualidad en el suministro de agua en relación a la situación previa a la IMT. En contraposición, el Estado tuvo que intervenir y comprar títulos de agua para hacer frente a los caudales ambientales y mantener la salud de los ríos. Sumado a esto, no se han observado cambios en los rendimientos agrícolas ni en el

aumento de la superficie regada. Tampoco hubo diferencias en la eficiencia del suministro de agua. El impacto negativo se ha observado en el abandono del sector por parte de agricultores por venta de sus derechos perjudicando el grado de participación en las instituciones (Poddar et al., 2011).

España

En España, las Comunidades de Regantes son asociaciones de usuarios del agua regadas por sistemas y reglas propias, que data de los romanos y árabes, y se encuentran profundamente enraizadas en la conciencia popular. Su función principal es la distribución de agua en la zonas regables, pero también deben propender a una gestión integrada de los Recursos Hídricos, la recuperación de costes incurridos por los servicios prestados, incluidos los ambientales, y la participación ciudadana como elemento básico en el proceso decisional (Soto-García et al., 2013).

Soto-García et al. (2013) analizaron el desempeño de las comunidades de regantes en Murcia. Las mismas se caracterizan por un valor de la producción agrícola muy alto, con una gran eficiencia de distribución, pero también con unos elevados costes de manejo del sistema y una gran variación en la disponibilidad de recursos hídricos, este último factor determinante en el rendimiento de estas comunidades.

Un análisis del desempeño aplicado a siete WUAs ubicadas en Castilla-La Mancha (España) determinó que las WUAs con sistemas de riego por aspersión con cultivos con altos requerimientos de agua aplicaban más agua por unidad de superficie que aquellas con sistemas de riego por goteo que presentaban cultivos con bajos requerimientos de agua, con grandes diferencias en el costo total de administración, operación y mantenimiento entre WUAs relacionados a los volúmenes suministrados y diferencias en los costos de bombeo. A su vez, las WUAs con sistemas de riego por aspersión presentaron diferencias entre las redes operadas a la demanda y las que operan bajo un programa de rotación y en las de sistema de goteo por el tipo de cultivos predominante (Córcoles et al., 2010).

Un estudio de caso sobre cinco comunidades de regantes en la cuenca del río Segura, al sureste de España, con un contexto de clima catalogado en 2009 como de

tercer nivel más alto de estrés hídrico en Europa según la Agencia Europea de Medio Ambiente y con el origen del agua utilizada para el riego diverso (fuentes superficiales, subterráneas, trasvases de ríos y fuentes menores como desagües, plantas de tratamiento de aguas residuales y plantas de desalinización), permitió identificar los puntos de mejora del rendimiento de los sistemas de riego (Alcon et al., 2017). Alcon et al. (2017) sugirieron que las comunidades de regantes deberían usar preferiblemente el método de asignación de agua a la demanda, adoptar políticas de aumento de tamaño para obtener economías de escala, optimizar la red de riego a presión y adoptar, junto con las autoridades de la cuenca, políticas que garanticen los recursos hídricos a los agricultores apelando a la acción colectiva para lograr menores precios de la energía para lograr aumentos de rentabilidad.

Rodríguez-Díaz et al. (2004) evaluaron comparativamente de manera detallada el desempeño de cinco de los distritos de riego más representativos de Andalucía. Concluyeron que en aquellos distritos de riego con suministro de agua con redes presurizadas el costo de administración, operación y mantenimiento por unidad de área fueron mayores que en aquellos que utilizan agua conducida por gravedad sin costos de energía. Por lo tanto, en los primeros los agricultores utilizan el agua de manera más eficiente por su alto costo y la producción por volumen de agua utilizada es mayor debido a un menor uso de agua de riego.

1.3. La gestión del riego en Argentina

La Argentina presenta un sistema de gobierno representativo y federal, compuesta por 23 gobiernos provinciales y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Su Constitución, luego de la reforma de 1994, reconoce a las provincias todo el poder no delegado a la Nación, dentro del cual se encuentra el dominio originario de los Recursos Naturales existentes en su territorio. No existe un Código o una Ley de Aguas de alcance nacional y cada provincia se rigen por sus propios códigos o leyes vinculadas al agua.

En el caso de la provincia de Mendoza el regadío está presente desde antes de la llegada de los españoles. En 1884 se sancionó la Ley de Aguas provincial que estableció las pautas para la gestión y distribución del agua de riego. La operación y mantenimiento se transfirió a las WUAs denominadas Inspecciones de Cauce que presentan un alto grado de autonomía presupuestaria y autosuficiencia (Pochat, 2005).

A pesar de presentar una gestión del riego altamente participativa, la misma disminuye a medida que aumentan las instancias administrativas hacia arriba en la línea jerárquica institucional, alejando a los usuarios de los niveles donde se toman las decisiones e incrementando los costos administrativos para solventar el funcionamiento de estas instituciones (Marre et al., 1996).

En San Juan, provincia ubicada en la región de Cuyo, los organismos descentralizados son las Juntas Departamentales y las Comisiones de Regantes que cuentan con participación de los usuarios y tienen a su cargo la O&M a diferentes escalas (Miranda et al., 2015).

Miranda et al. (2011) destacaron que la participación real de los usuarios ha sido escasa y poco representativa, a pesar de que la integración de los organismos descentralizados vinculados al riego se deberían decidir a través del voto obligatorio. Las acciones conjuntas de usuarios son poco frecuentes, lo cual refuerza otra serie de problemas existentes, tales como: bajos niveles de recaudación, débil o nula coordinación para la programación del riego (turnado) entre regantes de un mismo canal, alta centralización en la toma de decisiones respecto a la gestión del agua, lo que dificulta que éstas consideren el punto de vista de los usuarios y disminución y pérdida de la aptitud agrícola de muchas tierras, lo que ha llevado a que casi la mitad de la superficie provincial con derecho de riego a estar sin cultivar.

1.4. La evaluación del desempeño de los sistemas de riego

La evaluación del desempeño es un componente de la gestión de un sistema de riego que no siempre ha sido ejecutado, pero que se hace imprescindible en un mundo con una creciente demanda de alimentos y población, donde la escasez de agua limita cada vez más la producción agrícola, y los sectores emergentes compiten por los recursos hídricos disponibles.

La evaluación del desempeño es una tarea compleja porque el desempeño de un sistema de riego está influenciado por numerosas variables como el clima, la oferta de recurso, el diseño del sistema, su gestión, operación y su entramado socio-económico. Para llevarla a cabo, es necesario enfocarse en las características comunes de la agricultura de regadío (agua, tierra, finanzas y producción de cultivos) y comprender cómo la agricultura bajo riego está funcionando en varios entornos (Molden et al., 1998).

El análisis del desempeño de un sistema de riego habitualmente utiliza una amplia gama de indicadores basados en valores promedio para toda el área que se requieren para la gestión del día a día (Bos, 1997; Molden et al., 1998; Burt y Styles 1999; Malano and Burton, 2001). Algunos de estos indicadores de desempeño se refieren a los procesos internos de la organización y pueden no ser adecuados para su uso en comparaciones con otras organizaciones, aunque su información puede ser muy valiosa para el análisis de diagnóstico durante el proceso de comparación (en inglés Benchmarking), para encontrar la causa de determinados niveles de desempeño.

En las últimas décadas se han llevado a cabo varios esfuerzos para formular un marco y pautas para la evaluación del desempeño de los sistemas de riego. Ejemplos relevantes de estos esfuerzos son el “*Performance and Impact Assessment Program*” (Molden et al., 1998); la “*Guidelines for Benchmarking in the Irrigation and Drainage Sector of the International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage*” (Malano and Burton, 2001); y el “*Task Force on Benchmarking of Irrigation and Drainage Projects of the International Commission on Irrigation and Drainage*” (Malano et al., 2004).

El Instituto Internacional de Gestión del Agua (IWMI, por sus siglas en inglés) encargó a varios científicos del instituto e instituciones colaboradoras para obtener y analizar información de diferentes países a través de un conjunto de indicadores aplicados en varios sistemas de riego. Se documentaron y compararon los atributos clave del desempeño de un conjunto de sistemas de riego en distintos entornos para comprender la posición de cada uno con respecto a la utilización productiva de la tierra y el agua del conjunto, identificando así los ámbitos de mejora (Molden et al., 1998).

El Banco Mundial, a través del Grupo Consultivo del Programa Internacional de Tecnología e Investigación en Riego y Drenaje (IPTRID, por sus siglas en inglés), en 1999 lanzó un estudio de investigación para desarrollar directrices para el Benchmarking en el sector de riego y drenaje, identificar indicadores de desempeño simples, pero efectivos y aplicables universalmente, y formular y probar en el campo una metodología de Benchmarking para el sector del riego y drenaje describiendo los procesos y procedimientos involucrados. El estudio se llevó a cabo como una iniciativa conjunta de las instituciones asociadas de IPTRID, a saber, el Banco Mundial, la FAO el IWMI y la Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID, por sus siglas en inglés) (Malano and Burton, 2001).

El Grupo de trabajo para la Benchmarking de Proyectos de Riego y Drenaje (en inglés: *Task Force on Benchmarking of Irrigation and Drainage Projects*) se constituyó para promover el programa de evaluación comparativa en los países miembros de la ICID con un énfasis particular en los países clave del riego. En junio de 2004 se publicó un número especial sobre el Benchmarking en el Sector del Riego y Drenaje en la revista "*Irrigation and Drainage*"(53.2) que introdujo el concepto de Benchmarking en el sector del riego y drenaje y describió las iniciativas para introducir la evaluación comparativa para los sistemas de riego y drenaje en varios países del mundo (Malano et al., 2004).

Malano y Burton (2001) definieron al Benchmarking como “un proceso de aprendizaje del propio funcionamiento pasado y de la actuación de los demás en la búsqueda de la mejora continua”. Esto permite conocer la situación de base, determinar sus relaciones causales y, a partir de metas, monitorear su evolución temporal.

La clave para una evaluación del desempeño efectiva se encuentra en definir los indicadores a utilizar. Los indicadores del desempeño internos permiten evaluar las prácticas cotidianas de operación de un sistema y valorar los procesos que, en su conjunto, determinan los resultados globales. Los indicadores externos del desempeño se utilizan para definir una planificación estratégica de la organización, evaluando los diferentes niveles del sistema, siendo los adecuados para estudios comparativos y la identificación de dónde se requieren estudios más detallados.

Como indicadores externos del desempeño de un sistema de riego encontramos al suministro de agua y de agua de riego, producción y productividad, los vinculados al desempeño financiero, al ambiental y social. Como indicadores internos del desempeño de un sistema de riego encontramos a la calidad de infraestructura, calidad de operación, servicio de distribución y participación de los usuarios, entre otros.

Por ello, la mejora en la gestión del riego en todos los niveles de un sistema de riego está relacionada directamente con la evaluación del desempeño y con su comparación continua tanto interna como externamente, lo que permitirá identificar los puntos críticos y determinar los ámbitos de mejora.

1.5. La teledetección como apoyo a la evaluación del desempeño

La necesidad de información precisa y disgregada, clave para el cálculo de indicadores de desempeño de un sistema de riego, habitualmente se obtiene de los registros globales de entrega de agua y de las estimaciones de consumo de agua derivada de las áreas cultivadas que normalmente posee una cierta incertidumbre y pueden enmascarar los diferentes resultados a niveles inferiores del sistema.

Una recomendación es evitar la excesiva dependencia de información recogida de fuentes secundarias, como las oficinas de las agencias. Y cuando se utiliza este tipo de información, deben tomarse muestras de forma independiente para poder validarla (Vermillion, 1997).

El sector de la agricultura, las economías rurales, las comunidades y la gestión de los recursos naturales están viviendo un proceso de transformaciones impulsadas por las tecnologías digitales disruptivas e innovadoras, donde la globalización y la digitalización dinámica son las principales promotoras. Estas transformaciones están produciendo cambios en el comportamiento de los agricultores dado por un cambio en la gestión generalizada de los recursos hacia una gestión altamente optimizada, individualizada, inteligente y anticipada, en tiempo real, hiperconectada e impulsada por datos (Trendov et al., 2019).

Gracias al avance de las tecnologías móviles (teléfonos inteligentes), uso de los servicios remotos, el acceso a internet en zonas rurales, etc., la dificultad de obtener información de los agricultores es cada vez menor.

Para la validación de esta información recogida, las herramientas digitales modernas, como la teledetección, el uso de sistemas de información geográfica (GIS) y los sistemas de geo-posicionamiento global (GPS), se presentan como prometedoras (Bastiaanssen et al. 2000).

Un componente importante de los indicadores de desempeño utilizado en la evaluación de los sistemas de riego es el consumo de agua de riego por su relevancia al momento de comprender el balance hídrico y sus componentes en un área específica a diferentes escalas. Su estimación con una cierta periodicidad y precisión, es algo que los gestores y planificadores del agua están teniendo muy en cuenta al momento de tomar sus decisiones en muchas partes del mundo, aunque aún falta una mayor aplicación en países donde la gestión es menos tecnificada. (González-Dugo et al., 2013).

La ET es uno de los componentes claves del consumo de agua de la agricultura, ya que transfiere a través de la evaporación del suelo y la transpiración de los cultivos importantes volúmenes de agua a la atmósfera. Cuantificar esos consumos con confiabilidad y exactitud en grandes áreas y dentro de los sistemas de riego, en particular, es trascendente para realizar los balances hidrológicos, la planificación del aprovechamiento de los recursos hídricos, la regulación del agua, la concesión y gestión de los derechos de agua, etc..

Para lo anterior, adquiere gran importancia para todos los actores de los diferentes niveles de un sistema de riego, diferenciar la ET real de la potencial con una periodicidad y una resolución espacial que alcancen a individualizar unidades de riego (Allen et al., 2007a).

Durante las últimas décadas se han desarrollado diferentes enfoques, técnicas y métodos asociados a la teledetección para la estimación de la ET (Bastiaanssen, 1998; Allen et al., 2011; Kamble et al., 2013; Mateos et al., 2013), se han desarrollado plataformas en la web que permiten el acceso libre a información derivada de diferentes constelaciones de satélites con cierta periodicidad y alta resolución, como escenas de los satélites Landsat en la aplicación Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) de Google, Inc. (Allen et al., 2015), y se robustecen constantemente softwares libres y de código abierto para el tratamiento de la misma, como QGIS (QGIS Development Team, 2019). Todos estos desarrollos son un activo importante para el riego y la gestión de los recursos hídricos al permitir determinar de manera precisa y cuantitativa los procesos que determinan las relaciones suelo-vegetación-atmósfera, en la superficie terrestre.

Existen dos enfoques principales para estimar la evapotranspiración de los cultivos (ET_c) asistidos por técnicas de teledetección en los estudios de uso del agua agrícola (González-Dugo et al., 2009; Taghvaeian y Neale, 2011). El primero, calcula el balance de energía de la superficie utilizando la temperatura de la superficie radiométrica (derivada de imágenes de banda térmica) para estimar el flujo de calor sensible y obtener ET como un residuo del balance de energía (Kustas y Norman, 1996; Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007a). El segundo, se basa en la capacidad de los índices de vegetación (VI) multiespectrales (derivados de los datos de reflectancia de la superficie) para estimar con precisión el crecimiento del cultivo y estimar el coeficiente del cultivo (Bausch y Neale, 1989; Pôças et al., 2020). Este método, a menos que esté acoplado a un balance hídrico del suelo, no tiene en cuenta ni la evaporación del suelo, ni la reducción de la transpiración debido al cierre estomático en condiciones de estrés hídrico. Sin embargo es de utilidad porque genera coeficientes de cultivo distribuidos espacialmente que, multiplicados por una

evapotranspiración de referencia (estimada diariamente a partir de datos de estaciones meteorológicas locales) permiten estimar la ET_c específica del campo (González-Dugo et al., 2009).

Se han aplicado diversas formas del enfoque del balance de energía de la superficie utilizando teledetección para las estimaciones de ET a escala de sistemas de riego. Para evaluar el desempeño de un área irrigada en el oeste de Turquía, Droogers y Bastiaanssen (2002) combinaron el modelo hidrológico suelo-agua-atmósfera-plantas (SWAP, por sus siglas en inglés) con la aplicación de sensores remotos para evaluar la distribución espacio-temporal real de algunos parámetros input de SWAP utilizando como referencia la ET estimada en base al algoritmo de balance de energía de la superficie de la tierra (SEBAL, por sus siglas en inglés). La combinación permite llenar los vacíos temporales entre las imágenes satelitales con el modelo hidrológico y superar la limitación de la aplicación de los modelos hidrológicos a partir de la generación de información distribuida de varios parámetros de ingreso al modelo. Los sensores remotos aportaron la distribución espacial de los cultivos, la variación espacio-temporal del área foliar, fechas de siembra y evapotranspiración de referencia (ET_r), destacándose también las ventajas de la metodología basada en teledetección por su necesidad de una menor cantidad de datos de campo para la estimación de ET en grandes áreas.

Del mismo modo, Taghvaeian et al. (2018) calcularon un balance hídrico utilizando ET estimada con SEBAL, para obtener indicadores de desempeño del riego como equidad, adecuación y sostenibilidad distribuidas espacialmente para el Distrito de Riego de Palo Verde en el sur de California, Estados Unidos. El estudio destacó un consumo de agua a nivel de campo y la información distribuida espacialmente permitió detectar la variabilidad de ET actual facilitando a los administradores de riego la localización de campos no uniformes y centrando su atención en investigar posibles razones y posibles soluciones.

Allen et al. (2007b) utilizaron el mapeo de la evapotranspiración a alta resolución con calibración internalizada (METRIC, por sus siglas en inglés) para mapear la ET en los distritos de riego en Idaho, California y Nuevo México (Estados Unidos) y cuantificando las ET mensual y por temporada para contabilizar los derechos de riego y la determinación de poblaciones de coeficientes de cultivo y sus curvas típicas para los cultivos más comunes de las áreas en estudio. También compararon la ET de METRIC con resultados de ET obtenidas en lisímetros utilizando datos de la cuenca del río Bear y del Laboratorio de Investigación del Servicio de Investigación Agrícola (ARS, por sus siglas en inglés) del Departamento de

Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) cerca de Kimberly, Idaho, Estados Unidos. La ET para la temporada de crecimiento estimada presentó un error del 4% para praderas irrigadas en la cuenca del río Bear de Idaho y del 1% para un cultivo de remolacha azucarera irrigada cerca de Kimberly. También mejoró la calibración de los modelos de agua subterránea al proporcionar una mejor información sobre la recarga de agua subterránea para toda la llanura del río Snake, en el sureste de Idaho.

Otra utilización de METRIC se llevó a cabo en el sur de España donde Santos et al. (2008) combinaron un modelo de balance hídrico con estimaciones de ET obtenidas con METRIC para proporcionar pautas precisas de programación de riego para campos individuales. En comparación con las aplicaciones tradicionales de los modelos de balance hídrico (es decir, sin la ET basada en teledetección), el procedimiento combinado proporcionó mejoras significativas en los programas de riego para la condición promedio y como cuando se considera la variabilidad de campo a campo. También mejoró la identificación de campos agrícolas específicos que experimentaban problemas en el manejo del agua.

El modelo ReSET-Raster, un modelo rasterizado del balance de energía superficial (Elhaddad y García, 2014), basado en SEBAL y METRIC, trabaja la información en formato raster. El modelo ha sido propuesto para trabajar en áreas con una variabilidad alta de los parámetros agrometeorológicos importantes como la velocidad del viento y la evapotranspiración potencial (ET_0). A diferencia de SEBAL y METRIC, que se calibran a partir de datos de una única estación agrometeorológica, ReSET-Raster proporciona flexibilidad para usar varias estaciones. A partir de los datos obtenidos de la misma área de estudio, genera una red (grid) de datos interpolados teniendo en cuenta la variación espacial de los parámetros. De esta forma, cada pixel se modela en función de sus propios datos, lo que puede ser significativo en áreas con alta variabilidad. La aplicación del modelo en el noreste de Colorado, Estados Unidos, en un área cubierta por tres estaciones meteorológicas separadas aproximadamente a 40 km, mostró que la ET calculada con el modelo puede variar hasta un 17% en comparación con la ET calculada con valores puntuales.

También se aplicó el modelo ReSET-Raster en 53 distritos de riego en Aragón, España y permitió determinar que la incertidumbre en el manejo del agua de riego podría llevar a la mayoría de los distritos a sobreirrigar durante las estaciones con suficiente disponibilidad de agua, independientemente de sus sistemas de riego, suelos u otros factores (Chalghaf et al., 2015).

El enfoque basado en el coeficiente de cultivo derivado de los índices de vegetación se ha utilizado menos a gran escala. González-Dugo et al. (2013) aplicaron este enfoque en áreas irrigadas de la cuenca del río Guadalquivir en el sur de España. El enfoque facilitó la caracterización individual de los campos bajo riego, la resolución temporal permitió la interpolación de los coeficientes diarios de los cultivos y se ha compilado en una herramienta de planificación y operación llamada MINARET (MonitorING irrigated AgricultuRe ET) que permite a la autoridad del río Guadalquivir generar mapas de evapotranspiración de los cultivos bajo riego no estresados de las tierras de regadío de la cuenca. Otras aplicaciones de este enfoque son más utilizadas en los servicios de asesoramiento de riego (D'Urso et al., 2010; Melton et al., 2012; Calera et al., 2017).

1.6. El sistema de riego del Río Dulce en la provincia de Santiago del Estero, Argentina

La República Argentina se ubica entre los 22° y 56° de latitud sur y los 56° y 73° de longitud oeste. Tiene una superficie de 2,750,000 km² y una longitud de 3,300 km de norte a sur y de 1,385 km de oeste a este. Esa gran extensión latitudinal y una gran variación altimétrica determinan una amplia variedad climática, desde los climas subtropicales al norte hasta los fríos en la Patagonia, con predominio de los templados en la mayor parte del país. Cabe mencionar asimismo que el 76% del territorio se encuentra en condiciones de aridez o semiaridez, al recibir precipitaciones medias menores a 800 mm anuales.

La oferta de recursos hídricos se puede expresar como un caudal medio de aproximadamente 26,000 m³ s⁻¹ teniendo, en términos globales, buena calidad. Aunque esta cifra puede aparecer como cuantitativamente generosa, es necesario puntualizar que la distribución espacial es muy desbalanceada. El 85% del agua superficial del país corresponde a los territorios argentinos de la cuenca del Río de la Plata, con sus ríos Bermejo, Paraguay, Uruguay y Paraná, entre sus cursos de agua principales, y con la mayor concentración de su población y actividad productiva. En el otro extremo se sitúan las provincias áridas y semiáridas, con cuencas de escasa pluviosidad y menos del 1% del total del agua superficial (Pochat, 2005).

La superficie bajo riego alcanza las 2.1 millones de hectáreas que representan un 5% de la superficie cultivada total del país (39 millones de hectáreas). El 65% de esta superficie se riega a partir de fuentes superficiales y el resto con agua subterránea, siendo el número total de regantes alrededor de 145,000. Estas áreas irrigadas se localizan tanto en sistemas

públicos como en áreas privadas, y a pesar de su baja eficiencia relativa, generan alrededor de un 13% del valor de la producción agrícola del país (FAO, 2015c).

La extracción hídrica total nacional para el 2011 alcanzó los 37.78 km³, destacando el sector agrícola con una extracción del 74% del total, seguido del sector municipal con el 15% y el sector industrial con el 11% de las extracciones (FAO, 2015b).

En la región Noroeste de la República Argentina se encuentra la Cuenca del Río Salí-Dulce que abarca el sur de la provincia de Salta, donde nacen los principales afluentes del río Salí, los ríos Candelaria y Tala. Atravesando la provincia de Tucumán, el Río Salí es el principal colector de toda la cuenca alta, hasta desembocar en la presa embalse de Río Hondo junto con los ríos Gastona, Medina, Mayo y Marapa. Este embalse se encuentra en el límite de las provincias de Santiago del Estero y Tucumán y fue construido en 1967. El cierre es un Dique Frontal de 4,100 m de longitud. La obra es de aprovechamientos múltiples, tales como atenuación de crecidas, riego, agua potable, generación de energía, turismo, etc. (Huespe et al., 2015). Aguas abajo del embalse, escurre el Río Dulce por las provincias de Santiago del Estero y Córdoba, hasta su desembocadura en la Laguna de Mar Chiquita. La cuenca abarca un área total de unos 57,300 km², correspondiendo 20,000 km² a la parte superior, donde se encuentra la mayor concentración de la población y de la actividad industrial (Pochat, 2005).

La provincia de Santiago del Estero está ubicada en el Noroeste de la República Argentina, entre las latitudes 25° 30' y 30° 30' sur y las longitudes 65° 62° oeste. Su superficie es de 135,254 km². Su territorio se encuentra atravesado de noroeste a sudeste por los ríos Dulce y Salado (Figura 1.1).

El sistema de riego del Río Dulce (SRRD) (Figura 1.2) con su superficie de 120,000 ha con posibilidad de riego en un área bruta de 300 mil hectáreas aproximadamente, representan el 5% del total del país y el 17.8% de la región NOA (noroeste argentino), lo que lo convierte en uno de los sistemas de riego más importantes de Argentina (Prieto, 2010). Con su base de producción agropecuaria concentrada en las cadenas algodonera, alfalfa, maicera, sojera, bovina, caprina, en el año 2010 concentraba el 54% de la población provincial (INDEC, 2010).

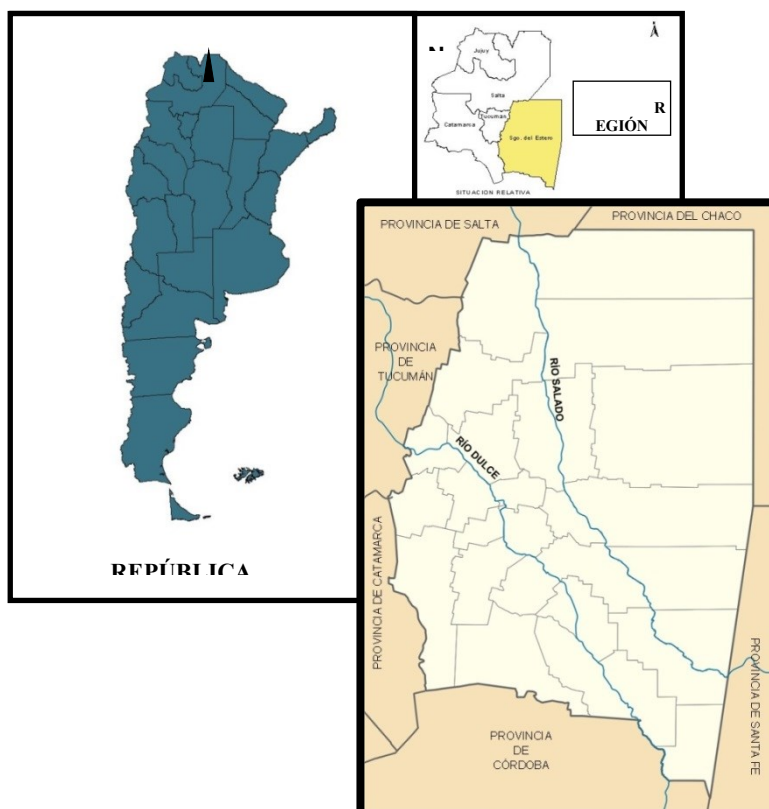


Figura 1.1. Ubicación de la provincia de Santiago del Estero en la región Noroeste de la República Argentina (NOA).

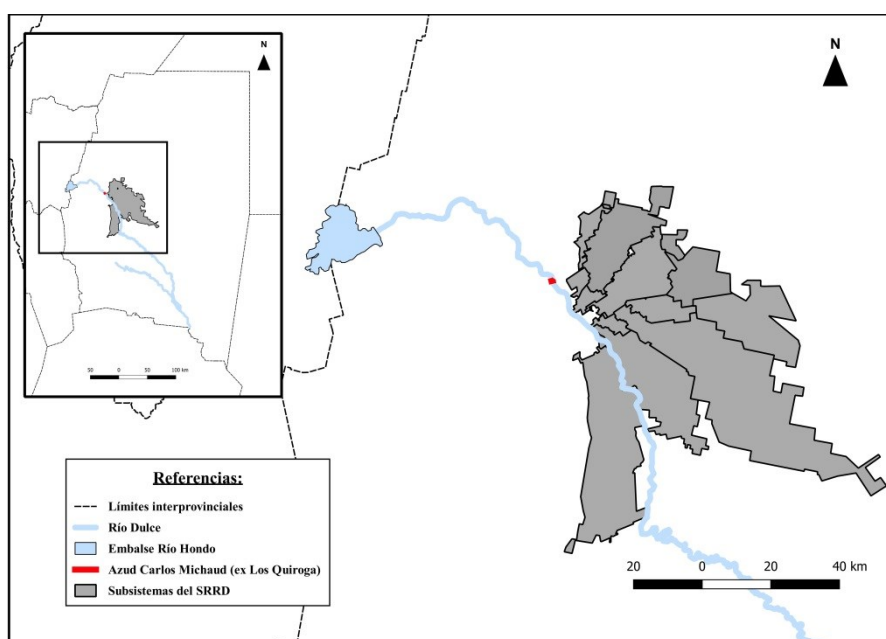


Figura 1.2. Ubicación del sistema de riego del Río Dulce (SRRD) en la provincia de Santiago del Estero.

El clima del SRRD, según la clasificación de Thornthwaite, es semiárido DB4' da' nulo o pequeño exceso de agua, Mesotermal elevado sin ningún excedente de agua y con

precipitaciones concentradas en el período estival - húmedo de balance hídrico negativo (verano-otoño) y un período seco (invierno-primaveral) con escasas a nulas precipitaciones (Morello y Adámoli, 1974).

La precipitación media histórica anual es de 608 mm (1989-2017) en la estación meteorológica del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Santiago del Estero (28° 01' sur; 64° 13' oeste; 169 msnm), y 575 mm (1903-2016) en la estación del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ubicada el Aeropuerto Vicecomodoro Ángel de la Paz Aragonés (27° 45' sur; 64° 17' oeste; 200 msnm). La ET_0 media anual es de 1393 mm marcando el balance hídrico anual negativo para el área.

Los suelos predominantes presentan escaso desarrollo edafológico, textura franco-limoso a franco-arenoso, valores promedio de agua disponible total al primer metro de profundidad que ronda entre 150 mm y 180 mm asociados a un bajo contenido de materia orgánica y nitrógeno total (Angueira y Zamora, 2007; Galizzi et al., 2015).

El agua del Río Dulce es de buena calidad, la conductividad eléctrica en general no sobrepasa el rango 0.65 – 0,8 dS m⁻¹.

Los cultivos preponderantes en el área de influencia del sistema son el algodón y la alfalfa, ocupando la mayor superficie bajo riego. También aparecen otros cultivos con menor superficie, soja, maíz para grano, trigo, cebolla, melón y sandía, entre otros.

La gestión de la O&M del SRRD sufrió traspasos entre el gobierno provincial y nacional hasta el año 1992 que quedó en manos del gobierno provincial a cargo de la Unidad Ejecutora del Servicio de Riego del Río Dulce (UER). Solo durante un breve período (1992-1995) fue la participación de los usuarios, promovidos como parte del plan de descentralización de las actividades de O&M a nivel de canales secundarios, que condujo a un giro definitivo sobre el sistema. Sin embargo este proceso se truncó por un brusco cambio de orientación política del gobierno provincial en el año 1995 (Prieto, 2006).

Oficialmente la distribución de agua en el SRRD es por turnados en un esquema de rotación fija dentro de las derivaciones, último nivel de gestión de la UER. Según la frecuencia del turnado, un agricultor tendría derecho a percibir 11 turnos de riego al año, lo que implicaría un riego bruto anual máximo de 9.900 m³ ha⁻¹ (990 mm de lámina bruta aplicada). En detalle, un permiso de riego considera un caudal de 300 l s⁻¹ y 50 min ha⁻¹ por turno (900 m³ ha⁻¹; lámina bruta de 90 mm), con una frecuencia entre 25 y 30 días, durante todo el año, independientemente de las necesidades de agua de los cultivos (Romanella,

1971). La UER efectúa un corte del servicio para su mantenimiento y realización de obras de infraestructura durante aproximadamente un mes en el año (mayo y junio).

La eficiencia de aplicación prevista por los proyectistas para todo el sistema fue del 70% (Romanella, C. 1971), pero la real presenta una variabilidad entre 41% y 74% con una uniformidad de distribución aproximadamente del 70% (Prieto et al., 2005; Angella et al., 2011). Los métodos presurizados, riego por goteo y pivote central, no alcanzan el 1% de la superficie regada en el sistema.

El método habitual de riego dentro de las propiedades agrícolas es por superficie o manto, sobre unidades de riego con escasa o nula sistematización. Los agricultores habitualmente dividen las unidades de riego con bordos de 30 o 40 cm de alto, paralelos al avance del agua de riego y, a veces, dependiendo de la uniformidad de la superficie del terreno, son cruzados con bordos de tierra de menor altura para detener el avance del agua. También suelen trazar bordos de 40 a 50 cm de altura siguiendo las curvas de nivel sobre el terreno.

En el año 1971 se sancionaron diferentes leyes y reglamentaciones fundamentales para el funcionamiento y gestión del sistema que actualmente siguen vigentes. Las más relevantes fueron el “Reglamento para el Aprovechamiento de las Aguas del Río Dulce en la Zona del Proyecto Río Dulce”, el Código de Aguas provincial (Ley Provincial N° 4.869/80) y el “Estatuto de las Sociedades de Agricultores Regantes de las Comunales de la zona del Río Dulce” (<http://www.riegoriordulce.gov.ar/>).

El “Estatuto de las Sociedades de Agricultores Regantes de las Comunales de la zona del Río Dulce” fue aprobado por una “Comisión Asesora de Regantes del Río Dulce” representada por agricultores regantes de cuatro de las cinco zonas administrativas que comprendía el SRRD y es la que oficialmente dicta las normas a las cuales deben adecuarse las Sociedades de Agricultores Regantes.

En este documento se dispusieron las bases legales para la formación de las WUAs relacionadas con los canales de último orden del SRRD conocidos como “Acequias Comuneras” y denominadas administrativamente como derivaciones. Estas WUAs pasarían a ser la base participativa de menor escala del sistema. A su vez, el Código de Aguas les brindó el marco legal para poder asociarse formando consorcios o asociaciones para administrar canales de mayor jerarquía y/u obras hidráulicas y colaborar con la recolección de información referente al aprovechamiento del agua de riego.

Años más tarde, se promulgó el Código de Aguas de la Provincia de Santiago del Estero en el año 1980 (Ley Provincial N° 4869). En él se definieron los principios de la política hídrica, su ámbito de vigencia, regulación y autoridad de aplicación, registro y catastro de aguas, usos, permisos, concesiones y el aprovechamiento de las aguas públicas y privadas, obras hidráulicas y la jurisdicción, competencia y régimen contravencional de todas las cuestiones vinculadas a los derechos y obligaciones emergentes de concesiones o permisos otorgados, administración, distribución, conservación, protección y defensa contra efectos nocivos de las aguas.

De acuerdo al Código de Aguas, en el SRRD se presentan dos tipos de concesiones o permisos de riego, las permanentes y los eventuales, ambos con iguales derechos en cuanto a frecuencia, lámina y duración de la entrega, siendo la diferencia que los permanentes tienen prioridad en el recibo de la dotación y se abonan en cuatro cuotas anuales una vez vencido el trimestre, mientras que los eventuales deben ser renovados anualmente, y deben abonarse por adelantado al inicio de la temporada.

Los permisos otorgados de uso de agua para riego sólo facultan su aprovechamiento en la superficie empadronada, siendo inseparable del de propiedad, no pudiendo ser transferido, embargado o enajenado sino con el terreno para el que fue concedido

En 2005 la UER implementó un tercer tipo de permiso, los permisos discontinuos. Estos otorgan el derecho al usuario a recibir la dotación por una actividad específica solamente en una determinada época del año en la forma que establezca la UER conforme a necesidades del usuario y disponibilidad de agua, habitualmente en uno o dos eventos de riego.

Las tarifas relacionadas al canon para todos los permisos se ajustaron en el año 2010 a un segmento de superficie bajo riego que varió para aquellos usuarios con superficies con permisos entre 1 y 10 ha deberían abonar \$ 60, los que poseían entre 10.1 y 50 ha abonarían \$ 90 y con >50 ha con permisos de riego \$ 150, siempre valores por hectárea y año (\$ 1 = u\$s 0.25 – pesos argentinos = dólares estadounidenses).

Tanto los permisos eventuales como los discontinuos se definen al inicio de la temporada de riego teniendo en cuenta los volúmenes disponibles en función de las concesiones permanentes inactivas en los cursos que abastecen al eventual o transitorio y la posibilidad física (infraestructura en condiciones) de poder proveer del recurso al agricultor, tienen una duración de un año y su renovación está sujeta a decisión de la UER.

El 50% de la superficie regada en el SRRD pertenece a lotes entre 0 y 50 ha y el resto a lotes con más de 50 ha. Esto se asocia con la convivencia de agricultores pequeños y agricultores empresariales. Los primeros son minifundistas habitualmente con actividades productivas de subsistencia, muchos con una tenencia precaria de la tierra y apoyados por el trabajo familiar para el desarrollo de las actividades, donde la mayoría de estos productores son residentes rurales. Los segundos presentan actividades productivas intensivas, rentables con aplicación de tecnologías y capital trabajadas por los propietarios o arrendadas a terceros que generan empleo a los habitantes de la zona (Caumo et al., 2014). Una distinción similar realizó Prieto (2006) donde destacó que los pequeños representan el 65% de los agricultores y poseen el 30% de las tierras de regadío, mientras que los empresariales, el 19% de los agricultores, poseen el 59% de las tierras de regadío.

La superficie bajo riego en el SRRD primero se expandió a través de canales independientes y desarrollados de forma privada. Las obras públicas a gran escala posteriores ampliaron la superficie de regadío en torno a estos canales de más edad, quedando incrustados en el sistema, pero sujetos a la modernización del mismo (Prieto, 2006).

El sistema actual de canales del SRRD comienza 60 km aguas debajo de la presa embalse de Río Hondo en el azud nivelador Carlos Michaud (ex Los Quiroga) donde toma el canal Matriz, canal principal del sistema con una capacidad máxima de conducción de $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Del Matriz se desprenden 11 canales secundarios de riego que se detallan a continuación por orden de toma (desde aguas arriba hacia abajo):

- i. El Alto
- ii. Norte
- iii. La Cuarteada
- iv. Sud Primera Sección
- v. San Martín
- vi. A los Romano
- vii. Municipal
- viii. Jume Esquina
- ix. Suri Pozo
- x. Sud Segunda Sección
- xi. Simbolar

A pesar de no contar con un programa de gobierno vinculado a la IMT, la UER inició en la década del 1990 un proceso de transferencia que quedó trunco y se retomó con más continuidad desde el año 2006 al 2011. En este período se han formalizado convenios de transferencia de la O&M de los canales secundarios hasta nivel de derivaciones de riego (último nivel del sistema de riego en el cual la UER es la encargada de la gestión) del SRRD con siete WUAs. Estos siete convenios implicaron una IMT del 98% de la infraestructura de riego y 91% de la de drenaje de todo el sistema aproximadamente a las WUAs junto al involucramiento de más del 90% de los permisos de riego.

Entre las primeras en celebrarlo está la Asociación de Productores Agropecuarios de la Zona IV (APAZ-IV). El mismo le transfirió la O&M del subsistema del Canal Secundario San Martín junto con el sistema de drenajes del área de influencia. Este convenio vinculó 18,235 ha con permisos de riego, 121.8 km de canales de riego y 195.1 km de canales de drenaje a cielo abierto.

En ese mismo año la Asociación de Productores Rurales y Afines (APRA) celebró el convenio por el Sub Sistema Canal Secundario Suri Pozo junto con el sistema de drenajes del área de influencia. Este convenio vinculó 31,024 ha con permisos de riego, 144.5 km de canales de riego y 285.6 km de canales de drenaje a cielo abierto.

En el año 2007 la IMT del subsistema del canal secundario Simbolar y la infraestructura de drenajes del área de influencia se realizó a la Asociación de Productores Agropecuarios de la Zona V (APAZ-V). En este caso el convenio vinculó 13,824 ha con permisos de riego, 46.1 km de canales de riego y 155.3 km de canales de drenaje a cielo abierto.

Luego, en el mismo año la Asociación de Productores Agropecuarios Sistema Los Romano se hizo cargo de la O&M del subsistema del canal secundario A Los Romano y su infraestructura de drenaje. Se vincularon 13,708 ha con derechos de riego, 46.6 km de canales de riego y 78 km de canales de drenaje.

El Consorcio de Regantes del Canal Sur Segunda Sección celebró convenio con la UER por la transferencia de la O&M del subsistema del canal secundario Sud Segunda Sección y la infraestructura de drenaje del área de influencia. En este caso se vincularon 6,785 ha con derechos de riego, 30.6 km de infraestructura de riego y 21 km de drenaje.

En el año 2009, la transferencia del subsistema del canal secundario Norte se realizó con el convenio entre la UER y la Asociación de Productores Agropecuarios Regantes del

Canal Norte. En este convenio se vincularon 8,136 ha con derechos de riego e infraestructura que incluía 41 km de canales de riego y 34.6 km de canales de drenaje.

Por último, en el año 2011 se celebró el convenio entre subsistema del canal secundario La Cuarteda con el Consorcio de Regantes del Canal La Cuarteda. Este convenio incluyó 8,946 ha con derechos de riego y 58.4 km de infraestructura de riego y 28 km de infraestructura de drenaje.

Estos siete convenios implicaron una IMT del 97.6% de la infraestructura de riego y 91.1% de la de drenaje de todo el sistema a las WUAs junto al involucramiento del 92.5% de los derechos de riego. La restante infraestructura no transferida pertenece a los subsistemas de los canales secundarios El Alto y Sud Primera Sección. En el área de influencia del canal Municipal las urbanizaciones avanzaron sobre las tierras bajo riego y el mismo quedó en desuso.

Los canales secundarios en los cuales no se ha llevado a cabo la IMT, El Alto, Sud Primera Sección y Jume Esquina, la UER es la encargada de la O&M. Al 2014, se vinculaban a ambos canales 13,255 ha de derechos de riego y sus infraestructuras representan el 2.4% de la infraestructura de riego y 8.9% de la de drenaje del total del sistema.

1.7. Definición del problema

La intención principal de la IMT es lograr mejoras en el desempeño del sector de la agricultura de riego, tanto en la productividad agrícola como la sostenibilidad física y económica de los sistemas de riego.

En la década de 1990, con el objetivo de mejorar el rendimiento de los sistemas de riego se desarrolló con fuerza el concepto de evaluación del desempeño de los mismos, diferentes indicadores en función de los criterios de evaluación y metodologías de benchmarking con los objetivos del propio sistema o con los resultados y procedimientos de otros sistemas similares.

Se han proporcionado marcos conceptuales para implementar la evaluación del desempeño de los sistemas de riego con una amplia gama de opciones para caracterizar todos los aspectos. A pesar de la falta de un enfoque y un marco acordado, la selección del método

de evaluación depende en gran medida de la naturaleza del sistema de riego y del propósito de la evaluación.

En el SRRD se ha evaluado su desempeño como sistema (Prieto et al., 2005), el de los canales secundarios y terciarios (Prieto, 2006) y también de las unidades de riego (Prieto et al., 2005; Angella et al., 2011). Ninguna de ellas tuvo como objetivo relacionar los resultados con el tipo de gestión, posiblemente porque la gestión del riego no había sido transferida a los agricultores o no tenía un período suficientemente largo como para ser evaluado.

Atendiendo a los objetivos de IMT en general y al proceso en particular que se desarrolló en el SRRD, es necesario evaluar la relación entre las prácticas dentro de las unidades de riego, las diferentes gestiones que albergan el SRRD y la actitud de los usuarios del agua frente al nuevo sistema de gestión transferido a los agricultores. Esto es relevante porque el desempeño del riego se vincula con la productividad del agua y afecta la economía de los diferentes estratos de agricultores del sistema. Servirá también para establecer referencias para futuros estudios de caso.

Esta evaluación requiere de metodologías robustas para el cálculo de los indicadores de desempeño, y la teledetección y los GIS son herramientas prometedoras para evaluar de manera realista el potencial de mejora en la gestión del riego, con la ventaja de permitir una rápida comparación multi-temporal de las situaciones, poder mejorar el diagnóstico en situaciones donde los datos son escasos y brindar una oportunidad de estudiar los factores de cultivo a escalas que van desde fincas individuales hasta proyectos de gran escala.

Para ello, evaluar y comparar los resultados de los diferentes métodos de estimación de la ET a nivel de sistema de riego, componente clave del balance hídrico, permitirá determinar su aplicabilidad en la evaluación del desempeño a escala de sistemas de riego con cierta rutina y precisión.

La evaluación sistemática aplicable a las áreas con diferentes gestiones que alberga el SRRD permitirá evaluar el resultado obtenido de la IMT y compararlo con resultados obtenidos en diferentes sistemas de riego del mundo.

1.8. Objetivos de esta tesis

El objetivo general de esta tesis es comparar el desempeño de subsistemas del SRRD donde la O&M se ha transferido a las WUAs con el de subsistemas donde la gestión permanece bajo responsabilidad del gobierno. Se trata de obtener referencias para la toma de decisiones de los gestores de las WUAs, el gobierno, o para futuros estudios sobre la transferencia de la gestión y la gestión participativa del riego.

Como consecuencia del objetivo general y los requerimientos que surgieron para mejorar los procesos metodológicos, los objetivos específicos establecidos fueron:

- a). Evaluar cómo la transferencia de la O&M impacta en el desempeño del riego y en particular en la actitud de los usuarios en relación a sus sistemas productivos, participación e involucramiento en las asociaciones de usuarios del agua.
- b). Evaluar dos enfoques basados en teledetección para la estimación de ET_c , utilizable en los indicadores para la evaluación del desempeño de los sistemas de riego.
- c). Evaluar los errores en la estimación de la ET_c debido a la interpolación a valores diarios de coeficientes de cultivo obtenidos a intervalos irregulares usando los enfoques del balance de energía y de los índices de vegetación.

Cada uno de estos objetivos se aborda en uno de los siguientes capítulos de esta tesis. En el Capítulo 2 se presenta la evaluación y comparación del desempeño del riego a través de indicadores comúnmente utilizados y validados sobre un subsistema transferido a los usuarios del agua en relación a otro no transferido en el SRRD, contrastando la actitud de los usuarios frente a las diferentes gestiones y su grado de participación e involucramiento en las asociaciones de usuarios del agua utilizando técnicas de evaluación social.

En el Capítulo 3 se incluye la evaluación comparativa de los dos enfoques basados en teledetección para la estimación de ET_c , el método FAO56 (Allen et al., 1998) con coeficientes de cultivo derivados de un índice de vegetación siguiendo el procedimiento descrito en Mateos et al., (2013), y el modelo METRIC ejecutado por la aplicación EEFlux. Se comparan las estimaciones de ET_c para cultivos individuales y para toda el área cultivada de 8005 ha de dos subsistemas usando coeficientes de cultivo estándar (no específicos de campo) con estimaciones usando coeficientes de cultivo basados en índices de vegetación específicos de campo. Se compara también en un conjunto de 30 campos comerciales donde se conocía el programa de riego el enfoque basado en VI específico del campo con

METRIC. Finalmente, se evalúan los errores en la estimación de la evapotranspiración del cultivo debido a la interpolación a valores diarios de los coeficientes de cultivo individuales obtenidos para los intervalos de paso de satélites mayores a un día, por el enfoque del balance de energía de la superficie y los coeficientes de cultivo basales obtenidos mediante índices de vegetación.

Finalmente, el Capítulo 4 resume las conclusiones generales tomadas después de la elaboración del actual trabajo.

Bibliografía

- Abdullaev, I., & Rakhmatullaev, S., 2013. Transformation of water management in Central Asia: from State-centric, hydraulic mission to socio-political control. *Environmental Earth Sciences*, 73(2), 849-861. doi: 10.1007/s12665-013-2879-9.
- Akdim, N., Alfieri, S. M., Habib, A., Choukri, A., Cheruiyot, E., Labbassi, K., & Menenti, M. (2014). Monitoring of irrigation schemes by remote sensing: Phenology versus retrieval of biophysical variables. *Remote Sensing*, 6(6), 5815-5851.
- Alcon, F., García-Bastida, P. A., Soto-García, M., Martínez-Alvarez, V., Martín-Gorrioz, B., & Baille, A. (2017). Explaining the performance of irrigation communities in a water-scarce region. *Irrigation science*, 35(3), 193-203.
- Alcon, F., Tapsuwan, S., Brouwer, R., & de Miguel, M. D., 2014. Adoption of irrigation water policies to guarantee water supply: A choice experiment. *Environmental Science & Policy*, 44, 226-236.
- Allen, R., Irmak, A., Trezza, R., Hendrickx, J. M., Bastiaanssen, W., & Kjaersgaard, J. (2011). Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*, 25(26), 4011-4027.
- Allen, R. G., Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J., Thau, D., Gorelick, N., Erickson, T., Moore, R., Trezza, R., Ratcliffe, I., Robison, C. (2015). EEFlux: A Landsat-based evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. In; *Emerging Technologies for Sustainable Irrigation. A joint ASABE / IA Irrigation Symposium*. Long Beach, CA, pp. 1–11.
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R. (2007a). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 133 (4), 380–394.
- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., Kramber, W.; Lorite, I., & Robison, C. W. (2007b). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 133(4), 395-406.
- Angella, G. A., Prieto D. R., & Salgado R. (2011). Riego, eficiencias, pérdidas y reales posibilidades de mejorar el uso agrícola del agua. XXIII Congreso Nacional del Agua. Resistencia, Chaco, Argentina. 22 al 25 de junio de 2011. ISSN 1853-7685.

- Angueira, C., Zamora, E. (2007). Oeste del área de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Ed. INTA. ISSN 1850 4086. Serie informes técnicos EEASE N°40.
- Aydogdu, M. H., Karli, B., & Aydogdu, M. (2015). Evaluation of attitudes of stakeholders for irrigation water management: A case study of Harran Plain, Turkey. *Environmental and Agricultural Sciences*, 4, 42-47.
- Bastiaanssen, W. G. (1998). Remote sensing in water resources management: The state of the art. International Water Management Institute.
- Bastiaanssen, W. G., Molden, D. J., & Makin, I. W. (2000). Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural water management*, 46(2), 137-155.
- Bausch, W. C., Neale, C. M. U. (1989). Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling. *Transactions of the ASAE*, 32, 1901–1908.
- Borgia, C., García-Bolaños, M., Li, T., Gómez-Macpherson, H., Comas, J., Connor, D., & Mateos, L. (2013). Benchmarking for performance assessment of small and large irrigation schemes along the Senegal Valley in Mauritania. *Agricultural Water Management*, 121, 19-26. doi: 10.1016/j.agwat.2013.01.002
- Borgia, C., García-Bolaños, M., & Mateos, L. (2012). Patterns of variability in large-scale irrigation schemes in Mauritania. *Agricultural Water Management*, 112, 1-12. doi: 10.1016/j.agwat.2012.03.013
- Bos, M. G. (1997). Performance indicators for irrigation and drainage. *Irrigation and drainage systems*, 11(2), 119-137.
- Bos, M. G., Burton, M. A., & Molden, D. J. (2005). Irrigation and drainage performance assessment: practical guidelines. CABI publishing.
- Burt, C. M., & Styles, S. W. (1998). Modern water control and management practices in irrigation: impact on performance. Report No. R 98-001.
- Calera, A., Campos, I., Osann, A., D'Urso, G., Menenti, M. (2017). Remote sensing for crop water management: from ET modelling to services for the end users. *Sensors*, 17 (5), 1104.
- Caumo, M., Gioria, A., & Santillán, O. (2014). El área de riego del Río Dulce y la actividad agrícola de subsistencia. *Revista Trazos Universitarios*. Mayo 2014. ISSN 1853-6425
- Chalghaf, I., Elhaddad, A., García, L. A., & Lecina, S. (2015). Remote sensing and district database programs for irrigation monitoring and evaluation at a regional scale. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(11), 04015016.
- Chen, Y., Zhang, D., Sun, Y., Liu, X., Wang, N., & Savenije, H. H. G. (2005). Water demand management: A case study of the Heihe River Basin in China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 30(6-7), 408-419. doi: 10.1016/j.pce.2005.06.019
- Córcoles, J. I., De Juan, J. A., Ortega, J. F., Tarjuelo, J. M., & Moreno, M. A. (2010). Management evaluation of Water Users Associations using benchmarking techniques. *Agricultural Water Management*, 98(1), 1-11.
- D'Urso, G., Richter, K., Calera, A., Osann, M. A., Escadafal, R., Garatuza-Pajan, J., Vuolo, F. (2010). Earth observation products for operational irrigation management in the context of the PLEIADeS project. *Agric. Water Manag.* 98 (2), 271–282.

- De Fraiture, C., & Garces-Restrepo, C. (1997). Assessing trends and changes in irrigation performance: the case of Samaca Irrigation Scheme, Colombia. In Paper Presented to the IIMI, ILRI, IHE and INCYTH-CRA International Workshop on Irrigation Performance, 3 al 7 de Noviembre de 1997, Mendoza, Argentina.
- de Oliveira Costa, J., José, J. V., Wolff, W., de Oliveira, N. P. R., Oliveira, R. C., Ribeiro, N. L., Coelho, R. D., Araujo da Silva, T. J., Bonfim-Silva, E. M. & Schlichting, A. F. (2020). Spatial variability quantification of maize water consumption based on Google EEflux tool. *Agricultural Water Management*, 232, 106037.
- Droogers, P., & Bastiaanssen, W. (2002). Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(1), 11-18.
- Elhaddad, A., & Garcia, L. A. (2014). Using a surface energy balance model (ReSET-Raster) to estimate seasonal crop water use for large agricultural areas: Case study of the Palo Verde irrigation district. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(10), 05014006.
- Elshaikh, A. E., Yang, S. H., Jiao, X., & Elbashier, M. M. (2018). Impacts of Legal and Institutional Changes on Irrigation Management Performance: A Case of the Gezira Irrigation Scheme, Sudan. *Water*, 10(11), 1579.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015a). A Tool for Institutional and Policy Evidence-Based Analysis of Agriculture Water Management (AWM) in Sudan. Final Report.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015b). Perfil de País – Argentina. Informe AQUASTAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, Italia.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015c). Potencial de ampliación del riego en Argentina. UTF/ARG/017/ARG Desarrollo Institucional para la Inversión. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma, Italia.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018b). Guidelines on irrigation investment projects. Rome, Itali. 122 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018a). Transforming food and agriculture to achieve the SDGs. 20 interconnected actions to guide decision-makers.
- Galizzi, F., González, C., Nazar, P., Elias Tissera, N. J., Ramírez, N. M., Gómez, N. A. (2015). Condición inicial de un suelo degradado por el uso agrícola continuado en la zona IV de riego del Rio Dulce (Provincia de Santiago del Estero). X Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA. Salta 21 al 22 de mayo de 2015.
- Garces-Restrepo, C., Vermillion, D., & Muñoz, G. (2007). Irrigation management transfer. Worldwide efforts and results. FAO Water Reports 32. International Irrigation Management Institute, FAO, 62pp.
- García-Bolaños, M., Borgia, C., Poblador, N., Dia, M., Seyid, O. M. V., & Mateos, L. (2011). Performance assessment of small irrigation schemes along the Mauritanian banks of the Senegal River. *Agricultural Water Management*, 98(7), 1141-1152.

- Gazmuri, R. (1994). Chilean water policy (Vol. 3). IWMI.
- Gomo, T., Senzanje, A., Mudhara, M., & Dhavu, K. (2014). Assessing the Performance of Smallholder Irrigation and Deriving Best Management Practices in South Africa. *Irrigation and Drainage*, 63(4), 419-429.
- Gonzalez-Dugo, M. P., Escuin, S., Cano, F., Cifuentes, V., Padilla, F. L. M., Tirado, J. L., Oyonarte, N., Fernández, P., Mateos, L. (2013). Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. *Agricultural Water Management*, 125, 92– 104.
- Gonzalez-Dugo, M. P., Neale, C. M. U., Mateos, L., Kustas, W. P., Prueger, J. H., Anderson, M. C., Li, F. (2009). A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1843–1853.
- Groenfeldt, D., & Svendsen, M. (2000). Case Studie in Participatory Irrigation Management: World Bank Institute.
- Hamidov, A., Thiel, A., & Zikos, D. (2015). Institutional design in transformation: A comparative study of local irrigation governance in Uzbekistan. *Environmental Science & Policy*, 53, 175-191.
- Hearne, R. R., & Easter, W. K. (1995). Water Allocation and Water Markets: An Analysis of Gains-from-Trade in Chile (Vol. World Bank Technical Paper, pp. 100).
- Huespe J., Prendes H., Mangini S., Paris M., Graciani S., & Brainovich P. (2015). Sedimentación en el Embalse de Río Hondo. Séptimo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, 4 al 6 de noviembre de 2015, Montevideo, Uruguay.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC) (2010). Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010. Censo del Bicentenario: Resultados definitivos Serie B N° 2. Tomo 1. ISBN 978-950-896-421-2
- Johnson, S. H. (1997). Irrigation management transfer in Mexico: A strategy to achieve irrigation district sustainability (Vol. 16). IWMI.
- Kamble, B., Kilic, A., & Hubbard, K. (2013). Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Remote Sensing*, 5(4), 1588-1602.
- Kiyamaz, S., & Hamdy, A. (2014). Performance Evaluation of Transferred Irrigation Schemes in Gediz Basin, Turkey. (Thesis Doctoral), Ahi Evran University, Faculty of Agriculture, Kırşehir, Turkey.
- Kulkarni, S. A., & Tyagi, A. C. (2012). Participatory irrigation management: understanding the role of cooperative culture. In International Commission on Irrigation and Drainage (ICID). Presented in International Annual UN-Water Zaragoza Conference (Vol. 2013).
- Kustas, W. P., Norman, J. M. (1996). Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences*, 41, 495–516.
- Malano, H., Burton, M., & Makin, I. (2004). Benchmarking performance in the irrigation and drainage sector: a tool for change. *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 53(2), 119-133.
- Malano, H. M., & Burton, M. (2001). Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector (No. 5). Food & Agriculture Organization.

- Mapson, J., & Poulton, D. (2001). IMT country profiles: Australia: INPIM-International Email Conference on Irrigation Management Transfer
- Marre, M., Bustos, R. M., Chambouleyron, J., & Bos, M. (1996). Analisis del Canon de Aguas en la Administración Descentralizada del Riego en Mendoza, Argentina. II Seminario Internacional sobre Transferencia de Sistemas de Riego, 16 al 19 de julio, Guanajuato, México.
- Mateos, L., González-Dugo, M. P., Testi, L., Villalobos, F. J. (2013). Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agricultural Water Management*, 125, 81–91
- Melton, F. S., Johnson, L. F., Lund, C. P., Pierce, L. L., Michaelis, A. R., Hiatt, S. H., Guzman, A., Adhikari, D., Purdy, A. J., Rosevelt, C., Votava, P., Trout, T. J., Temesgen, B., Frame, K., Sheffner, E. J., Nemani, R. R. (2012). Satellite irrigation management support with the terrestrial observation and prediction system: A framework for integration of satellite and surface observations to support improvements in agricultural water resource management. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5, 1709-1721.
- Miranda, O. (2015). El riego en la provincia de San Juan, Argentina: su dinámica institucional en los últimos dos siglos. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 12(3), 385-408.
- Miranda, O., Graffigna, M. L., & González Aubone, F. (2011). Agua para el desierto: entendiendo los problemas de acción colectiva entre regantes de la provincia de San Juan, Argentina. In *Estudios Sociales del Riego en la Agricultura Argentina*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires, (pp. 111-126).
- Molden, D., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., de Fraiture, C., Kloezen, W.H., 1998. Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. Research Report No 20. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 26 pp.
- Morello, J., Adámoli, J. (1974). Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco argentino. Segunda parte. Vegetación y ambiente de la provincia del Chaco. La vegetación de la República Argentina, Serie Fitogeográfica, 13, 130.
- Ngirazie, L. A., Bushara, A. I., & Knox, J. W. (2015). Assessing the performance of water user associations in the Gash Irrigation Project, Sudan. *Water International*, 40(4), 635-646.
- Palerm-Vaqueira, J., & Martínez Saldaña, T. (2009). La gestión por cuencas en la historia hispano-americana. En *Gestión del agua: una visión comparativa entre México y Brasil*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México, (pp. 163-176).
- Perry, C., Steduto, P., Allen, R. G., & Burt, C. M. (2009). Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. *Agricultural Water Management*, 96(11), 1517-1524.
- Playán, E., Sagardoy, J. A., & Castillo, R. (2018). Irrigation governance in developing countries: Current problems and solutions. *Water*, 10(9), 1118.
- Pôças, I., Calera, A., Campos, I., & Cunha, M. (2020). Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. *Agricultural Water Management*, 233, 10608.

- Pochat, V. (2005). Entidades de gestión de agua a nivel de cuencas: experiencia de Argentina. Buenos Aires, AR, CEPAL. Serie de Recursos Naturales e Infraestructura No. 96
- Poddar, R., Qureshi, M. E., & Syme, G. (2011). Comparing irrigation management reforms in Australia and India - a special reference to participatory irrigation management. *Irrigation and Drainage*, 60(2), 139-150.
- Prieto, D., Angella, G., Angueira, M. C., Carrera, A. P., & Moscuza, C. (2005). Indicadores de desempeño del sistema de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. En *Uso y gestión del Agua en Tierras Secas* (No. 11, pp. 55-78). CYTED.
- Prieto, D. R. (2006). *Modernization and the Evolution of Irrigation Practices in the Río Dulce Irrigation Project, Santiago Del Estero, Argentina: Una Tarea de Todos.* (Thesis Doctoral), Wageningen University.
- Prieto, D. R. (2010). Situación del Riego en la Argentina. En *El Riego en los Países del Cono Sur*. IICA y PROCISUR, Uruguay, (pp. 15-29).
- QGIS Development Team (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Rap, E. (2006). The success of a policy model: Irrigation management transfer in Mexico. *Journal of Development Studies*, 42(8), 1301-1324.
- Romanella, C. (1971). *Planificación del Riego en el Área del Proyecto del Río Dulce.* Informe Final. AyEE de la Nación.
- Saadi, S., Simonneaux, V., Boulet, G., Raimbault, B., Mougnot, B., Fanise, P., Ayari, H., & Lili-Chabaane, Z. (2015). Monitoring irrigation consumption using high resolution NDVI image time series: Calibration and validation in the Kairouan Plain (Tunisia). *Remote Sensing*, 7(10), 13005-13028.
- Santos, C., Lorite, I. J., Tasumi, M., Allen, R. G., & Fereres, E. (2008). Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrigation Science*, 26(3), 277-288.
- Shamiyulla, N. (2010). Participatory Irrigation Management (PIM) in the Context of Future of Irrigation in India. *Asian Journal of Development Matters*, 4(1), 18-27.
- Shah, T., Van Koppen, B., de Lange, D. M. M., & Samad, M. (2002). Institutional alternatives in African smallholder irrigation: Lessons from international experience with irrigation management transfer (Vol. 60). IWMI.
- Shah, T., van Koppen, B., Merrey, D., de Lange, M., & Samad, M. (2002). *Institutional Alternatives in African Smallholder Irrigation: Lessons from International Experience with Irrigation Management Transfer* (Vol. 60): IWMI.
- Soto-García, M., Martínez-Alvarez, V., García-Bastida, P. A., Alcon, F., & Martín-Gorriz, B. (2013). Effect of water scarcity and modernisation on the performance of irrigation districts in south-eastern Spain. *Agricultural Water Management*, 124, 11-19. doi: 10.1016/j.agwat.2013.03.019
- Taghvaeian, S., Neale, C. M. U. (2011). Water balance of irrigated areas: a remote sensing approach. *Hydrological Processes*, 25, 4132–4141. DOI: 10.1002/hyp.8371
- Taghvaeian, S., Neale, C. M. U., Osterberg, J. C., Sritharan, S. I., & Watts, D. R. (2018). Remote sensing and GIS techniques for assessing irrigation performance: Case study

- in Southern California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144(6), 05018002.
- Trendov, N. M., Varas, S., & Zeng, M. (2019). Digital technologies in agriculture and rural areas – Status report. Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Uysal, Ö. K., & Atış, E. (2010). Assessing the performance of participatory irrigation management over time: A case study from Turkey. *Agricultural water management*, 97(7), 1017-1025.
- Van Averbeke, W. (2008). Best management practices for small-scale subsistence farming on selected irrigation schemes and surrounding areas through participatory adaptive research in Limpopo Province (C. f. O. a. S. A. D. o. C. Sciences, Trans.): Water Research Commission.
- Vermillion, D. L. (1997). Impacts of irrigation management transfer: A review of the evidence (Vol. 11): IWMI.
- Vermillion, D. L., & Sagardoy, J. A. (1999). Transfer of irrigation management services: Guidelines (No. 58). Food & Agriculture Org..
- Wang, J., Huang, J., Zhang, L., Huang, Q., & Rozelle, S. (2010). Water Governance and Water Use Efficiency: The Five Principles of WUA Management and Performance in China¹. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(4), 665-685.
- Zhao, C., Wang, P., & Zhang, G. (2015). A comparison of integrated river basin management strategies: A global perspective. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 89-90, 10-17.

CAPÍTULO 2.

IRRIGATION MANAGEMENT TRANSFER. THE EXPERIENCE OF THE RIO DULCE IRRIGATION SCHEME, ARGENTINA

Ramiro Salgado, José Ignacio Salvatierra, Carlos Mitre, Daniel Prieto Garra, Gabriel Augusto Angella, Manuel Arriaza and Luciano Mateos

Publicado en Irrigation and Drainage Journal 2021;1–16.

<https://doi.org/10.1002/ird.2572>

CAPÍTULO 2.

Irrigation Management Transfer. The experience of the Rio Dulce irrigation scheme, Argentina

2.1. Abstract of Chapter 2

Many governments and international agencies have promoted Irrigation Management Transfer (IMT) in order to reduce operation and maintenance costs and satisfy farmers' willingness to improve their irrigation service by self-management. However, IMT has produced both satisfactory and unsatisfactory results. This chapter presents a participatory research-based assessment of IMT in a case study in Northwest Argentina. The study combined conventional irrigation performance assessment and a survey of farmers' perception of the water delivery service and willingness to participate in water users associations. The assessment compared two subsystems in the Rio Dulce Irrigation District with different levels of management transfer. Water service in the subsystem where management has been transferred allowed flexible delivery schedules that facilitated a diversified cropping pattern, greater irrigation intensity, and resulted in more water use. Farmers in the transferred subsystem were more aware of the problems of the irrigation service than farmers in the non-transferred subsystem. The perception of problems in the non-transferred subsystem increased with the level of the farmer's professionalism and technical knowledge. The transmission of requests and complaints from farmers to managers was more transparent in the transferred subsystem than in the non-transferred one.

2.2. Resumen del Capítulo 2

Todos los gobiernos y agencias internacionales han promovido la transferencia de la gestión del riego (IMT) con el fin de reducir los costos de operación y mantenimiento y satisfacer la voluntad de los agricultores de mejorar su servicio de riego mediante la autogestión. Sin embargo, la IMT ha producido resultados tanto satisfactorios como insatisfactorios. Este capítulo presenta una investigación basada en una evaluación participativa de las IMT de un estudio de caso en el noroeste de Argentina. El estudio

combinó la evaluación del desempeño del riego convencional y una encuesta sobre la percepción de los agricultores sobre el servicio de suministro de agua y la voluntad de participar en asociaciones de usuarios de agua. La evaluación comparó dos subsistemas en el sistema de riego de Río Dulce con diferentes niveles de transferencia de la gestión. El servicio de agua en el subsistema donde se transfirió la gestión permitió horarios de entrega flexibles que facilitaron un patrón de cultivo diversificado, una mayor intensidad de riego y dieron como resultado un mayor uso de agua. Los agricultores del subsistema transferido estaban más conscientes de los problemas del servicio de riego que los agricultores del subsistema no transferido. La percepción de problemas en el subsistema no transferido aumentó con el nivel de profesionalismo y conocimiento técnico del agricultor. La transmisión de solicitudes y quejas de los agricultores a los administradores fue más transparente en el subsistema transferido que en el no transferido.

2.3. Introduction

The performance of many large-scale irrigation schemes worldwide has caused dissatisfaction in the international irrigation and drainage community. Improved performance is crucial for the much needed increase in food production (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2017), water resources sustainability, and more cost-effective operation and management (Skogerboe and Merkley, 1996). Since the 1980s, numerous governments have promoted Irrigation Management Transfer (IMT) programs in order to reduce their irrigation-related expenses, improve productivity and stabilize deteriorating irrigation schemes (Vermillion, 1997; Skogerboe *et al.*, 2003).

IMT involves delegating responsibilities or transferring the management authority for any or all functions of: i) diverting and/or distributing water; ii) maintaining and rehabilitating infrastructure; iii) managing water-related disputes; iv) assigning water rights and/or; v) planning crop schedules to water users associations (WUA), or other types of non-governmental organizations. IMT does not necessarily mean total government withdrawal, or the privatization of irrigation system assets (Vermillion and Sargardoy, 1999).

In many cases, IMT has not given the expected results, especially in low-income societies, where there has been an increase in operation and maintenance (O&M) expenses that have to be supported by WUAs. These WUAs, in turn, have encountered difficulties in collecting farmers' water fees and improving the cost-effectiveness of O&M (Garcés-

Restrepo *et al.*, 2007). Many positive cases are associated with a tradition in the participation of farmers in the management of the collective irrigation system, a dynamic and productive agriculture, farming with a significant proportion of agro-businesses, and/or a relatively low O&M cost (Shah *et al.*, 2002). However, the IMT process is complex and has rarely been investigated. Although experiences elsewhere are valuable, the success of IMT is heavily determined by a deep understanding of local idiosyncrasy and socio-economic and institutional settings (Meinenz-Dick *et al.*, 2002; Arun *et al.*, 2012). Therefore, research-based assessment of transferred and non-transferred irrigation schemes is the way to understanding IMT experiences and identifying the conditions for success. Conventional performance indicators (Bos *et al.*, 2005) and comparative assessment techniques (Malano and Burton, 2001; García-Bolaños *et al.*, 2011; Borgia *et al.*, 2013; Alcon *et al.*, 2017) are appropriate for this purpose, while investigating the farmers' perception and willingness to participate should be part of the approach (Wang *et al.*, 2010; Arun *et al.*, 2012).

This paper presents a comparative analysis of IMT in a case study in Northwest Argentina, where IMT is a topical, controversial and little studied issue. The analysis gives an insight into the IMT process and discusses it against experiences in other countries and continents.

2.4. Material and Methods

2.4.1. Study area

The Río Dulce Irrigation Scheme (SRRD, acronym in Spanish) is located in the province of Santiago del Estero, Argentina, at latitude 27°47' S and longitude 64°16' W. Its water source is the Río Hondo reservoir (capacity 1.745 million hm³) in the Río Dulce basin. The water is diverted from Río Dulce at the Carlos Michaud weir to cover an irrigable area of 270,000 ha extending over the river's alluvial plain, of which around 80,000 ha have current irrigation rights. The climate is semiarid, mesothermal, with a mean annual rainfall of 594 mm and 575 mm at the Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) and Servicio Meteorológico Nacional (SMN) weather stations (Figure 2.1), respectively, concentrated in summer (Morello and Adámoli, 1974). Mean annual reference evapotranspiration (ET_o) is 1300 mm, mean annual maximum temperature is 27.5 °C, and mean annual minimum temperature is 12.7 °C. Soils are deeper than 1.5 m (do not present restriction to crop root growth), of a silty loam to sandy loam texture, with a water holding

capacity of 160–180 mm m⁻¹, and a low content in organic matter and nitrogen (Angueira and Zamora, 2007; Galizzi *et al.*, 2015). The Río Dulce water is of good quality (the electrical conductivity of the irrigation water is about 0.65 dS m⁻¹). Predominant crops are cotton and alfalfa, followed by maize, soybean, wheat, oat and vegetables (onion, melon and watermelon).

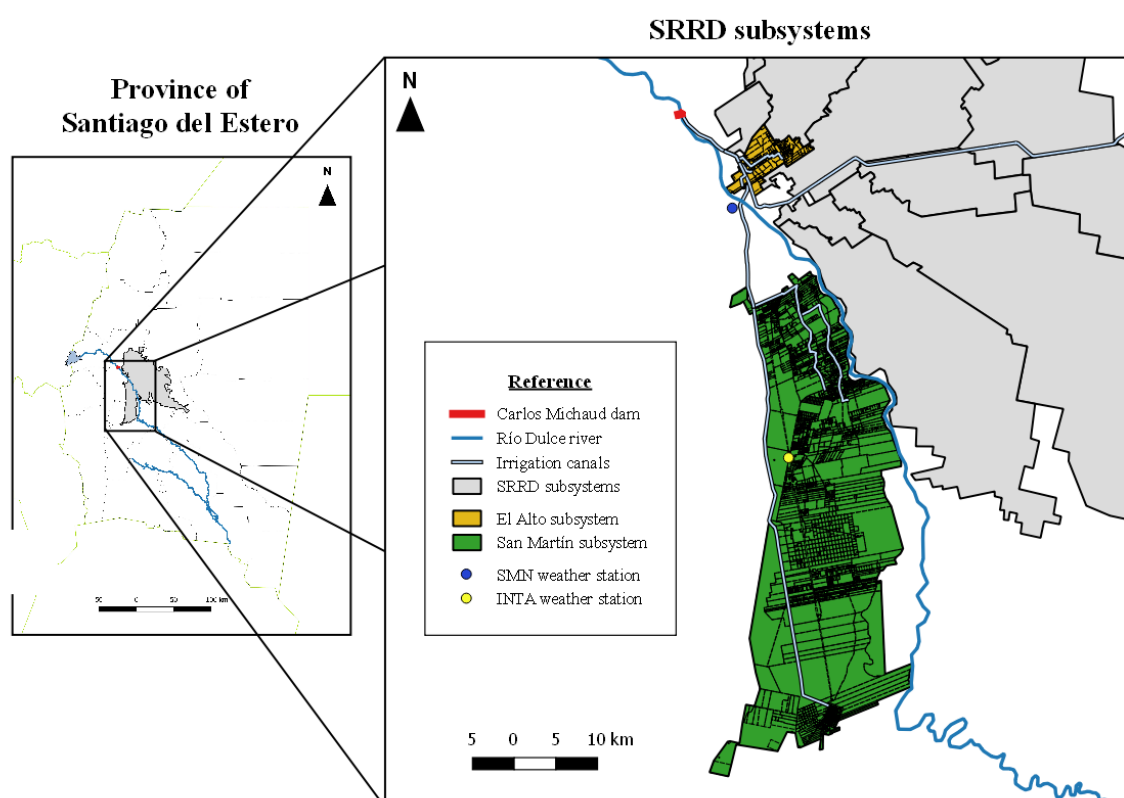


Figure 2.1. Location of the subsystems El Alto and San Martín and boundaries of all subsystems in the Río Dulce irrigation scheme. Location of the weather stations (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria – INTA; Servicio Meteorológico Nacional – SMN) in the Río Dulce irrigation scheme.

The main canal diverting from the Carlos Michaud weir serves 11 secondary ones. The irrigable area covered by the secondary canals varies between 4,000 and 84,000 ha, with areas with current water rights of 2,100 and 21,000 ha, respectively. Water is distributed through tertiary and quaternary canals and delivered to farm blocks. Farm blocks are made up of one or more farms; there are small farms (less than 50 ha) and commercial ones (larger than 50 ha), with approximately 50% of the area belonging to each group (Prieto, 2006; Caumo *et al.*, 2014). Each farm block is integrated either by small or commercial farms, i.e. only one of the two classes. Herein we have denoted the farm blocks of small and

commercial farms SFB and CFB, respectively.

The system was designed to deliver water to the farm block inlets according to a fixed rotation schedule with turns every 25 to 30 days, turnout flow rate of 300 l s^{-1} , and duration of 50 min ha^{-1} , giving an irrigation depth of 90 mm per irrigation and about 11 irrigation events per season (Romanella, 1971). Surface irrigation is the predominant on-farm irrigation method with application efficiency of between 41 and 74% and distribution uniformity of around 70% (Prieto *et al.*, 2005; Angella *et al.*, 2011).

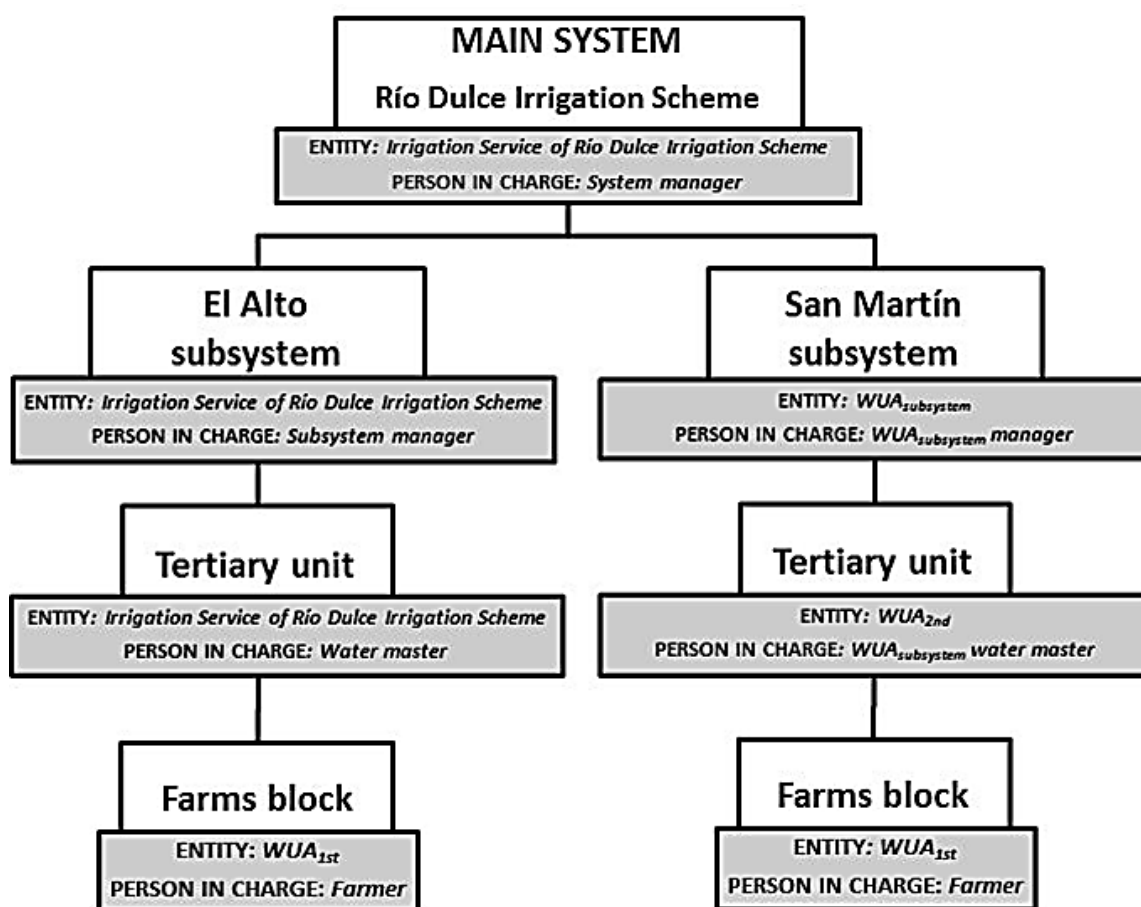


Figure 2.2. Organizational structure of the transferred (San Martín) and non-transferred (El Alto) subsystems in the Río Dulce irrigation scheme.

The Irrigation Service of Río Dulce Irrigation Scheme (UER, acronym in Spanish), a public entity that depends on the provincial government of Santiago del Estero, manages the SRRD. The responsibilities of this Service (management, operation, maintenance, water fees collection) encompass from the Carlos Michaud diversion weir to the turnouts at the farm block inlets. The system manager supervises the subsystem managers in charge of the secondary canals. In turn, the subsystem managers supervise the water masters who run

tertiary and higher order canals. The SRRD by-law (approved in 1971) provided the legal framework for the constitution of WUAs that would take responsibility for water management within the farm blocks, downstream of the turnouts (WUA_{1st}). The by-law also provided for the constitution of higher-order water users associations, which would assume the management of tertiary (WUA_{2nd}) or secondary ($WUA_{subsystem}$) canals, the latter being the maximum level of irrigation management transfer in SRRD (Figure 2.2). Seven $WUA_{subsystem}$ were created in the period 2006-2011.

This case study compared two of the 11 subsystems in SRRD, the subsystems served by the San Martín and El Alto secondary canals (Figure 2.1). These subsystems were selected because it was known that they were at different stages in IMT and both had accessible data for performance assessment. The San Martín secondary canal supplies water to 15,000 ha with irrigation rights (out of a total area of 70,000 ha). The subsystem served by El Alto secondary canal covers 4,000 ha, of which only 2,100 ha have irrigation rights. Whereas the San Martín subsystem was transferred to a $WUA_{subsystem}$ (named APAZ-IV) in 2006, El Alto subsystem remains managed by the Irrigation Service of SRRD.

2.4.2. Data collection

Data collection involved three levels of inquiry: managers, subsystem databases and farmers' perception.

Interviews to managers and water masters. Semi-structured interviews were conducted with the system manager, subsystem managers (including the managers of El Alto subsystem –staff of the Irrigation Service of SRRD– and San Martín subsystem –staff of the $WUA_{subsystem}$ APAZ-IV) and water masters of El Alto and APAZ-IV. These interviews provided qualitative and quantitative information on the current functioning and performance of the transferred and non-transferred subsystems. The collected information referred to management (finances, fee collection, budgeting, human resources), operation (operational staff, water delivery schedules, water measurement), maintenance (maintenance staff, responsibilities at each organizational level), and conflict resolution.

Subsystem database and irrigation performance assessment. The subsystem managers keep a Geographical Information System containing cadastral information (up to field scale), crops, irrigated area, irrigation turns (date and duration). The water supply is recorded in the turnouts at the farm block inlets. The managers provided their georeferenced databases that

we updated and verified by means of field inspections. Water measurements at the turnouts were validated by confronting the estimation of discharge made by the water masters (based on local rating curves relating canal water depth and discharge) with 28 discharge measurements (7 in San Martín and 21 in El Alto) made using two current meters. The current meters models were: SEBA Universal Current Meter F1 (SEBA Hydrometrie GmbH & Co., Germany), and FP111 Global Water Flow Probe (Xylem Analytics GmbH & Co., Germany). The good correlation between discharge estimations and measurements (Figure 2.3) gave us confidence in the water supply data.

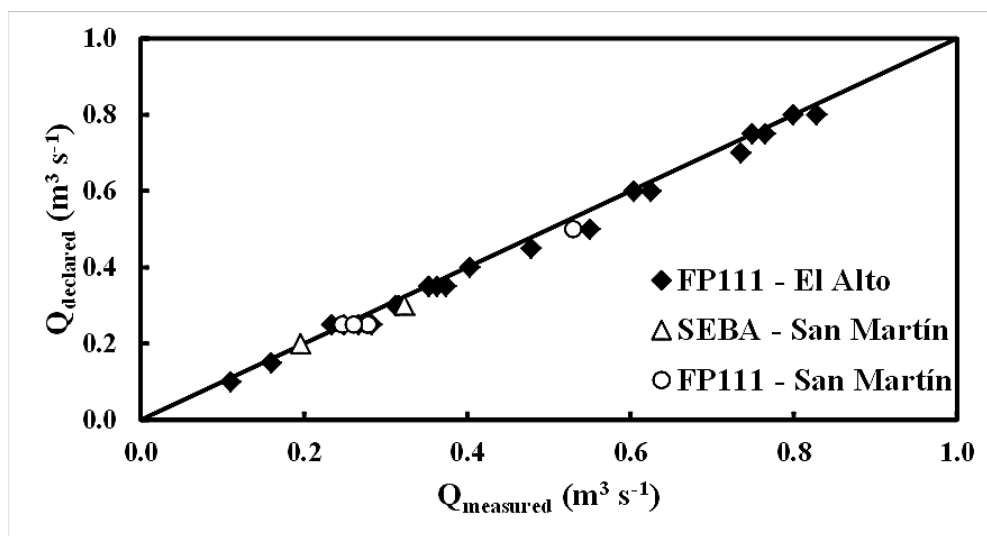


Figure 2.3. Relationship between the discharge measured at the farm blocks turnouts (Q_{measured}) and the discharge estimated by the water masters using local ratings (Q_{declared}) in El Alto and San Martín subsystems, Rio Dulce irrigation scheme. Current meters used: SEBA Universal Current Meter F1 (SEBA) and FP111 Global Water Flow Probe current meter (FP111).

The data collected for the performance assessment extended from July 2012 to June 2015, covering three irrigation seasons. In the first season (2012-2013), rainfall recorded at the INTA weather station, located in the San Martín subsystem (Figure 2.1) was 319 mm, while the SMN weather station, located in the El Alto subsystem, recorded 898 mm, including an extreme event of 460 mm on 18 February 2013. In the irrigation season 2013-2014, the irrigation water supply was restricted due to the low water storage in the Rio Hondo reservoir, although rainfall during the irrigation season was above the average (632 and 895 mm at the INTA and SMN weather stations, respectively). The irrigation season 2014-2015 was a typical one, with no water supply restrictions and rainfall of 577 and 704 mm at the INTA and SMN weather stations, respectively.

Crops, irrigation and weather data were used to compute two significant performance indicators (Malano y Burton, 2001; Malano *et al.*, 2004; Lozano and Mateos, 2008), Irrigation Intensity (II) and Relative Irrigation Supply (RIS):

$$II = \frac{\text{Area actually irrigated}}{\text{Area with irrigation water rights}} \quad (1)$$

$$RIS = \frac{\text{Irrigation water supply}}{\text{Net irrigation requirements}} \quad (2)$$

II and RIS were computed for each farm block and subsystem. Net irrigation requirements were estimated for each crop from a soil root zone daily water balance, where crop evapotranspiration was calculated using the FAO methodology (Allen *et al.*, 1998). Rainfall and reference evapotranspiration were obtained from weather data collected at the INTA and SMN weather stations, used for San Martín and El Alto, respectively. The characteristic values of the standard crop coefficients (at the initial, mid-season and end of the late season stages), the soil root zone allowable depletion and the depth of the root zone were taken from Allen *et al.* (1998). The typical planting date and duration of the crop growing stages were part of the information provided by the subsystem managers. Soil data were taken from Angueira and Zamora (2007) and Galizzi *et al.*, (2015). The water balance model simulated irrigation events when the soil root zone water depletion reached the allowable rate, and the irrigation depth calculated was that necessary to refill the soil up to field capacity. Then, the seasonal net irrigation water requirements were computed by adding the water depths of the simulated irrigation events.

Survey to evaluate farmers' perception of the water delivery service. The farmers' perception of the water delivery service was evaluated by means of a field survey extended to a sample of 63 farmers with irrigation water rights (53 in the San Martín subsystem and 10 in El Alto subsystems) conducted between 2015 and 2017.

In order to optimize sampling resources, we applied judgmental sampling, a non-probability sampling technique, in which the researcher selects the farmers to be interviewed based on his/her knowledge and professional judgment (Malhotra y Birks, 1999; Arriaza, 2006; Taherdoost, 2016). The sample was stratified taking into consideration two factors that

could affect water use: the location of the farm block in the subsystem (from head to tail) and the type of farm blocks (SFB and CFB).

The questionnaire was structured in two sections. The first section aimed to characterize the socio-economic profile of the farmer. The second one was devoted to the irrigation system, the water delivery service, and the farmer's willingness to participate in the management body of a WUA. The sequence of the questions was intended to facilitate a fluent conversation and the intercalation of open questions and spontaneous opinions. The questionnaire was tested with a group of experts and amended accordingly before proceeding to make the field survey. The answers were codified in a spread sheet for posterior bivariate analysis using the SPSS (version 25.0) statistical software (IBM Corp, 2017).

2.5. Results

2.5.1. Management, operation and maintenance of the transferred and non-transferred subsystems

O&M of the San Martín and El Alto (transferred and non-transferred, respectively) subsystems was examined participatively with their respective managers. The farm blocks in San Martín were usually managed by WUA_{1st} within the WUA_{subsystem} APAZ-IV, that organized both operation and maintenance. WUA_{1st} were less common in El Alto, and, where they existed, they only had maintenance responsibilities, never operational ones, which in this case were assumed informally by some farmers. Some tertiary canals in San Martín were managed by WUA_{2nd}, also part of APAZ-IV. In El Alto, all the tertiary canals were managed by water masters of the SRRD Irrigation Service. According to the manager of APAZ-IV, the transfer of management allowed relatively flexible arranged rotations, so that current delivery schedules differed from the design-fixed rotation described above. However, in El Alto, the constitution of WUA_{1st} in the farm blocks has been more uncommon than in San Martín, and fixed rotations remain the main delivery schedule. Our farmers' survey confirmed these arrangements (Figure 2.4): 77% of those interviewed in San Martín declared that they belonged to a WUA_{1st} vs. 40% in El Alto; 81% of the farmers interviewed in San Martín declared that they received the water under an arranged schedule, while in El Alto this percentage was 50% only. In addition, the current number of turns was less than the 11 planned, although this was by decision of the farmers, related to their cropping practices (Prieto, 2006; Angella *et al.*, 2011).

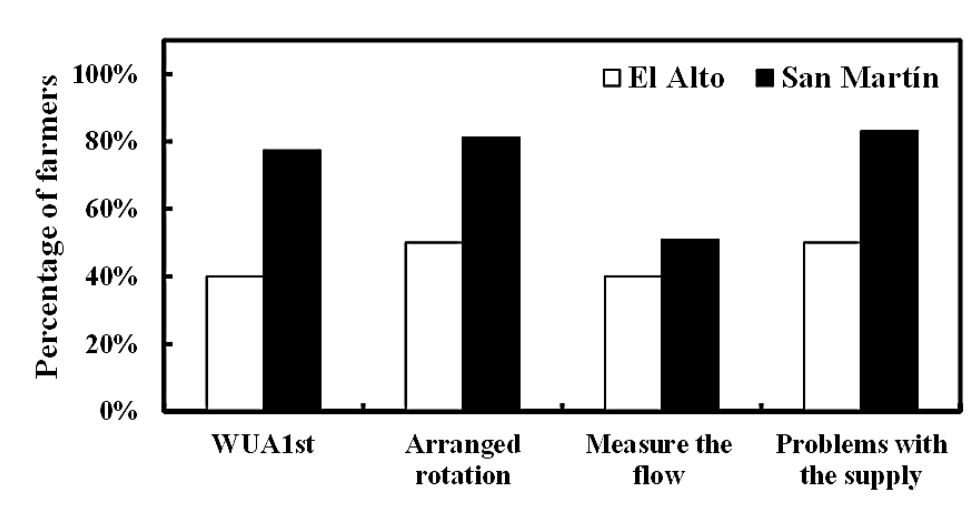


Figure 2.4. Percentage of farmers interviewed who belong to a first-order water user association (WUA1st) in the farm block, receive water under arranged rotation in the farm block, measure the flow rate at the farm entrance and perceive problems with the irrigation supply. El Alto and San Martín subsystems in the Rio Dulce irrigation scheme.

The organization of the maintenance of secondary, tertiary and quaternary canals also differed between the transferred and non-transferred subsystems. APAZ-IV drew up the maintenance plan and established repair priorities, to be executed under its supervision after approval by the SRRD Irrigation Service. Conversely, in El Alto, the SRRD Irrigation Service assumed this responsibility without consulting either the WUA_{1st} or the farmers. However, maintenance funding was common to both cases. The SRRD Irrigation Service was in charge of collecting the irrigation fees and, therefore, of the maintenance and the operational costs, that covered only about 10% of the budget, while the rest was public funding. The irrigation fee collection performance (ratio between collected and due irrigation fees) was estimated at around 70%, which was perceived as being satisfactory by the system manager, although it only covered 10% of the O&M cost. The majority of farmers in both subsystems stated that the irrigation rate was fair (Figure 2.5).

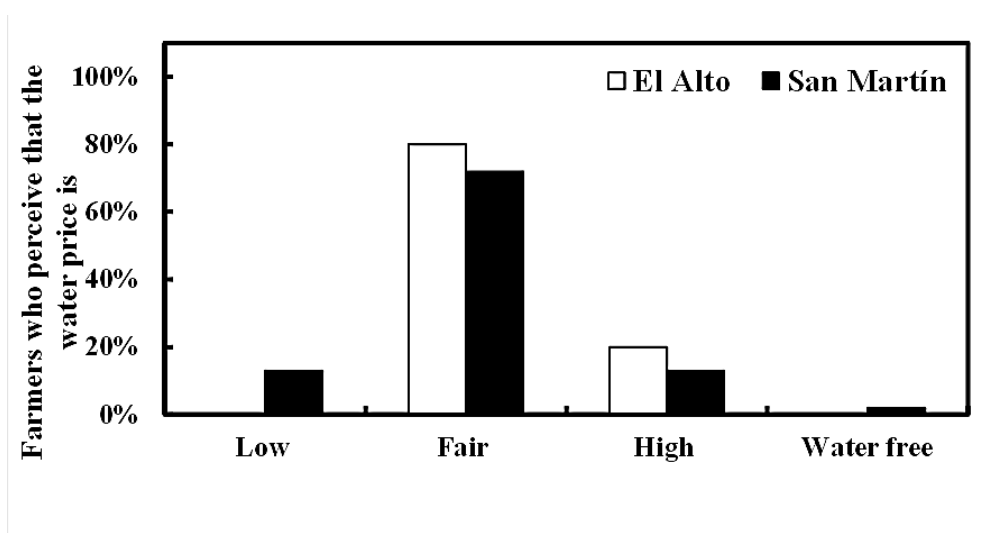


Figure 2.5. Percentage of farmers interviewed who perceive that the water tariff in the El Alto and San Martín subsystems of the Rio Dulce irrigation scheme is low, fair, high or free.

The organization and funding of the maintenance of the water courses distributing the water among the farms within the farm block was similar in both subsystems. This maintenance was usually organized by the administrator of the WUA_{1st}. If there was no WUA_{1st}, as often happened in El Alto, then one farmer or group of farmers took on the responsibility informally. Maintenance costs at this level were prorated proportionally to the area with irrigation water rights, as confirmed by 94 and 100% of the farmers interviewed in San Martín and El Alto, respectively.

2.5.2. Irrigation performance of the transferred and non-transferred subsystems

II was significantly higher in San Martín than in El Alto (Figure 2.6). This was more evident in the San Martín SFBs, since the CFBs behaved similarly in both systems. The number of farm blocks that reached $II > 1$ was higher in San Martín than in El Alto (Figure 7). None of the SFBs of El Alto reached $II > 1$ in any irrigation campaign (Figure 2.7a).

The most frequent crop in San Martín was alfalfa, followed by cotton, corn, soybean and vegetables (Figure 2.8). This diversity was more evident in the CFBs than in the SFBs, where alfalfa occupied 60% of the surface (Figure 2.8). However, the El Alto cropping pattern was dominated by cotton, which occupied 70% of the surface, this proportion being even higher in the CFBs (Figure 2.8). This cropping pattern also explained why, in the water restriction season, (2013-2014), II was the one most affected in the SFBs of El Alto (Figure 2.8).

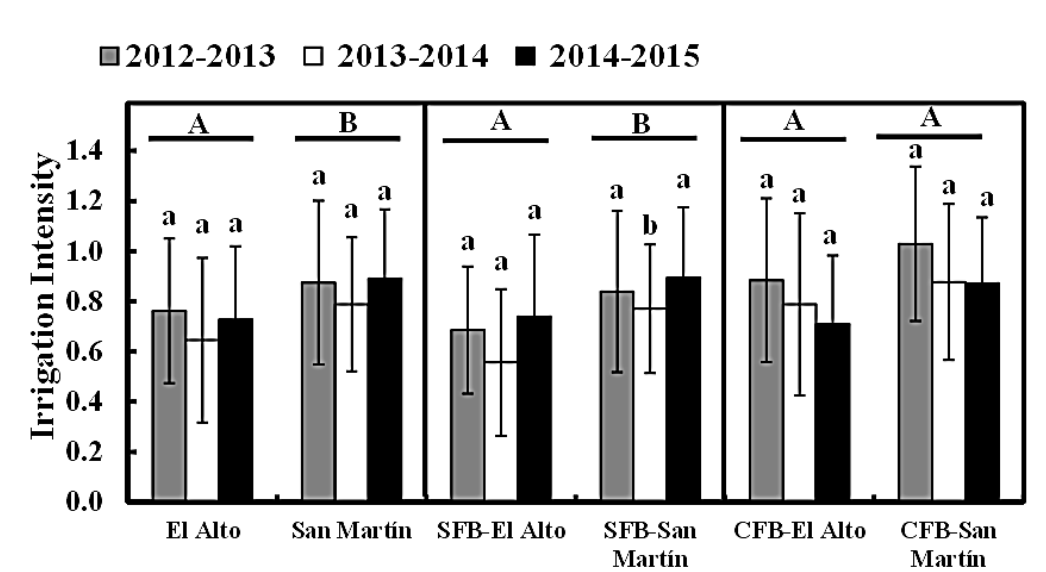


Figure 2.6. Irrigation Intensity for El Alto and San Martín subsystems and for smallholder (SFB) and commercial (CFB) farm blocks, in the Rio Dulce irrigation scheme. Capital letters indicate statistically significant differences between subsystems (right box) and between farms block types within subsystems (left boxes). Lowercase letters indicate statistically significant differences between subsystems/year (left box) and between farms block types/year within subsystems (right boxes). 95% probability level (LSD test).

Several farmers interviewed argued that growing alfalfa and diversifying the cropping pattern in the SRRD required reliability and flexibility in the water supply. Irrigation was necessary throughout the year to ensure alfalfa production, to meet marketing commitments when growing vegetables, and to pay the investment costs necessary for their growth. Apparently, the enhanced flexibility and reliability of the delivery schedules in San Martín conferred on the farmers of this subsystem the confidence needed to invest in and assume the risk of a diversified cropping pattern or a large area of alfalfa. On the other hand, the preferred crop in El Alto was cotton, which was grown with rain as the primary source of water plus supplementary irrigation depending on the rain. Therefore, the quality of the delivery service in the SRRD was not so important in the sectors where cotton was the main crop.

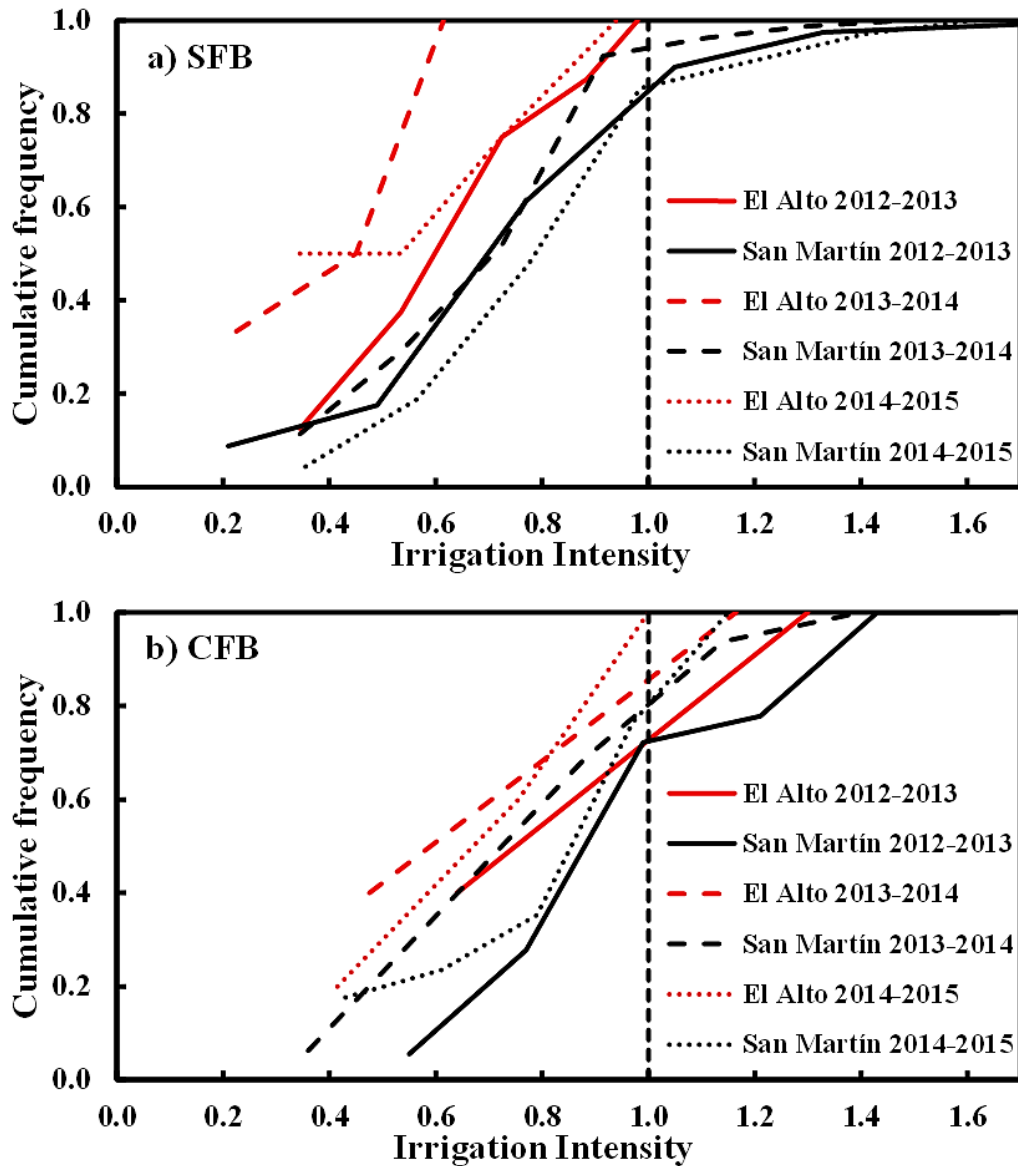


Figure 2.7. Cumulative frequency of the Irrigation Intensity for smallholder farm blocks (SFB) (a) and commercial farm blocks (CFB) (b) in three irrigation seasons, El Alto and San Martín subsystem, Rio Dulce irrigation scheme.

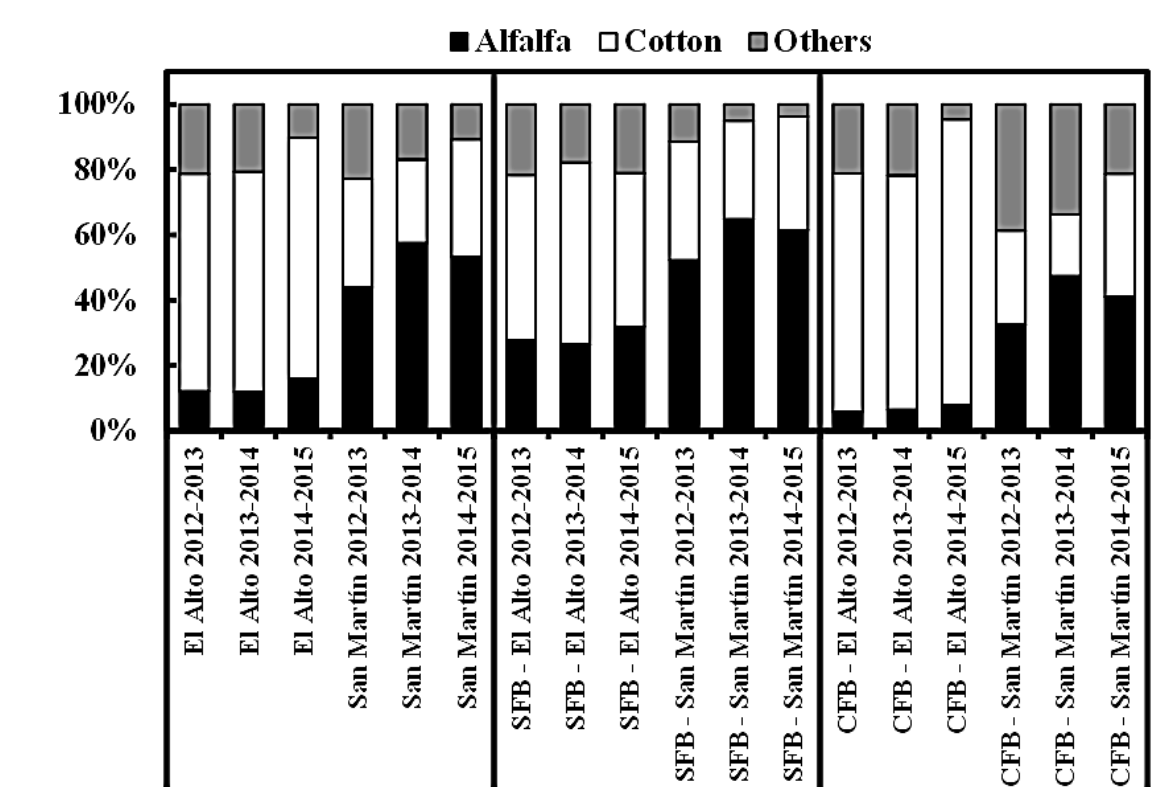


Figure 2.8. Percentage of area of alfalfa, cotton and other crops for subsystem (El Alto and San Martín), type of farm block (smallholder farm blocks, SFB, and commercial farm blocks, CFB) and irrigation season.

The difference in the quality of the service (and the consequent difference in II and cropping diversity) between El Alto and San Martín could be interpreted as being a consequence of the management transfer. However, it was difficult to discern what came first, the chicken or the egg. A study conducted by Prieto (2006) showed that, already in the period 1998-2001, that is, before the management transfer, in two CFB conforming one tertiary canal in San Martín, the irrigation intensity was about one, and alfalfa was the main crop combined with other minor ones. The CFBs in Prieto’s study were the most progressive in San Martín. Their II and cropping pattern was similar to the current ones in many CFBs of San Martín. Our interpretation was that the progressive CFBs studied by Prieto (2006) actually led the management transfer that took place in all San Martín, allowing more intensive cropping and irrigation throughout the system, on both CFBs and SFBs.

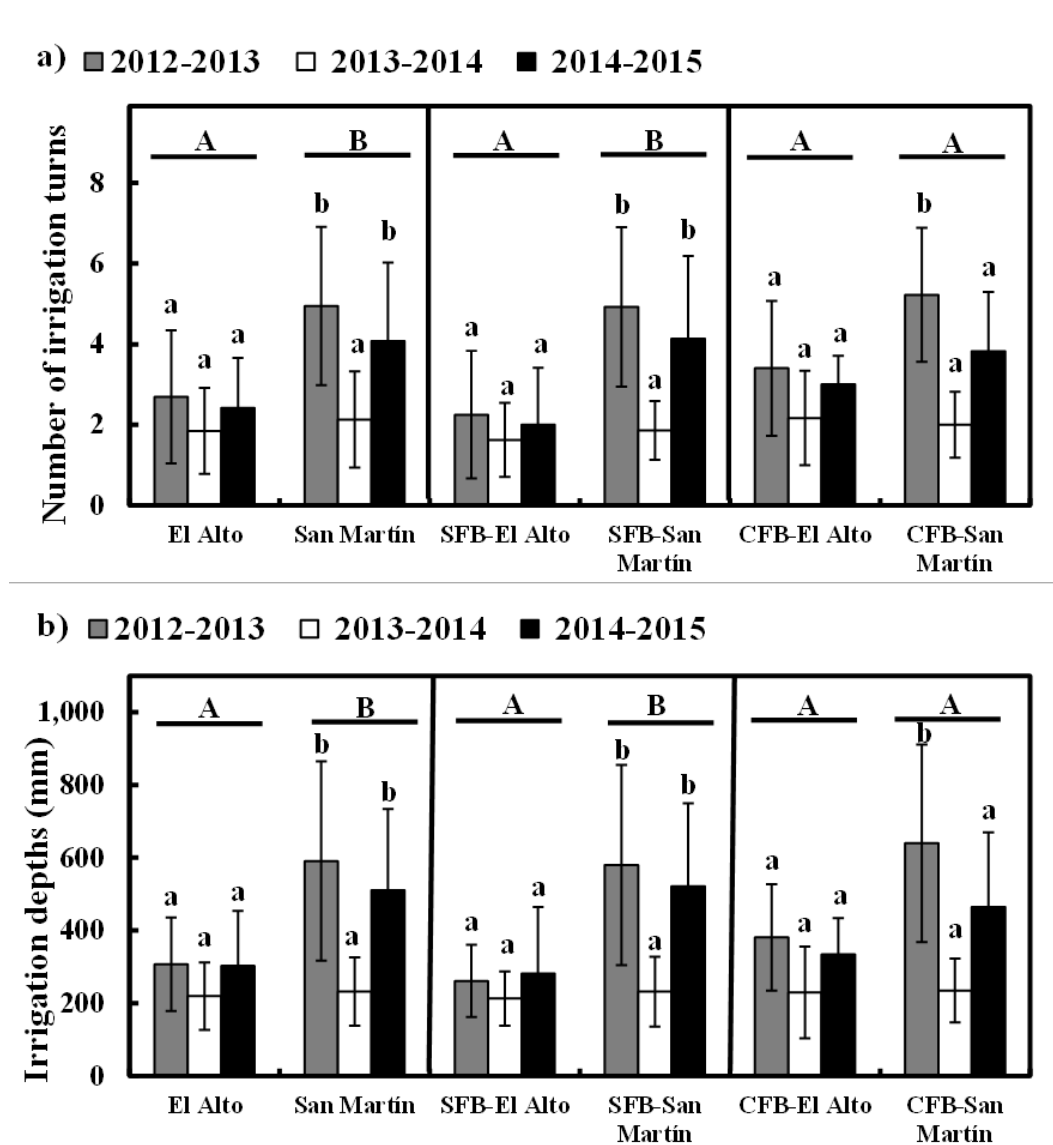


Figure 2.9. Number of irrigation turns (a) and irrigation depth applied (b) for subsystem (El Alto and San Martín), type of farm block (smallholder farm blocks, SFB, and commercial farm blocks, CFB) and irrigation season. Capital letters indicate statistically significant differences between subsystems (right box) and between farms block types within subsystems (left boxes). Lowercase letters indicate statistically significant differences between subsystems/year (left box) and between farms block types/year within subsystems (right boxes). 95% probability level (LSD test).

The cropping pattern and intensity of San Martín implied greater water requirements than in El Alto. Effectively, this translated into a number of turns (Figure 2.9a) and an irrigation depth (Figure 2.9b) that were more appreciable in San Martín than in El Alto, except in the season with supply restrictions. This difference was statistically significant between the SFBs of both subsystems, but not between their CFBs. The larger relative area of alfalfa in the SFBs than in the CFBs (Figure 2.7) could explain the different behavior of

these two types of farm blocks in this subsystem. However, the RIS, similar overall in San Martín and El Alto, was lower in the SFBs of El Alto than in the CFBs of the same subsystem and in the SFBs of San Martín (Figure 2.10). In the year of supply restrictions, it was higher in El Alto than in San Martín (Figure 2.10). The average RIS of 0.4 in the SFBs of El Alto indicated under-irrigation. Although less marked in the other types of farm blocks, this was the general pattern in both subsystems (Figure 2.10). The low RIS seemed to be the current situation of a decreasing trend reported in San Martín by Prieto () for the period 1995–2002, with a decrease during that period from 2.3 to 1.4. The average of nine turns and 864 mm of irrigation depth reported by Prieto in CFB of San Martín was reduced to 4 and 454 mm, respectively, in our period of study. This has translated into a further decrement of the RIS down to 0.5.

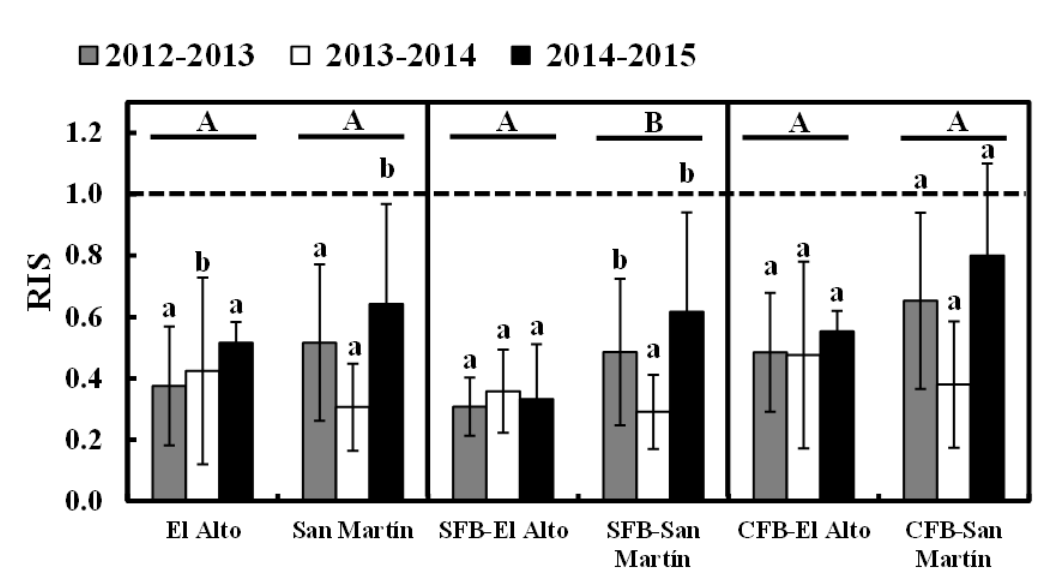


Figure 2.10. Relative Irrigation Supply (RIS) for subsystem (El Alto and San Martín), type of farm block (smallholder farm blocks, SFB, and commercial farm blocks, CFB) and irrigation season. Capital letters indicate statistically significant differences between subsystems (right box) and between farms block types within subsystems (left boxes). Lowercase letters indicate statistically significant differences between subsystems/year (left box) and between farms block types/year within subsystems (right boxes). 95% probability level (LSD test).

A RIS of 0.5 clearly indicated under-irrigation, although it is worth noting that in both our study and Prieto’s (2006), the crop water requirements were computed using standard crop coefficients (that assume potential crop growth). However, in irrigation districts with a relatively large performance gap (such as SRRD, Angella *et al.*, 2016), crops usually grow below their potential, thus their crop water requirements are also below it (Salgado &

Mateos, 2021). Therefore, it could be concluded that irrigation water usage in the SRRD has been progressively rationalized irrespectively of whether its management has been transferred or not. Nevertheless, any effect that the transfer of management could have had on the RIS would have been masked by its dramatic decrease throughout recent years.

2.5.3. *Farmers' perception of the water delivery service*

As mentioned above, in San Martín most farmers interviewed belonged to a WUA_{1st} and received water according to an arranged schedule, whereas, in El Alto, less than half of them were organized under a WUA_{1st} and half of them still received the water on a fixed rotation (Figure 2.4). Moreover, the percentage of farmers who measured the discharge (at water courses or turnout structures calibrated using current meters) at their farm turnout was higher in San Martín than in El Alto (51 and 40%, respectively, Figure 4). However, despite the enhanced delivery service in San Martín, the perception of water delivery problems was more frequent in San Martín than in El Alto (Figure 2.4).

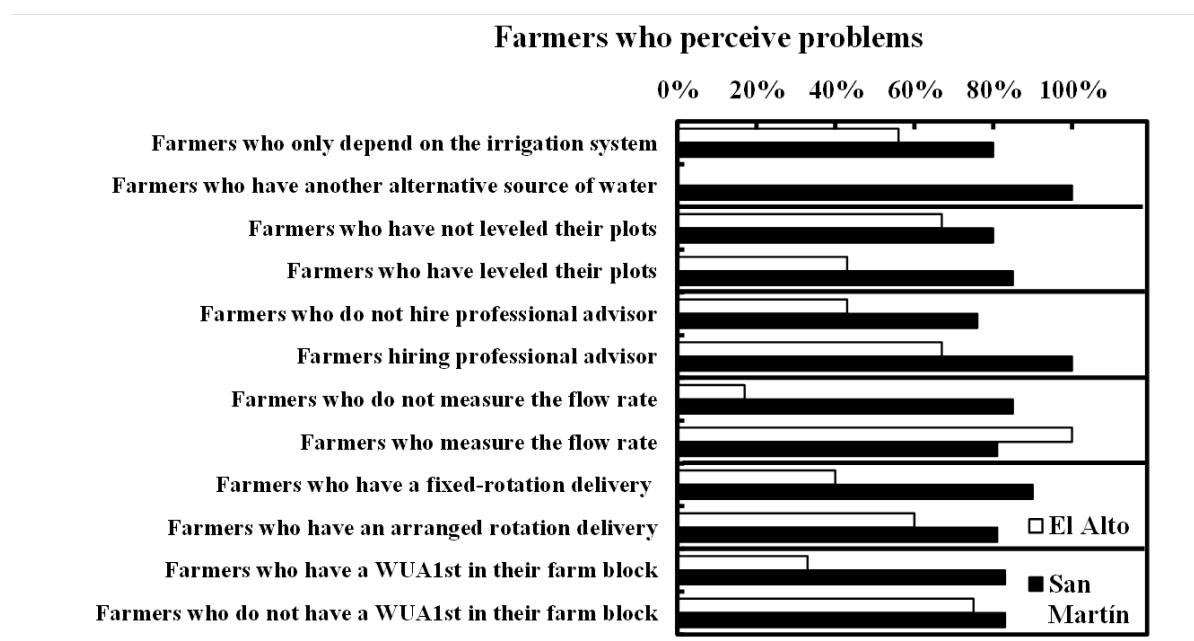


Figure 2.11. Percentage of interviewed farmers who perceive problems in the irrigation supply according to bivariate condition of the water supply, irrigation association and advice in the El Alto and San Martín subsystems.

The high perception of problems observed in San Martín was quite independent of their technical profile; it seemed that the problems were clearly visualized by them with all transparency, regardless of their technical level (Figure 2.11). However, the farmers who

perceived more problems in El Alto were predominantly those grouped in a WUA_{1st}, who received water in an arranged rotation, and measured the discharge at their turnouts or had hired professional advice (Figure 2.11). We understood that the problems in El Alto were less noticeable, so that perceiving them required them to have a higher level of technical knowledge. A different case was that of the farmers in El Alto, who had access to an alternative source of water (i.e., groundwater). These farmers declared that they did not perceive any problem (Figure 2.11), but this was probably because they could manage without the collective delivery network, which was not the case in San Martín.

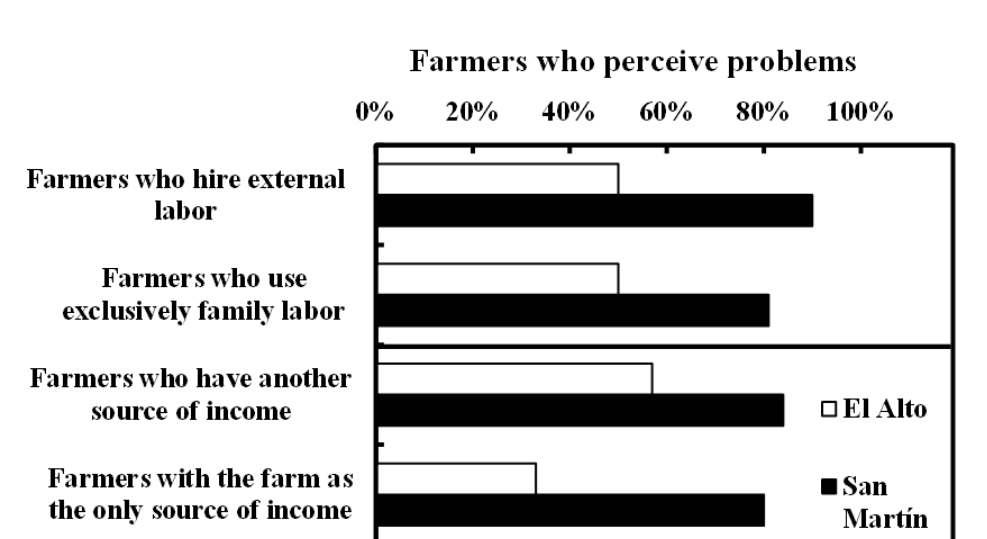


Figure 2.12. Percentage of interviewed farmers who perceive problems in the irrigation supply according to the bivariate socio-economic conditions in the El Alto and San Martín subsystems.

The contrast between the two subsystems observed in the technical profile of those perceiving problems was less evident when analysing their socio-economic profile (Figure 2.12). The perception of problems by the San Martín farmers was considerable regardless of their main source of income (exclusively agriculture or not) or labour (family or external workers). In El Alto, there was a lesser problem awareness than in San Martín for all the socioeconomic profiles, but it was not evident that any socioeconomic profile there stood out for its greater or lesser perception of difficulties (Figure 2.12).

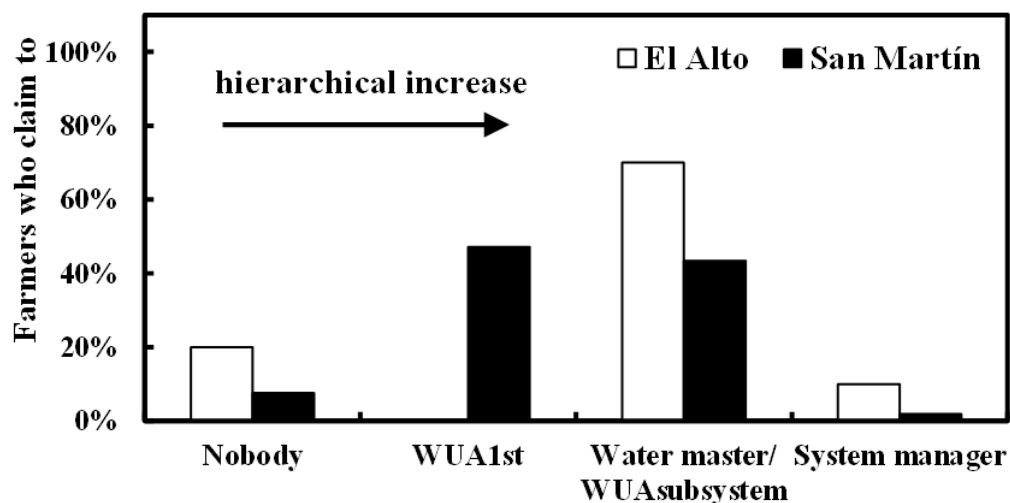


Figure 2.13. Percentage of farmers interviewed who address supply claims and requests to management levels of increasing hierarchy in El Alto and San Martín subsystems.

Many problems mentioned by the farmers were common to both subsystems and had been reported by Prieto (2006). They were related to water supply limitations, canal failure, presence of debris on the canal structures, illegal abstractions. The difference between both subsystems was in how the farmers transmitted these problems (Figure 2.13). About 20% of those of El Alto who perceived problems did not transmit them to any management level. Those who decided to report their supply problems went to the water master or to the scheme managers, but none went through the WUA_{1st}. On the contrary, the WUA_{1st} was the management level preferred by the farmers of San Martín to denounce their problems, followed by the WUA_{subsystem} (Figure 2.13). We understood that following the hierarchical chain to report problems and complaints was a sign of more transparent procedures than skipping intermediate levels or even resorting to the scheme management level (that should not interfere at the WUA level). The origin of the current regular procedures in San Martín was likely to be in the two progressive CFBs that had claimed the management transfer since the late 1990s and established a WUA_{2nd}. This early WUA_{2nd} successfully took on the responsibility of maintenance and flexible delivery (Prieto, 2006).

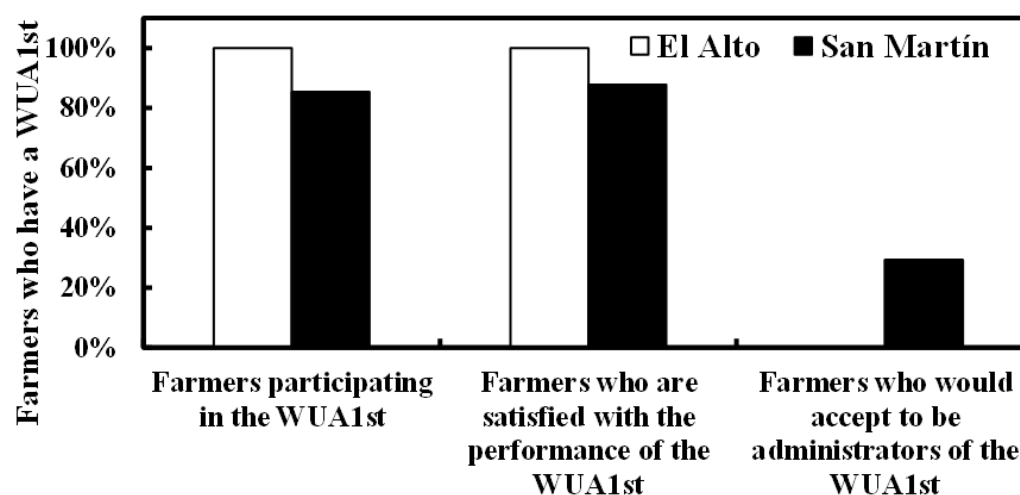


Figure 2.14. Percentage of interviewed farmers who, having a first-order water users association (WUA1st) in their farm block, and participate in the WUA1st, are satisfied with the performance of the WUA1st and would accept being involved in its management in El Alto and San Martín subsystems.

The farmers of the two subsystems also differed in their willingness to be involved in the management of the WUAs. In San Martín, more than a third would agree to be a management administrator if required, while in El Alto no one would be willing to replace people who have traditionally organized maintenance, let alone take over the management of the water (Figure 2.14).

2.6. Discussion

The contrast between the IMT-related improvement of the water delivery service in San Martín and the perpetuation of a somewhat rigid and opaque service in El Alto, with no well defined separation of functions at the lower management level, has similarities elsewhere. The two Egyptian irrigation schemes compared by Batt and Merkley (2010) resembled San Martín and El Alto. In the one in which the IMT process advanced further (farmers were self-organized in a strengthened WUA), the delivery schedule was flexible, maintenance response was rapid, farmer-manager communication channels were clear and therefore problem and conflict resolution was agile; in short, the farmers were satisfied. On the contrary, in the scheme in which the IMT was incomplete or unclear, farmers were dissatisfied with the water delivery, so many of them claimed a transfer of the service (Batt and Merkley, 2010). However, half-measures may result in unclear division of functions and

the farmers' reluctance to commit with management functions. This was the case in El Alto and in the Southeastern Anatolian Project (Turkey), where farmers ended up preferring to return the management of the WUAs to the government agency (Aydogdu *et al.*, 2015). Partial management transfer is likely also to be blocking the full development of APAZ-IV as an autonomous WUA. The conditions advised by Groenfeldt and Svendsen (2000) for IMT would then be met, the organizational and technical level of the delivery service could be enhanced, and public funding could be reduced (Mapson and Poulton, 2001).

It is interesting to note that contrasting IMT experiences occur within the same country. Just as San Martín and El Alto contrasted in SRRD, the two schemes compared by Batt and Merkley (2010) did so in Egypt. Moreover, the farmers' dissatisfaction with the WUAs of the Southeastern Anatolian Project in Turkey contrasted with farmers' satisfaction with the WUAs on Turkey's Aegean coast (Uysal and Atıç, 2010). Other examples of satisfactory IMT have been reported in China (Wang *et al.*, 2010), India (Meinzen-Dick *et al.*, 2002) and other developing countries. Even in less developed countries, like Sudan, there are examples of solid, democratic and transparent management structures that ensure satisfactory irrigation services with farmer participation (Ngirazie *et al.*, 2015). These conditions of transparency and a clear definition of roles and functions between management levels, underlined by Garcés-Restrepo *et al.* (2007) as conditions to guarantee successful IMT, were missing in El Alto, and therefore they would have to be developed if any IMT process were to be initiated in this subsystem. However, developing new participatory management structures and regulations for El Alto similar to those already existing in San Martín might not be straightforward. The relative success of IMT in San Martín relied on endogenous efforts as has happened in other IMT processes elsewhere (e.g., Colombia, Groenfeldt, and Svendsen, 2000). Pre-IMT initiatives, like farmers' sensitization and training, motivation of leaders, identification of professional managers, and rehabilitation and upgrading of the irrigation infrastructures might be pre-requisites in systems like El Alto.

The observation in El Alto that the farmers who first perceive deficiencies in the service, whether in operation or maintenance, were those with a higher technical level, not the most economically powerful ones, was revealing since it had been noted elsewhere (Figure 2.11). Bhatta *et al.* (2006) reported, in a collective irrigation scheme in Nepal, that the most demanding farmers of an appropriate irrigation service were those better trained technically. On the other hand, Sam and Shinogi (2015) observed that the degree of the

farmers' satisfaction with the delivery service in an irrigation scheme in Cambodia was independent of their economic level but related directly to the maintenance state of the irrigation infrastructure.

Another interesting finding was the progressive decrease in RIS observed in SRRD (from the study by Prieto (2006) to the present) regardless of the management of the subsystem (Figure 2.10). In other schemes, IMT has resulted in an increase in water supply. For instance, IMT in the Gezira irrigation scheme (Sudan) helped to remove supply bottlenecks and favored crop diversification. The RIS increased from 1.4 to 2.2 after the management transfer (Al Zayed *et al.*, 2015; Elshaikh *et al.*, 2018). Something similar occurred when management was transferred to the WUAs on Turkey's Aegean coast (Uysal and Atış, 2010). In both the Sudan and Turkey examples, the increase in RIS was accompanied by an increase in II. The latter was observed in San Martín; however, the RIS decreased in San Martín (Figure 2.10). Therefore, this decrease was the result of a process of reduction of water usage (observed also in El Alto), not fully understood, that evolved independently of the IMT process.

2.7. Conclusions

Processes like IMT are impossible to evaluate using controlled experiments. The alternative is thorough participative research using technical evaluations and social inquiry in case studies. Having transferred and non-transferred subsystems was an extraordinary opportunity for benchmarking and learning some lessons. However, the researcher has to be aware of differences in the socio technical initial conditions.

Water service in the transferred subsystem evolved to delivery schedules that were more flexible than those in the non-transferred subsystem. It is not clear whether flexibility allowed a more diversified cropping pattern and more utilization of the irrigation water rights or, the other way round, if moving into a more diversified cropping pattern impelled more flexible water delivery. However, the IMT accelerated the water management improvement for sure. Water use increased with IMT but did not imply an increase in the relative irrigation supply, which denoted overall under-irrigation. A historical decreasing trend of the relative irrigation supply in the system may be a confounding factor masking possible effects of the management transfer process. The IMT process and effects were more apparent in the commercial farm blocks than in the smallholder farm blocks, to the point that

part of the process and effects were also observed in the non-transferred subsystem.

The willingness to participate in the administration and management at any management level was greater in the transferred than in the non-transferred subsystem. Farmers in the transferred subsystem were more aware of the problems of the irrigation service than farmers in the non-transferred subsystem. The perception of problems in the non-transferred subsystem increased with the level of the farmers' professionalism and advice. However, their requests and complaints were transmitted through opaque channels, as opposed to transmission in the transferred subsystems, where they were elevated through the managers of the WUAs of increasing level.

One conclusion based on loose observations (our own observations in our case study and observations of other authors) was that half a transfer does not achieve the effectiveness of a full one and runs the risk of reversibility. This conclusion is specific to our case study and therefore cannot be extrapolated to other cases. Its generality or the conditions of its validity should be examined in future studies.

References

- Al Zayed IS, Elagib NA, Ribbe L, Heinrich J. 2015. Spatio-temporal performance of large-scale Gezira Irrigation Scheme, Sudan. *Agricultural Systems*, 133, 131-142.
- Alcon F, García-Bastida PA, Soto-García M, Martínez-Alvarez V, Martín-Gorriz B, Baille A. 2017. Explaining the performance of irrigation communities in a water-scarce region. *Irrigation Science*, 35(3), 193-203.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy.
- Angella G, García Vila M, López JM, Barraza G, Salgado R, Prieto Angueira S, Tomsic P, Fereres E. 2016. Quantifying yield and water productivity gaps in an irrigation district under rotational delivery schedule. *Irrigation Science*, 34, 71–83. DOI 10.1007/s00271-015-0486-0.
- Angella G, Prieto D, Salgado R, Salvatierra J, Wintten C, Coronel Lozano A, Sarria C, Ybarra R. 2011. *La evaluación del desempeño de los sistemas de riego como una herramienta para la mejora de su gestión*. In: XXIII Congreso Nacional del Agua.

ISSN 1853-7685 (in Spanish).

- Angueira C, Zamora E. 2007. *Oeste del área de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina*. Ed. INTA. ISSN 1850 4086. Serie informes técnicos EEASE N°40. Santiago del Estero, Argentina (in Spanish).
- Arriaza M. 2006. *Guía práctica de análisis de datos*. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa, Sevilla, Spain (in Spanish).
- Arun G, Singh DR, Kumar S, Kumar A. 2012. Canal irrigation management through water users' associations and its impact on efficiency, equity and reliability in water use in Tamil Nadu. *Agricultural Economics Research Review*, 25(conf), 409-419.
- Aydogdu MH, Karli B, Aydogdu M. 2015. Evaluation of attitude of stakeholders for irrigation water management: A case study of Harran Plain, Turkey. *J. Environ. Agric. Sci. (JEAS)*, 4, 42-47.
- Batt HA, Merkley GP. 2010. Water management and user association analysis for irrigation improvement in Egypt. *Irrigation and Drainage*, 59(2), 150-160.
- Bhatta KP, Ishida A, Taniguchi K, Sharma R. 2006. Performance of agency-managed and farmer-managed irrigation systems. A comparative case study at Chitwan, Nepal. *Irrigation and Drainage Systems*, 20(2-3), 177-191.
- Borgia C, García-Bolaños M, Li L, Gómez-Macpherson H, Comas J, Connor D, Mateos L. 2013. Benchmarking for performance assessment of small and large irrigation schemes along the Senegal Valley in Mauritania. *Agric. Water Manage.* 121, 19–26.
- Bos MG, Burton MA, Molden DJ. 2005. *Irrigation and drainage performance assessment: practical guidelines*. CABI publishing. Wallingford, UK.
- Caumo M, Gioria A, Santillán O. 2014. El área de riego del Río Dulce y la actividad agrícola de subsistencia. *Revista Trazos Universitarios*. May 2014. ISSN 1853-6425. Santiago del Estero, Argentina (in Spanish).
- Elshaikh AE, Yang SH, Jiao X, Elbashier MM. 2018. Impacts of legal and institutional changes on irrigation management performance: a case of the Gezira Irrigation Scheme, Sudan. *Water*, 10(11), 1579.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2017. *The future of food*

and agriculture – trends and challenges. Annual Report, Rome, Italy.

- Galizzi F, González C, Nazar P, Elias Tissera NJ, Ramírez NM, Gómez NA. 2015. Condición inicial de un suelo degradado por el uso agrícola continuado en la zona IV de riego del Rio Dulce (Provincia de Santiago del Estero). *X Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA*. Salta 21 al 22 de mayo de 2015 (in Spanish).
- Garces-Restrepo C, Vermillion D, Muñoz G. 2007. *Irrigation management transfer. Worldwide efforts and results*. FAO Water Reports 32. International Irrigation Management Institute, FAO, 62pp. Rome, Italy.
- García-Bolaños M, Borgia C, Poblador N, Dia M, Seyid OMV, Mateos L. 2011. Performance assessment of small irrigation schemes along the Mauritanian banks of the Senegal River. *Agricultural Water Management* 8, 1141–1152.
- Groenfeldt D, Svendsen M. (Eds.). 2000. *Case studies in participatory irrigation management*. The World Bank. Washington DC, USA.
- IBM Corp. 2017. *IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0*. Armonk, IBM Corp. New York, USA.
- Lozano D, Mateos L. 2008. Usefulness and limitations of decision support systems for improving irrigation scheme management. *Agric. Water Manage.* 95, 409–418.
- Malano H, Burton M. 2001. *Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector*. International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage, 43 pp. FAO, Rome, Italy.
- Malano H, Burton M, Makin I (Eds.). 2004. Benchmarking of irrigation and drainage sectors. Special issue, *Irrigation and Drainage*, 53(2), 214 pp
- Malhotra NK, Birks DF. 1999. *Marketing research. An applied approach*. Prentice Hall, London, United Kingdom.
- Mapson J, Poulton D. 2001. *IMT country profiles*. INPIM-International Email Conference on Irrigation Management Transfer. Australia.
- Meinzen-Dick R, Raju KV, Gulati A. 2002. What affects organization and collective action for managing resources? Evidence from canal irrigation systems in India. *World Development*, 30(4), 649-666.

- Morello J, Adámoli J. 1974. Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco argentino. Segunda parte. Vegetación y ambiente de la provincia del Chaco. La vegetación de la República Argentina, *Serie Fitogeográfica*, 13, 130. (in Spanish).
- Ngirazie LA, Bushara AI, Knox JW. 2015. Assessing the performance of water user associations in the Gash Irrigation Project, Sudan. *Water International*, 40(4), 635-646.
- Prieto D, Angella G, Angueira MC, Carrera AP, Moscuza C. 2005. Indicadores de desempeño del sistema de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. *Uso y gestión del Agua en Tierras Secas* (No. 11, pp. 55-78) (in Spanish).
- Prieto D. 2006. *Modernization and the evolution of irrigation practices in the Río Dulce Irrigation Project, Santiago del Estero, Argentina: Una Tarea de Todos*. (Thesis Doctoral), Wageningen University. Wageningen, the Netherlands.
- Romanella C. 1971. *Planificación del riego en el área del proyecto del Río Dulce*. Informe Final. AyEE de la Nación Argentina. Santiago del Estero, Argentina (in Spanish).
- Salgado R. and Mateos L. 2021. Evaluation of different methods of estimating ET for the performance assessment of irrigation schemes. *Agricultural Water Management*, 243 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106450>.
- Shah T, Van Koppen B, de Lange DMM, Samad M. 2002. *Institutional alternatives in African smallholder irrigation: Lessons from international experience with irrigation management transfer* (Vol. 60). IWMI. Colombo, Sri Lanka.
- Sam S, Shinogi Y. 2015. Performance assessment of farmer water user community: a case study in Stung Chinit Irrigation System, Cambodia. *Paddy and Water Environment*, 13(1), 19-27.
- Skogerboe GV, Merkley GP. 1996. *Irrigation maintenance and operations learning process*. Water Resources Publications, LLC., Highlands Ranch, Colorado, USA; 369 pp.
- Skogerboe GV, Merkley GP, Rifenburg RF. 2003. *Establishing Sustainable Farmer-Managed Irrigation Organizations*. Utah State University. 344 pp. Logan, UT, USA.
- Taherdoost H. 2016. Sampling methods in research methodology: How to choose a sampling technique for research. *International Journal of Academic Research in Management* 5(2):18-27. DOI: 10.2139/ssrn.3205035.
- Uysal ÖK, Atış E. 2010. Assessing the performance of participatory irrigation management

over time: A case study from Turkey. *Agricultural Water Management*, 97(7), 1017-1025.

Vermillion DL. 1997. *Impacts of irrigation management transfer: a review of the evidence* (Vol. 11). IWMI. Colombo, Sri Lanka.

Vermillion DL, Sagardoy JA. 1999. *Transfer of irrigation management services: guidelines* (No. 58). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy.

Wang J, Huang J, Zhang L, Huang Q, Rozelle S. 2010. Water governance and water use efficiency: the five principles of WUA management and performance in China 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(4), 665-685.

CAPÍTULO 3.

EVALUATION OF DIFFERENT METHODS OF ESTIMATING ET FOR THE PERFORMANCE ASSESSMENT OF IRRIGATION SCHEMES

Ramiro Salgado y Luciano Mateos

Publicado en Agricultural Water Management 243 (2021) 106450

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106450>

CAPÍTULO 3.

Evaluation of different methods of estimating ET for the performance assessment of irrigation schemes

3.1. Abstract of Chapter 3

In the assessment of irrigation schemes, the accuracy of performance indicators related to the water balance could be improved by estimating crop evapotranspiration (ET_c) using remote sensing techniques. The two main remote sensing approaches to estimating ET_c are the surface energy balance and the FAO56-based approach that uses the ability of vegetation indices (VI) to trace the crop coefficient. Both approaches were evaluated comparatively at the Río Dulce irrigation scheme in Argentina (where the predominant crops are cotton, alfalfa, and maize) using products from the Landsat 7 and 8 sensors provided by the EEFlux application. The first analysis used field-specific, VI-derived basal crop coefficients obtained for 1743 fields using series of 9–29 satellite images along the 2014–15 irrigation campaign. The second analysis used 30 fields (grown with cotton and maize) where the actual irrigation schedules in the 2014–15 irrigation campaign were known. A root zone soil water balance was computed in these fields using the FAO56 dual approach with field-specific, VI-derived basal crop coefficients. The ET_c obtained from the water balance was compared with the ET_c estimated using a single crop coefficient approach that uses field-specific VI and takes into account soil evaporation (herein called synthetic approach), and with the ET_c obtained with the METRIC surface energy balance model as facilitated by the EEFlux application. The third analysis was a simulation analysis of errors in the estimation of the ET_c due to the interpolation to daily values of single crop coefficients and basal crop coefficients determined at hypothetical satellite overpass intervals of longer than one day. The VI-derived basal crop coefficient curves obtained for the 1743 fields of the first analysis were below the locally adopted standard (not field-specific) basal crop coefficient. Crop evapotranspiration in the 8005 ha covered by this analysis was about 20 % higher when applying standard non-field specific curves than when applying VI-derived curves. This difference pointed to the importance of using field-specific estimations of ET_c . In the analysis carried out on the 30 selected fields, the ET_c estimated using the VI-based approach

agreed well with the ET_c obtained from the water balance except under water deficit conditions. The crop coefficients obtained for these fields using the METRIC model correlated with those obtained by applying the VI-based method, although the former tended to be higher than the latter in the lower value range. The analysis of interpolation errors showed that when satellite overpass frequency is greater than one week and water deficit is mild or inexistent, the interpolation of crop coefficients (for instance, of those derived from an energy balance) gives errors of ET_c estimations that are greater than those resulting from the VI-based approach. Under water deficit conditions, the VI-based approach systematically overestimates evapotranspiration.

3.2. Resumen del Capítulo 3

En la evaluación de los sistemas de riego, la precisión de los indicadores de desempeño relacionados con el balance hídrico podría mejorarse estimando la evapotranspiración de los cultivos (ET_c) utilizando técnicas de teledetección. Los dos enfoques principales de teledetección para estimar la ET_c son el balance de energía superficial y el enfoque basado en FAO56 que utiliza la capacidad de los índices de vegetación (VI) para rastrear el coeficiente de cultivo. Ambos enfoques fueron evaluados comparativamente en el sistema de riego de Río Dulce en Argentina (donde los cultivos predominantes son algodón, alfalfa y maíz) utilizando productos de los sensores de Landsat 7 y 8 proporcionados por la aplicación EEFlux. El primer análisis utilizó coeficientes de cultivo basales derivados de VI específicos de campo obtenidos para 1743 campos utilizando series de 9 a 29 imágenes de satélite a lo largo de la campaña de riego 2014-15. El segundo análisis utilizó 30 campos (cultivados con algodón y maíz) donde se conocían los programas de riego reales de la campaña de riego 2014-15. Se calculó un balance hídrico del suelo en la zona donde crecen las raíces en estos campos utilizando el enfoque dual de FAO56 con coeficientes de cultivo basales derivados de VI específicos de campo. La ET_c obtenida del balance hídrico se comparó con la ET_c estimada usando un enfoque de coeficiente de cultivo único que usa VI específico del campo y toma en cuenta la evaporación del suelo (en este caso llamado enfoque sintético), y con la ET_c obtenida con el modelo METRIC del balance de la energía superficial como lo facilita la aplicación EEFlux. El tercer análisis fue un análisis de simulación de errores en la estimación de la ET_c debido a la interpolación a los valores diarios de los coeficientes de cultivo únicos y los coeficientes de cultivo basales determinados en intervalos hipotéticos de sobrepaso de satélite de más de un día. Las curvas de coeficiente de cultivo basal derivadas

de VI obtenidas para los 1743 campos del primer análisis estaban por debajo del coeficiente de cultivo basal estándar adoptado localmente (no específico de campo). La evapotranspiración del cultivo en las 8005 ha cubiertas por este análisis fue aproximadamente un 20 % mayor cuando se aplicaron curvas estándar no específicas de campo que cuando se aplicaron curvas derivadas de VI. Esta diferencia señaló la importancia de utilizar estimaciones específicas de campo de ET_c . En el análisis realizado en los 30 campos seleccionados, la ET_c estimada utilizando el enfoque basado en VI coincidió bien con la ET_c obtenida del balance hídrico excepto en condiciones de déficit hídrico. Los coeficientes de cultivo obtenidos para estos campos utilizando el modelo METRIC se correlacionaron con los obtenidos aplicando el método basado en el VI, aunque los primeros tendieron a ser más altos que los segundos en el rango de valores más bajos. El análisis de los errores de interpolación mostró que cuando la frecuencia de paso elevado de los satélites es mayor de una semana y el déficit hídrico es leve o inexistente, la interpolación de los coeficientes de cultivo (por ejemplo, de los derivados del balance de energía superficial) arroja errores de estimaciones de ET_c superiores a los resultantes del enfoque basado en VI. En condiciones de déficit de agua, el enfoque basado en IV sobreestima sistemáticamente la evapotranspiración.

3.3. Introduction

Irrigation scheme performance assessment is imperative in a world with an increasing population and food demand, where water scarcity is constraining agricultural production more and more, and emerging sectors compete for the available water resources. Several efforts have been made in the last decades to formulate a framework and guidelines for irrigation scheme performance assessment. Relevant examples of these efforts are the Performance Assessment Program of the International Water Management Institute (Molden et al., 1998); the Guidelines for Benchmarking in the Irrigation and Drainage Sector of the International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage (Malano and Burton, 2001); and the Task Force on Benchmarking of Irrigation and Drainage Projects of the International Commission on Irrigation and Drainage (Malano et al., 2004). A prominent set of performance indicators, the outcome of these efforts, refers to the water balance. These indicators have been widely applied to the internal assessment (e.g., Morábito et al., 1998; Lozano and Mateos, 2008) and benchmarking (e.g., Rodríguez-Díaz et al., 2008; Borgia et al., 2013; Zema et al., 2018) of irrigation schemes. The accuracy of performance

indicators related to the water balance could be improved by estimating evapotranspiration (ET) using remote sensing techniques (Bos et al., 2005). Some of the latter's early applications in the evaluation of irrigation scheme performance were carried out in South America (Menenti et al., 1989; Roerink et al., 1997; Bastiaanssen et al., 2001). With the advent of the Google Earth Engine (a computing platform based primarily on satellite imagery that allows users to run planetary-scale geospatial analysis on Google's infrastructure), this type of application is increasingly within the reach of researchers, developers and water managers.

Two main approaches to estimating crop evapotranspiration (ET_c) assisted by remote sensing techniques have become common in agricultural water use studies (González-Dugo et al., 2009; Taghvaeian and Neale, 2011). The first approach partitions the available energy by using the radiometric surface temperature (derived from thermal band imagery) to estimate the sensible heat flux and compute latent heat as a residual to the surface energy balance (e.g., Kustas and Norman, 1996; Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007a). The second approach is based on the ability of multispectral vegetation indices (VI), derived from surface reflectance data, to trace the crop's growth and estimate the crop coefficient (Bausch and Neale, 1989; Pôças et al., 2020). This approach is unable to detect the reduction in ET_c due to stomata closure, but it generates spatially-distributed crop coefficients that, multiplied by a reference evapotranspiration (estimated daily from local weather station data), provide estimates of field-specific potential (stomatal conductance not limited by water deficit) evapotranspiration (González-Dugo et al., 2009).

Various forms of the remote sensing surface energy balance approach have been applied to upscale the estimations of ET to project scale. For example, Droogers and Bastiaanssen (2002) combined the hydrological model SWAP with ET estimated with the SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land; Bastiaanssen et al. 1998) model to evaluate the performance of an irrigation district in Turkey. Similarly, Taghvaeian et al. (2018) calculated a water balance, with ET also estimated with SEBAL, to obtain irrigation performance indicators for an irrigation district in Southern California. Allen et al. (2007a) mapped ET across irrigation districts in Idaho, California, and New Mexico using METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration; Allen et al., 2007b), and Santos et al. (2008) used the same model for similar purposes in southern Spain. The ReSET (Remote Sensing of Evapotranspiration; Elhaddad and García, 2011) model has been used to map ET across an irrigation district in California (Elhaddad and García, 2014)

and to feed a water balance for obtaining irrigation performance assessment indicators in an irrigation district in Spain (Chalghaf et al., 2015). However, the VI-based crop coefficient approach has been used less on a large scale (examples are in González-Dugo et al., 2013 and Segovia-Cardozo et al., 2019) but more for irrigation advisory services (D'Urso et al., 2010; Melton et al., 2012; Calera et al., 2017).

In both approaches, remote measurements are taken at time intervals, which depend on the sensor overpass frequency. To estimate ET_c for dates between measurements, daily interpolation is needed, and the error due to this interpolation may depend on the remote sensing approach used to estimate ET_c . Satellite overpass frequency varies from satellite to satellite. In addition, a compromise between temporal and spatial resolution is needed to meet the goals of agricultural applications. High spatial resolution (< 100 m) is required in most cases for these applications. The number of sensors on board of satellites that meet the condition of high spatial resolution is limited. This limitation is even greater if the energy balance approach is to be used, i.e., if measurements of radiometric surface temperature are needed. A time resolution of less than one week is rare; two to four weeks is common, although the use of constellations of satellites may help in some situations to increase the time resolution. These constraints condition the accuracy of the two main remote sensing approaches to estimating ET_c , making the selection of the method a challenge.

The objective of this study was a comparative evaluation of the two remote sensing approaches for the estimation of ET_c in the performance assessment of irrigation schemes. The two methods evaluated were the FAO56 method (Allen et al., 1998) with crop coefficients derived from a vegetation index (following Mateos et al., 2013), and the METRIC model (Allen et al., 2007a) as executed by the Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) application (Allen et al., 2015). The evaluation used the Río Dulce irrigation scheme (in the province of Santiago del Estero, Argentina) as a study case. First, the study compared estimations of ET_c (for individual crops and for the entire cultivated area of 8005 ha) using standard (not field-specific) crop coefficients with estimations using field-specific, VI-based crop coefficients. Second, in a set of 30 fields where the irrigation schedule was known, the study compared the field-specific, VI-based approach with METRIC. Finally, the study included an evaluation of errors in the estimation of the crop's evapotranspiration due to the interpolation to daily values of single crop coefficients and basal crop coefficients determined at hypothetical satellite overpass intervals of longer than one day. The evaluation of interpolation errors was related to the comparative evaluation of the two remote sensing

approaches for ET_c estimation as both approaches were based on measurements made at discontinuous satellite overpass dates, so interpolation at intermediate dates was necessary.

3.4. Material and Methods

3.4.1. Remote sensing-based evapotranspiration models

3.4.1.1. The FAO56 method to obtain K_c and VI-derived K_c

The method proposed by the FAO to estimate ET_c consists of multiplying a reference evapotranspiration by a crop coefficient (Doorenbos and Pruitt, 1977; Allen et al., 1998). Reference evapotranspiration (ET_o) is calculated with the Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998) from meteorological variables measured at ground weather stations. The crop coefficient, K_c , is the quotient between the ET_c of the crop concerned and ET_o . Therefore:

$$ET_c = K_c ET_o \quad (3.1)$$

K_c may be a single coefficient or be split into two components (dual approach), direct evaporation from the soil surface and plant transpiration (Allen et al., 1998):

$$K_c = K_{cb} K_s + K_e \quad (3.2)$$

where K_{cb} is the basal crop coefficient (addressing plant transpiration under unstressed conditions), K_s quantifies the reduction in crop transpiration due to soil water deficit, and K_e is the soil evaporation coefficient.

The standard procedure (Allen et al., 1998) for developing the K_c and K_{cb} curves requires three-characteristic value: those during the initial stage ($K_{c\ ini}$, $K_{cb\ ini}$), the mid-season stage ($K_{c\ mid}$, $K_{cb\ mid}$) and at the end of the late season stage ($K_{c\ end}$, $K_{cb\ end}$). The curves are constructed by connecting straight-line segments through each of the four growth stages (initial, crop development, mid-season, and late season). Horizontal lines are drawn through $K_{c\ ini}$ in the initial stage and through $K_{c\ mid}$ in the mid-season stage. Straight lines are drawn from $K_{c\ ini}$ to $K_{c\ mid}$ in the course of the crop development stage and from $K_{c\ mid}$ to $K_{c\ end}$ in the course of the late season stage. Herein, the K_c and K_{cb} curves developed like this will be called $K_{c,standard}$ and $K_{cb,standard}$, respectively.

Since both K_{cb} and multispectral VIs obtained by remote sensing techniques represent crop development (Choudhury et al. 1994), K_{cb} can be derived from VI (Bausch and Neale,

1987; Neale et al., 1989). The relation between some VIs and the ground cover fraction (f_c) is approximately linear in the range from bare soil to near full ground cover (Huete et al., 1985; González-Dugo and Mateos, 2008), thus:

$$f_c = \frac{VI - VI_{\min}}{VI_{\max} - VI_{\min}} \quad (3.3)$$

where VI_{\min} and VI_{\max} are the values of VI for $f_c = 0$ and $f_c = 1$, respectively. On the other hand, researches have obtained different linear relationships between VIs and K_{cb} (Pôças et al., 2020). Mateos et al. (2013) validated the following normalized form of these linear relationships to obtain the generic expression:

$$K_{cb,VI} = \min \left[K_{cb,max}, \frac{K_{cb,max}}{f_{c,Kcbmax}} \left(\frac{VI - VI_{\min}}{VI_{\max} - VI_{\min}} \right) \right] \quad (3.4)$$

According to this equation, the linear increase of K_{cb} with VI is from the value of VI (VI_{\min}) corresponding to bare soil ($f_c = 0$) to the value of VI (VI_{\max}) corresponding to pure vegetation ($f_c = 1$). $K_{cb,max}$ is the maximum value of K_{cb} , generally equal to $K_{cb,mid}$. $K_{cb,mid}$ corresponds to $f_c = f_{c,max}$ (Pereira et al., 2020ab). If for some reason the crop in the region of interest is different from the standard crop, then a local value of $K_{cb,max}$ can be used in Eq. 3.10, in this case associated to its specific f_c ($f_{c,Kcbmax}$). Since $f_c = 1$ is not always achieved (Allen and Pereira, 2009), Eq. 3.4 ensures that the computed K_{cb} does not exceeds $K_{cb,max}$, (achieved at $f_c = f_{c,Kcbmax}$), and also ensures coherence with the FAO-56 method to determine actual K_{cb} . Although Allen et al. (1998) recommended a minimum value of K_{cb} close to 0.15, for simplicity, Eq. 3.4 assumes $K_{cb} = 0$ for $f_c = 0$. Setting K_{cb} to zero acknowledges the fact that evaporation of bare soil will reduce to zero or nearly zero over extended drying periods (Allen et al., 2005). Anyway, choosing a minimum K_{cb} closer to 0.15 would have required adapting Eq. 3.4, but the effect on the comparisons presented in this paper would have been negligible.

K_s equals one for unstressed crops. Thus, the potential crop coefficient of a specific crop may be obtained from Eq. 3.2, making $K_s = 1$. For water-stressed crops, K_s may be computed as (Allen et al., 1998):

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{(1 - p) TAW} \quad \text{If } D_r < (1-p) TAW \quad (3.5a)$$

$$K_s = 1 \quad \text{If } D_r \geq (1-p) TAW \quad (3.5b)$$

where D_r is the root zone water depletion (mm), TWA is the root zone total available water (mm) and p is the fraction of the TAW below which transpiration is reduced. The depth of the root zone (Z_r , m) may be calculated as:

$$Z_r = Z_{r \min} + (Z_{r \max} - Z_{r \min}) \frac{K_{cb}}{K_{cb, \max}} \quad (3.6)$$

where $Z_{r \max}$ (m) and $Z_{r \min}$ (m) are the maximum effective root depth and the effective root depth during the initial stage of crop growth. Therefore, TAW is

$$TAW = 1000(\theta_{FC} - \theta_{WP})Z_r \quad (3.7)$$

where θ_{FC} and θ_{WP} are the water content at field capacity and wilting point, respectively (in $m^3 m^{-3}$).

$D_{r,i}$ in Eq. 3.5a may be computed with a daily water balance in the soil root zone as:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} + ET_{c,i} - P_i - I_i + (RO_i + DP_i) \quad (3.8)$$

where $D_{r,i}$ is the root zone water depletion at the end of day i (mm), $D_{r,i-1}$ (mm) is the root zone water depletion at the end of the previous day, $i-1$, and $ET_{c,i}$, P_i , I_i , RO_i , and DP_i are crop evapotranspiration, precipitation, irrigation, rainfall runoff from the soil surface, and water loss out of the root zone by deep percolation, respectively, on day i and expressed in mm. P_i was measured, $ET_{c,i}$ was computed with equations 3.1 to 3.5, RO_i was computed with the curve number method (NRCS, 2004), DP_i was estimated as the soil water in excess of field capacity, and I_i was simulated (according to a given irrigation strategy) or measured, depending on the application (sections 3.2.4 and 3.2.5).

The soil evaporation coefficient, K_e , is calculated taking into consideration topsoil wetting events (due to irrigation or rainfall) and the availability of energy at the soil surface (Allen et al., 1998):

$$K_e = \min[K_{c \max} f_{ew}; K_r (K_{c \max} - K_{cb})] \quad (3.9)$$

where K_r is an evaporation-reduction coefficient dependent on the cumulative depth of water depleted from the topsoil, $K_{c \max}$ is the maximum value of K_c , following rain or irrigation (with $K_{cb} = K_{cb \max}$), and f_{ew} is the fraction of the soil that is both exposed ($1 - f_c$) and wetted. Following rain or irrigation, $K_r = 1$. As the soil surface dries, K_r is reduced linearly with cumulative evaporation, to become zero when no water is left for evaporation in the upper soil layer (Allen et al., 1998).

Therefore, the application of the dual crop coefficient requires computing a water balance at the upper soil layer and a soil root zone water balance if crop water stress is to be considered. Computing any of the two water balances implies knowing the dates and depths of irrigation and rainfall events on every field, which is rarely viable when dealing with large irrigation areas. In this case, the single crop coefficient approach is more practical since it assumes typical (not field-specific) wetting conditions. However, satellites provide VIs across large irrigation areas at high spatial resolution, thus one may want to profit from field-specific VIs to improve the accuracy and spatial resolution of the estimation of ET_c . The most straightforward alternative would be applying Eq. 3.1 with K_c estimated using one relationships between VI and K_c . For instance, this was the method chosen by Segovia-Cardozo et al. (2019) to estimate ET_c in Spanish irrigation schemes based on the linear VI- K_c relationship proposed by Calera et al. (2005). Another alternative would be Eq. 3.2 with K_{cb} obtained from one of the published VI- K_{cb} linear relationships (Calera et al. 2017) and running a water balance to obtain K_e and K_s . This second option, chosen for instance by Pôças et al. (2015), requires knowing or assuming the irrigation schedules of the fields in the area of study. A third option, somehow intermediate between the two previous ones, uses field specific VIs to obtain field-specific $K_{cb,VI}$ (Eq. 3.4) and then uses approximate soil-wetting information (rainfall data measures at local weather stations and typical irrigation frequencies) to approximate K_c to field-specific conditions. One way to make such an approximation is in Mateos et al. (2013), where the approximate K_c was called the synthetic crop coefficient ($K_{c,synthetic}$) so as not to be confused with the FAO-56 single crop coefficient:

$$K_{c,synthetic} = K_{c,bare \ soil} + (1 - K_{c,bare \ soil})K_{cb,VI} \quad \text{if } K_{cb,VI} < 1 \quad (3.10a)$$

$$K_{c,synthetic} = 1 + \frac{K_{c \max} - 1}{K_{cb,max} - 1} (K_{cb,VI} - 1) \quad \text{if } K_{cb,VI} \geq 1 \quad (3.10b)$$

where $K_{c,bare\ soil}$ is K_e computed with Eq. 3.9 applied to bare soil ($K_{cb} = 0$) and averaged on the time interval corresponding to each satellite overpass for which VI (and thus $K_{cb,VI}$) was available. If $K_{cb,VI} > 1$ on a given date, then $K_{c,synthetic}$ will depend only on the $K_{cb,VI}$ for that date and on the crop-characteristic parameters $K_{c,max}$ and $K_{cb,max}$. Otherwise, $K_{c,synthetic}$ will depend on $K_{cb,VI}$ on the date of concern but also on $K_{c,bare\ soil}$. $K_{c,synthetic}$ will increase with respect to $K_{cb,VI}$ as $K_{c,bare\ soil}$ is lower. The reader may find more details about the rationale behind Eq. 3.10 in Mateos et al. (2013). Note that crop evapotranspiration estimated using $K_{c,synthetic}$ ($ET_{c,synthetic}$) is field-specific but does not take into account eventual reduction of transpiration due to stomatal closure provoked by water deficit.

3.4.1.2. Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) application

The Earth Engine Evapotranspiration Flux (EEFlux) application (Allen et al., 2015) uses Landsat imagery archives on the Google Earth Engine platform to calculate the daily evapotranspiration on the 30×30 m scale. Automatically calibrated for each Landsat image, EEFlux produces and provides maps of actual ET_c estimations, surface temperature, normalized difference vegetation index (NDVI), reference evapotranspiration, and albedo for any Landsat 5, 7 or 8 scene. Reference evapotranspiration is computed from gridded hourly and daily weather data stored on Earth Engine using the ASCE Standardized Penman-Monteith method (ASCE–EWRI, 2005) (ET_r) and the FAO-56 method (ET_o) (Allen et al., 1998). EEFlux can be freely accessed in <https://eeflux-level1.appspot.com/>.

The estimation of actual ET_c in EEFlux is based on the METRIC model (Allen et al., 2007a; Irmak et al., 2012). METRIC is a satellite-based image-processing model for calculating actual evapotranspiration based upon the energy balance at the land surface. The latent heat flux (λET) is calculated from the surface energy balance for the moment captured in satellite image acquisition as:

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (3.11)$$

where G is the soil heat flux, H is the sensible heat flux, and R_n is the net radiation, all units in Wm^{-2} . Net radiation is computed from solar radiation estimation by taking into consideration the atmospheric transmissivity, surface reflectance, and longwave emission balance using satellite shortwave and thermal observation data. Soil heat flux is estimated as

a ratio of net radiation using surface conditions such as vegetation and temperature observed by satellite. Sensible heat flux (H , W m^{-2}) is expressed as

$$H = \rho_a c_p \frac{\Delta T}{r_a} \quad (3.12)$$

where ρ_a (kg m^{-3}) is the air density, c_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) is the specific heat of air at constant pressure, ΔT (K) is the near-surface vertical temperature difference, and r_a (s m^{-1}) is the aerodynamic resistance corresponding to ΔT . METRIC assumes that ΔT can be approximated by a linear relationship of the radiometric surface temperature (T_R , K) (Bastiaanssen et al., 1998):

$$\Delta T = a + b T_R \quad (3.13)$$

where a and b are empirical parameters determined by means of a calibration based on the selection of “hot” and “cold” pixels within the satellite scene (Bastiaanssen et al., 1998). The ΔT values for these two pixels are estimated by rearranging Eq. 3.12 for the selected “hot” and “cold” pixels and by using Eq. 3.11 to derive the respective values of H . Following the procedure proposed by Allen et al. (2007a), the “hot” pixel should be bare, dry soil, so $\lambda ET = 0$ and $H = R_n - G$; and the cold pixel should be a well-watered crop at full cover where λET is assumed to be 5 % above that of the alfalfa reference evapotranspiration (ET_r), computed using the standardized ASCE Penman-Monteith equation (ASCE-EWRI, 2005). The resulting evapotranspiration at the moment of the satellite image is used to calculate a fraction of reference evapotranspiration that enables the conversion of the instantaneous value into daily values of actual ET. The latent heat flux is then computed for each pixel at the instant of satellite overpass and is readily converted to instantaneous ET (ET_{inst}):

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad (3.14)$$

A fraction $ET_r F$ is computed for the time of the satellite overpass:

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (3.15)$$

Finally, EEFlux calculates daily ET_c ($ET_{c,EEFlux}$) for each pixel by multiplying ET_{rF} by the daily ET_r computed from gridded weather data, assuming consistency between ET_{rF} at overpass time and ET_{rF} for the 24-hour period:

$$ET_{c,EEFlux} = ET_{rF} ET_r \quad (3.16)$$

The corresponding K_c ($K_{c,EEFlux}$) is calculated as the ratio between $ET_{c,EEFlux}$ and ET_o provided by the EEFlux platform. Note that $ET_{c,EEFlux}$ is field-specific and does take into account eventual reduction of transpiration due to stomatal closure provoked by water deficit.

3.4.2. Study area

The evaluation of methods for estimating ET_c for the performance assessment of irrigation scheme was carried out in the Río Dulce irrigation scheme (SRRD, acronym in Spanish), located in the province of Santiago del Estero, Argentina, at latitude $27^{\circ}47'$ S and longitude $64^{\circ}16'$ W. The area irrigated in SRRD is around 80,000 ha extending over the river alluvial plain. The climate is semiarid, mesothermal, with a mean annual rainfall of 600 mm, concentrated in summer (Morello and Adámoli, 1974). Maximum monthly rainfall occurs in January (111 mm) and minimum in July (2 mm). Mean annual ET_o is 1300 mm, with peak values in December (5.6 mm d^{-1}) and minimum in June (1.6 mm d^{-1}). Mean annual maximum temperature is $27.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($33.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in January and $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in June), and mean annual minimum temperature is $12.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($3.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in July and $19.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in January). All climatic data are from the Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) weather station (Fig. 3.1). Soils, of alluvial origin, are deep, of a silty loam texture and a low content in organic matter and nitrogen (Angueira and Zamora, 2007; Galizzi et al., 2015). The Río Dulce water is of good quality. Predominant crops are cotton and alfalfa, followed by maize, soybean, wheat, oat and vegetables (onion, melon and watermelon). Water is distributed through an open channel network according to a fixed-rotation delivery schedule with turns every 25 to 30 days, a turnout flow rate of 300 l s^{-1} , and duration of delivery of 50 min ha^{-1} , giving a gross irrigation depth of 90 mm per irrigation. Surface irrigation is the predominant on-farm irrigation method with application efficiency and distribution uniformity of around 70 % (Angella et al., 2011).

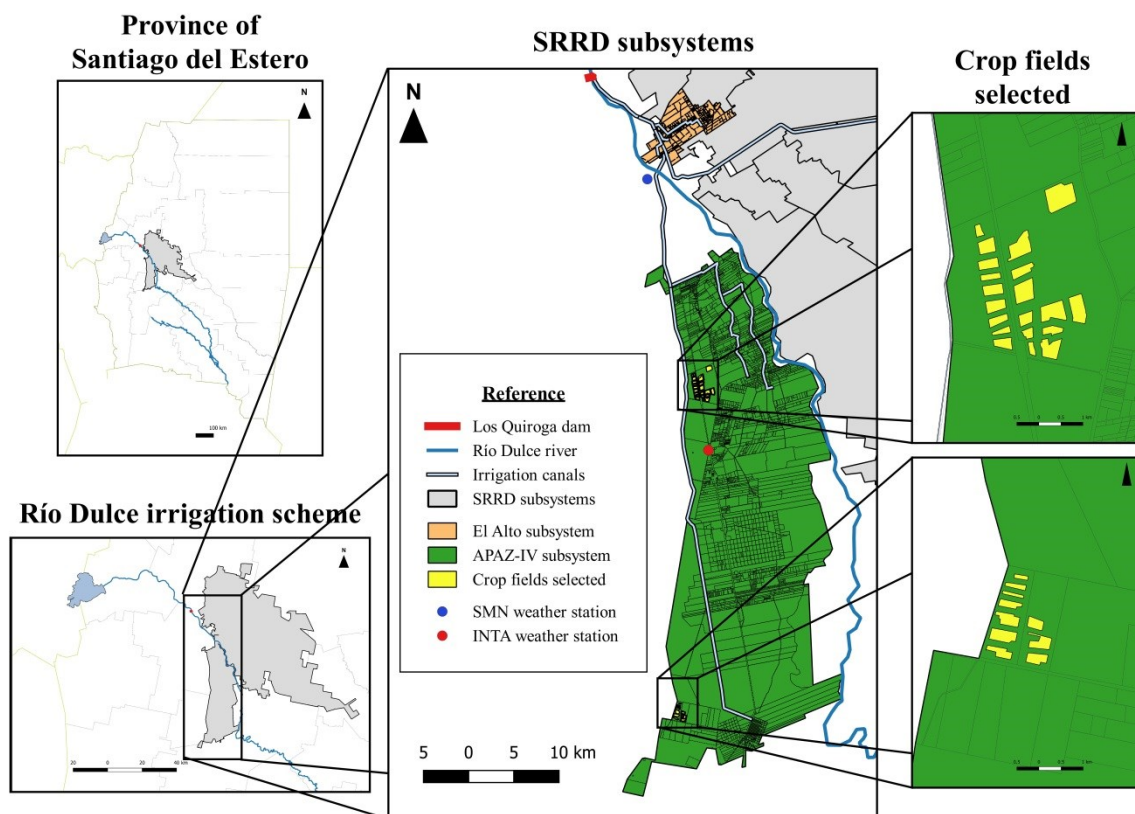


Figure 3.1. Location of the study case Río Dulce irrigation scheme (Santiago del Estero, Argentina), the selected irrigation subsystems (El Alto and APAZ-IV), the selected crops fields, the two weather stations used in the study.

SRRD is divided into five administrative areas. This study covered two of these subsystems, APAZ-IV (canal San Martín) and El Alto. APAZ-IV includes 15,000 ha with irrigation rights (out of a total area of 70,000 ha equipped for irrigation) while El Alto covers 4,000 ha of which only 2,100 ha have irrigation rights (Fig. 3.1). The analysis was carried out in the 2014-15 irrigation season. In that season, the main crops in APAZ-IV were alfalfa (58 % of the area with water rights), cotton (27 %) and maize (4 %), while in El Alto the main crops were cotton (67 %) and alfalfa (12 %). Other crops (soybean, onion, melon, watermelon, and oat) were present in both subsystems but occupying relatively small areas

3.4.3. Crop, weather, soils, and satellite image data

An updated geographical information system was provided by the Irrigation Service of SRRD, an entity that depends on the provincial government of Santiago del Estero. The geographical information contained conventional maps like roads, rivers, canals, land use,

and detailed data about the irrigable plots: total area and area with permanent water right. Crop information for each field was provided by the respective managers of the APAZ-IV and El Alto subsystems for the 2014-15 irrigation season.

Meteorological data to compute daily ET_o with the Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998) and daily rainfall were obtained from the weather station of the National Weather Service (SMN) for El Alto and from the INTA weather station for APAZ-IV (Fig. 3.1).

Soil information was taken from the soil maps of the APAZ-IV area produced by Angueira and Zamora (2007). The soils in the study area, of alluvial origin, are relatively homogeneous. Two similar soil classes (named El Simbol and La María according to the INTA classification; Etchevehere, 1976) occupy most of the area (75 % of the total area and about 90 % of the cultivated area). The main characteristics of the respective typical soil profiles are in Table 3.1. The soils, deeper than 1.5 m, do not present restriction to crop root growth. Texture is silty loam. Soil water holding capacity in the typical soil profiles of the El Simbol and La María soil classes is 179 mm m^{-1} and 176 mm m^{-1} , respectively. Soil water contents at field capacity (θ_{FC}) and wilting point (θ_{WP}) were derived from the soil water retention curves provided in Angueira and Zamora (2007) for the typical soil profiles, using the method by Rawles and Brakensiek (1982). The result was essentially the same for both soil profiles. Thus, given the relatively low resolution of the soil maps and the relative homogeneity of the soils, the values of $\theta_{FC} = 0.270$ and $\theta_{WP} = 0.092 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ were used for the whole APAZ-IV subsystem. Regarding El Alto subsystem, although it falls just outside the area covered by the available soil maps, based on the experience of INTA researchers we assumed that most cultivated soils in this subsystem belonged to either El Simbol or La María class. Therefore, in the soil water balances applied to fields in the El Alto subsystem we used the same θ_{FC} and θ_{WP} values obtained for the APAZ-IV subsystem.

Table 3.1. Properties of the typical soil profile of soil classes El Simbol and La María in the study area (Angueira and Zamora, 2007).

Soil class	Layer	Thicknes (mm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Texture	Water content at saturation (%)	Water holding capacity (mm m ⁻¹)	Electrical conductivity (dS m ⁻¹)	pH	Organic matter (%)
El Simbol	A	220	25	58	17	Silty loam	48	200	0.58	7.0	3.22
	B2t	310	22	60	18	Silty loam	43	180	0.46	7.2	1.55
	B3	370	19	64	17	Silty loam	44	180	0.62	7.7	1.00
	C1	>900	50	45	5	Silty loam	35	130	0.58	7.9	0.21
La María	A	200	24	64	12	Silty loam	39	200	0.5	6.3	2.39
	AC	320	28	62	10	Silty loam	36	180	0.2	7.2	1.14
	C1ca	350	31	58	11	Silty loam	32	160	0.9	7.8	0.53
	C2ca	>870	34	60	6	Silty loam	39	170	3.5	7.9	1.16

A set of 16 NDVI images from Landsat 7 (Path/Row 229/80, 230/79 and 230/80) and 14 NDVI images from Landsat 8 (Path/Row 229/80 and 230/79) was downloaded from EEFlux (Table 3.2). The images selected were all cloud free. Path/Rows 230/79 and 230/80 covered the entire SRRD (14 images in total) while Path/Row 229/80 (16 images) covered only part of SRRD. The images were re-projected to the Coordinate Reference System POSGAR 98/Argentina 4 - "European Petroleum Survey Group" (EPSG) 22174. Geographical analysis was performed with the QGIS 3.10 (QGIS Development Team, 2019) application, a free and open-source software that supports viewing, editing, and analysis of geospatial data. The images from the same date were merged and clipped to the area of interest with QGIS. Then, the "zonal statistics" tool of QGIS was used to extract the mean NDVI value for each image and crop field date.

Table 3.2. Series of images of satellites Landsat 7 and Landsat 8 used from EEFlux platform.

Path/Row	Satellite	Date	Path/Row	Satellite	Date
230/79-230/80	Landsat 7	07/07/14	229/80	Landsat 8	16/01/15
229/80	Landsat 8	08/07/14	230/79	Landsat 8	23/01/15*
229/80	Landsat 8	24/07/14	230/79-230/80	Landsat 7	16/02/15*
230/79-230/80	Landsat 7	08/08/14	230/79	Landsat 8	12/03/15*
229/80	Landsat 8	09/08/14	230/79-230/80	Landsat 7	20/03/15*
230/79	Landsat 8	16/08/14	229/80	Landsat 7	29/03/15
229/80	Landsat 7	17/08/14	230/79-230/80	Landsat 7	05/04/15*
229/80	Landsat 8	25/08/14	229/80	Landsat 7	30/04/15
230/79	Landsat 8	01/09/14*	229/80	Landsat 8	08/05/15
230/79-230/80	Landsat 7	09/09/14*	229/80	Landsat 7	01/06/15
229/80	Landsat 7	18/09/14	230/79	Landsat 8	16/06/15*
230/79-230/80	Landsat 7	25/09/14*			
229/80	Landsat 8	12/10/14			
229/80	Landsat 7	20/10/14			
230/79-230/80	Landsat 7	27/10/14*			
229/80	Landsat 7	05/11/14			
230/79	Landsat 8	06/12/14*			
229/80	Landsat 7	23/12/14			
229/80	Landsat 8	31/12/14			

Path/row 230/79 includes the entire subsystems under analysis.

*Dates used to obtain $ET_{c,EEFlux}$ and ET_o for the analysis of the 30 selected fields.

3.4.4. Analyses applied to cultivated fields in SRRD

The first analysis concerned all cultivated fields in El Alto and APAZ-IV (161 and 1582, respectively). $ET_{c,standard}$ (ET_c obtained from the FAO56 standard procedure, using

$K_{c,standard}$, i.e., without using remote sensing data), $ET_{c,synthetic}$ (ET_c obtained using VI-derived $K_{c,synthetic}$), and $ET_{c,VIopt}$ (ET_c obtained using $K_{cb,VI}$ and computing K_s and K_e running the water balance simulating optimal irrigation schedule, that is, triggering irrigation when the soil water content reaches the allowable depletion) were calculated for these fields. Soil water contents at field capacity and wilting point were $\theta_{FC} = 0.270$ and $\theta_{WP} = 0.092 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. The crop parameters taken to apply the FAO56 method are in Table 3.3, as well as the number of fields and area for each crop. The growing calendars were set based on the information from farmers and subsystem managers. K_c values were taken from FAO56 and adjusted for the frequency of wetting and climatic conditions following the recommendations of FAO56 (Allen et al., 1998) and based on the local knowledge of the first author. Values of $f_{c,max}$ or $f_{c,Kcbmax}$ were not readily available in the literature, thus we set the conservative values of 0.8 for all crops, within the range compiled in the reviews by Pereira et al. (2020ab). $NDVI_{min}$ was specifically obtained from the Landsat images selecting fields with bare soil, and $NDVI_{max}$ was set to 0.9 for all crops based on González-Dugo and Mateos (2008) and Carpintero et al. (2020).

The second analysis used 30 fields (23 of cotton and 7 of maize) for which the actual irrigation schedule and growing itinerary (from planting to harvesting) were available. In these fields, $ET_{c,VIact}$ (ET_c obtained using $K_{cb,VI}$ and computing K_s and K_e running the water balance using actual irrigation depths) was compared with $ET_{c,synthetic}$, and $ET_{c,EEFlux}$. The selected fields were located in the APAZ-IV subsystem (Fig. 3.1), with their size ranging between 8 and 60 ha. Their soils belonged to the La María soil class, thus the characteristic water contents used in the water balance were $\theta_{FC} = 0.270$ and $\theta_{WP} = 0.092 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Cotton planting dates were between November 1 and December 10, 2014, while all selected maize fields were planted on January 1, 2015. The number of irrigations varied between 1 and 4 in the cotton fields and was 2 in the maize fields. For these fields, in addition to the images of NDVI, two other EEFlux products were downloaded: ET_o and $ET_{c,EEFlux}$ (six Landsat 7 - Path/Row 230/79 and 230/80- and five Landsat 8 - Path/Row 230/79) (Table 3.2). A buffer along the crop field borders was eliminated to prevent external pixel contamination.

Table 3.3. Area and number of fields for each crop in the study area, crop parameters used for computing evapotranspiration using the FAO56 standard procedure and from VI-derived crop coefficients. $K_{cb,standard}$: standard basal crop coefficient; $K_{c,standard}$: standard crop coefficient; $Z_{r,max}$: maximum effective root depth; $f_{c,Kcbmax}$: fraction of soil surface covered by vegetation for maximum K_{cb} value; $NDVI_{max}$ and $NDVI_{min}$: the Normalized Difference Vegetation Index maximum and minimum, respectively; p : soil water depletion fraction for no stress.

Parameter	Alfalfa	Cotton	Maize ₁	Maize ₂	Soybean	Onion	Melon	Water-melon	Oat
Total area (ha)	4353	2418	271	215	517	175	48	3	5
Number of fields	1386	245	18	20	8	40	20	4	2
Start of analysis (dd/mm)	01/07	25/09	25/11	01/07	25/11	15/02	01/07	01/07	15/04
Sowing date (dd/mm)*	01/07	15/10	01/12	01/10	01/12	15/02	15/08	01/10	15/04
Harvest date (dd/mm)*	30/06	31/03	30/04	20/01	30/04	15/10	15/12	15/11	21/10
Growth Stages (days)*									
Initial	70 ³	30	20	20	20	45	20	20	30
Develop.	128 ³	40	45	30	40	50	30	30	45
Mid-season	123 ³	65	50	40	65	50	25	30	75
Late season	44 ³	32	35	21	25	85	17	10	40
$K_{cb,standard}$ ¹									
Initial	0.79 ⁴	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Mid-season	0.83 ⁴	1.15	1.15	1.15	1.10	0.90	1.00	0.95	1.10
Late season	0.80 ⁴	0.50	0.15	0.15	0.30	0.90	0.70	0.70	0.15
$K_{c,standard}$ ¹									
Initial	0.87 ⁴	0.40	0.52 ^a /0.60 ^b	0.30 ^a /0.35 ^b	0.52 ^a /0.60 ^b	0.83	0.10 ^a /0.15 ^b	0.30 ^a /0.35 ^b	0.45 ^a /0.30 ^b
Mid-season	0.91 ⁴	1.20	1.20	1.20	1.15	1.00	1.05	1.00	1.15
Late season	0.86 ⁴	0.70	0.35	0.35	0.50	1.00	0.75	0.75	0.25
$Z_{r,max}$ (m) ¹	2.00 ⁵	1.50 ⁵	1.30	1.30	1.30	0.50	1.00	1.00	1.00
$f_{c,Kcbmax}$ ²	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
$NDVI_{max}$ ²	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
$NDVI_{min}$	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
p ¹	0.55	0.65	0.50	0.50	0.50	0.30	0.45	0.40	0.55

Maize₁: maize growing in summer; Maize₂: maize growing in spring. * Dates representing typical growing practices in SRRD (These dates were used only to depict the standard crop coefficients). ^a For El Alto subsystem. ^b For APAZ-IV subsystem. ¹FAO56 manual. ²Gonzalez-Dugo et al. (2009). ³Values for the periods of winter, spring-summer, summer-autumn and autumn-winter, respectively, in SRRD. ⁴Average values for the local cutting periods in each growth phases along the season. ⁵Values based on experiences of local extension agents and INTA agronomists.

3.4.5. Simulation analysis of interpolation errors

The third analysis was a simulation analysis to evaluate the errors in the estimation of ET_c due to the interpolation to daily values of: 1) K_{cb} (used to obtain $K_{c,synthetic}$); and 2) K_c , both determined at hypothetical satellite overpass intervals of longer than one day. Although the context of the interpolation analysis was the application of satellite imagery to estimate ET_c by the VI- and energy balance-based methods, the analysis did not need to apply those methods or use satellite imagery; it only needed assumptions about the frequency of satellite overpasses and supposedly known (“truth”) values of K_{cb} and K_c at the satellite overpass dates.

The first step for the interpolation analysis was depicting the curve representing the daily K_{cb} of an ideal cotton crop grown in the environment of Santiago del Estero, from November 1 to April 15, under non-limiting conditions. This particular K_{cb} curve was taken as being the “truth” (“truth” as opposed to “interpolated”) for the interpolation analysis and named $K_{cb,truth}$. Second, the values of $K_{cb,truth}$ corresponding to dates at intervals of 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 days were selected. This selection resulted in 9 series of values of “truth” coefficients, supposedly corresponding to their respective satellite overpass frequencies. The number of assumed satellite overpasses during the period of analysis (October 1 to May 1) varied from 212 to 5 (corresponding to assumed satellite revisit time of 1 day and 40 days, respectively). Third, the values of $K_{cb,truth}$ in each series were linearly interpolated to obtain daily estimations of K_{cb} (named $K_{cb,interpolated}$). Fourth, $K_{c,synthetic}$ was calculated from Eq. 3.10 replacing $K_{cb,VI}$ by $K_{cb,interpolated}$. The value of $K_{c,bare\ soil}$, also necessary to apply Eq. 3.10, was K_e (Eq. 3.9) applied to bare soil considering rainfall events and averaged on the time interval centred on each of the assumed satellite overpasses. In order to account for the effect of weather variability, the simulation period was 30 years (July 1, 1988 to June 30, 2018), using weather data from the INTA weather station (Fig. 3.1). Other parameters needed in Eqs. 3.9 and 3.10 were taken from Table 3.3. Finally, $K_{c,synthetic}$ was multiplied by daily ET_o to obtain daily $ET_{c,synthetic}$.

For the analysis of errors in the interpolation of K_c , the assumed “truth” daily K_c curve of the ideal cotton crop was generated applying the dual crop coefficient approach (Eq. 3.2) using $K_{cb,truth}$. Since the dual approach requires knowing the soil wetting dates, rainfall was obtained from the INTA weather station and the irrigation dates for the ideal cotton crop were simulated using the soil water balance. The simulation period and weather data were the same

as for the analysis of interpolation of K_{cb} used to obtain $K_{c,synthetic}$ (i.e., July 1, 1988 to June 30, 2018, INTA weather station). Therefore, while the analysis used a unique $K_{cb,truth}$ curve, the $K_{c,truth}$ curve varied from year to year. Moreover, two surface irrigation strategies were simulated, consisting of refilling the soil to field capacity when the crop depleted the readily available water (estimated as 65 % of the root zone soil water holding capacity) or 80 % of the root zone soil water holding capacity, for the full and deficit irrigation strategies, respectively. Then, the values of $K_{c,truth}$ corresponding to dates at intervals of 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40 days were selected and the "truth" coefficients of each series were linearly interpolated to obtain daily estimations of crop coefficient (named $K_{c,interpolated}$). Finally, $K_{c,interpolated}$ was multiplied by daily ET_o to obtain daily $ET_{c,interpolated}$.

The interpolation errors were evaluated by means of the root mean square error (RMSE) of daily ET_c and the relative error (RE) of seasonal ET_c . The former was obtained from the square of the difference between the daily values of ET_c obtained using $K_{c,truth}$ and obtained with the corresponding daily values of $K_{c,synthetic}$ or $K_{c,interpolated}$. RE was computed as the relative difference between seasonal ET_c computed using $K_{c,truth}$ and computed with $K_{c,synthetic}$ or $K_{c,interpolated}$.

The connection of the interpolation analysis with the comparison of methods of estimating ET_c carried out in the study case is as follows. The VI-based approach used satellite data to obtain K_{cb} on the days of satellite overpass. If it was assumed that K_{cb} can be derived from VIs accurately, then the $K_{cb,truth}$ curve could be reproduced with complete accuracy using daily VIs. If the temporal frequency of K_{cb} determination ($K_{cb,VI}$) was less than daily, then daily $K_{cb,VI}$ values would have to be obtained by interpolation, thus making interpolation errors. On the other hand, the energy balance approach determined K_c as the quotient between ET_c and ET_o determined on the days of satellite overpass ($K_{c,EEFlux}$ in our study). If it was assumed that this K_c can be obtained with complete accuracy, then the interpolated $K_{c,EEFlux}$ curve would reproduce $K_{c,truth}$ if satellite overpass was daily; otherwise, daily $K_{c,EEFlux}$ values would have to be obtained by interpolation, thus making interpolation errors that would depend on the satellite overpass frequency.

The hypothesis behind the interpolation analysis is as follows. Since the evolution of VIs along the crop growing cycle follows a rather determined trend, K_{cb} can be interpolated confidently between dates of image acquisition. However, the VI-based approach needs a complementary procedure to account for soil wetting events (to obtain $K_{c,synthetic}$ in the

approach adopted in this study) and is unable to detect crop water stress. In contrast, the energy balance approach gives the crop coefficient directly, considering effects of water deficit as well, but the interpolation to daily crop coefficients may be unreliable because both numerator and denominator in the quotient ET_c/ET_0 used to determine K_c are highly affected by day-to-day weather variability. Therefore, the objective of the interpolation analysis was to assess the errors of each method as a function of the temporal frequency of the satellite images.

This analysis was intended to specifically address the errors due to interpolation; therefore, it did not take into account the inaccuracy of the methods used to determining $K_{cb,VI}$, $K_{c,synthetic}$ and $K_{c,EEFlux}$.

3.5. Results

3.5.1. Comparison of methods of estimating ET_c

Fig. 3.2a shows the FAO56 standard K_{cb} ($K_{cb,standard}$) curve for cotton, consisting of 4 straight lines. The curve was constructed before determining VI, taking the three K_{cb} characteristic values and the duration of the growth stages from Table 3.3. During the crop development and mid-season stages, $K_{cb,VI}$ was less than $K_{cb,standard}$ in both the APAZ-IV and El Alto subsystems. This can be seen in the mean and standard deviation of the $K_{cb,VI}$ corresponding to the cotton fields in both El Alto and APAZ-IV at the dates of satellite overpass (Fig. 3.2a). Similar observations are in Fig. 3.2c for the alfalfa fields. $K_{cb,standard}$ refers to a pristine crop, thus the deviation of $K_{cb,VI}$ from $K_{cb,standard}$ reflects the cropping performance gap and points to the convenience of the field-specific approach for scheme water consumption assessment. Actually, average cotton yield in SRRD is about 3 Tn ha^{-1} , while attainable yield (yield of the best performing crops) is 5 Tn ha^{-1} (Angella et al., 2016). During the late season stage, the mean $K_{cb,VI}$ of cotton was slightly greater than the $K_{cb,standard}$. The declining slope of the late season $K_{cb,standard}$ implies the recommended practice of forcing defoliation to accelerate boll opening. The milder slope of $K_{cb,VI}$ reflects the indeterminate nature of cotton that often regrows during and after the harvesting period, while weeds may proliferate below the cotton canopy (distorting the $K_{cb,VI}$ estimate).

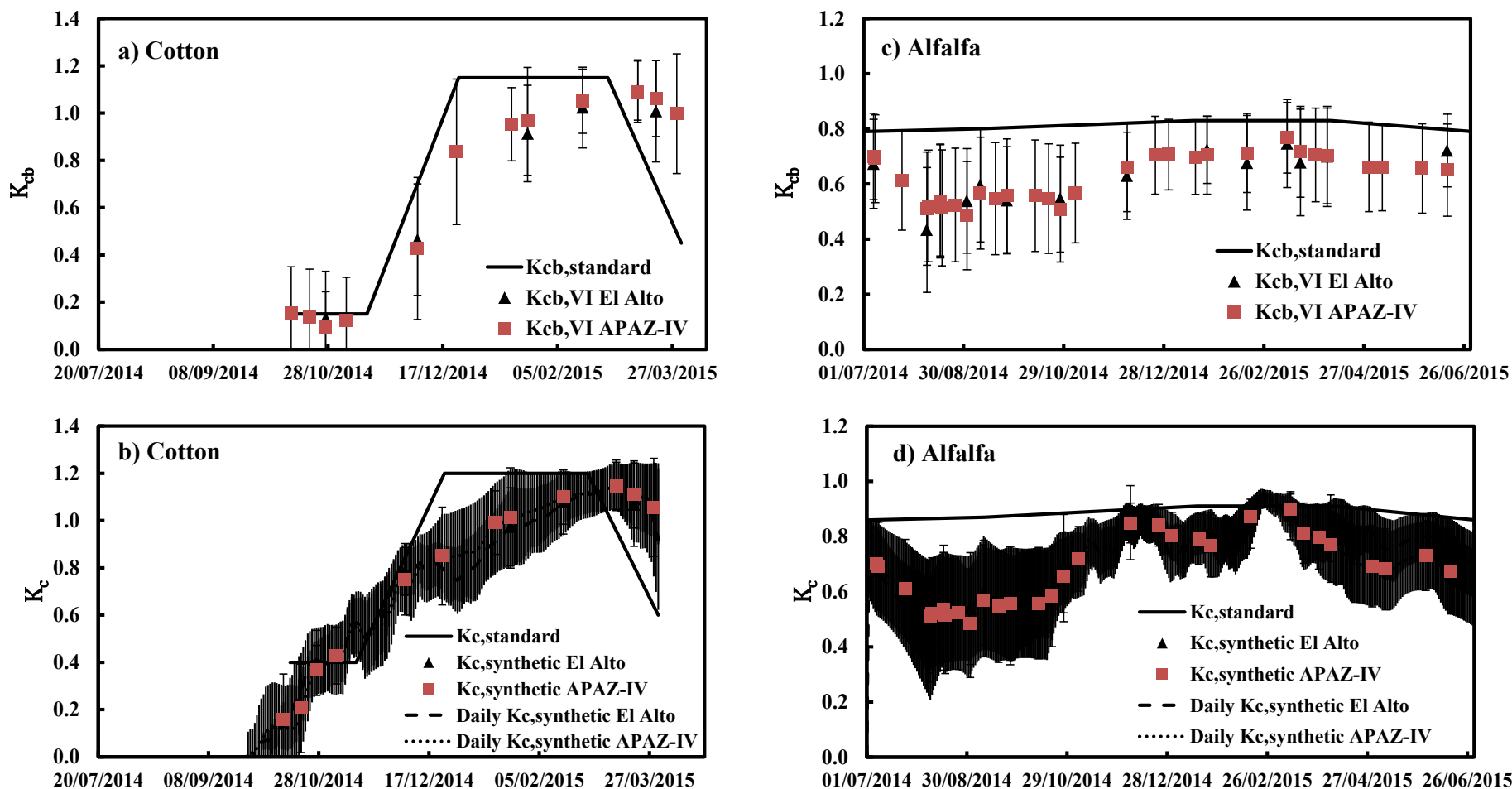


Figure 3.2. Segmented curve for the standard basal crop coefficient ($K_{cb,standard}$), mean VI-derived basal crop coefficient obtained from VI ($K_{cb,VI}$) for the dates of overpass satellites for cotton (a) and alfalfa (c). Segmented curve for the standard crop coefficient ($K_{c,standard}$), synthetic crop coefficient on the dates of satellite overpass and daily synthetic crop coefficient for cotton (b) and alfalfa (d). Averages are of 84 and 161 cotton crops fields and 42 and 1344 alfalfa crops fields in the El Alto and APAZ-IV subsystems, respectively, in season 2014-15. Vertical bars indicate standard deviations.

This discussion on K_{cb} can be transferred in the same terms to K_c with the addition that in K_c soil wetting also intervenes. During the cotton development mid-season stages, $K_{c,synthetic}$ was less than $K_{c,standard}$ in both the APAZ-IV and El Alto subsystems (Fig. 3.2b). During the initial and early cotton development stages, $K_{c,synthetic}$ on the satellite overpass dates (triangles and squares in Fig. 3.2b) deviated from $K_{c,standard}$, showing that the former takes into account the occurrence of rainfall and dry periods. In the case of alfalfa (Fig. 3.2d), the locally assumed $K_{c,standard}$, that is based on the cutting frequency in the different seasons, was greater than $K_{c,synthetic}$, especially in winter and autumn. Note that the field-to-field variability of $K_{c,synthetic}$ could be evaluated not only on the dates of the satellite overpass (indicated in Fig. 3.2bd by standard deviation bars on the days of the satellite overpass), but also on the interpolated dates (as shown in Fig. 3.2bd with the area shaded by daily standard deviation bars). For the sake of brevity, we restricted the description of standard vs. VI-based K_{cb} and K_c to cotton and alfalfa, the two main crops in SRRD; however, similar analyses would apply to other crops.

Fig. 3.2b reinforces the recommendation of using the VI-based field-specific approach in SRRD (as Segovia-Cardozo et al., 2019, also remarked for their study area), and the adequacy of the synthetic crop coefficient approach to approximate the effect on K_c of rainfall events when field irrigation data are not available. Alternatively, one could use the dual crop coefficient with $K_{cb,VI}$ and compute the soil evaporation coefficient (Allen et al., 1998) for an arbitrary irrigation schedule.

The results of applying one or other method on a system scale are in Table 3.4. Seasonal ET_c in APAZ-IV was greater than in El Alto, mainly due to the cropping pattern (alfalfa occupies 58 % of the area in APAZ-IV and 12 % in El Alto). Subsystem ET_c was much greater (about 20 %) when using $K_{c,standard}$. The difference in system ET_c estimated with $K_{c,synthetic}$ and applying the dual crop coefficient with an optimal irrigation schedule ($ET_{c,VIopt}$) was only 2 % (Table 3.4).

Table 3.4. $ET_{c,standard}$, $ET_{c,VIopt}$ and $ET_{c,synthetic}$ of each subsystem in season 2014-15.

Subsystem	$ET_{c,standard}$ (mm)	$ET_{c,VIopt}$ (mm)	$ET_{c,synthetic}$ (mm)
El Alto	843	720	702
APAZ-IV	999	825	810

The same comparison is in Fig. 3.3 for the 30 selected fields with known irrigation schedules. In the sample of cotton fields, $ET_{c,synthetic}$ correlated very well with ET_c estimated from VI and the actual irrigation schedule ($ET_{c,VIact}$) (Fig. 3.3); however, in the maize fields $ET_{c,synthetic}$ was greater than $ET_{c,VIact}$. Note that the water balance computed to estimate $ET_{c,VIact}$ takes into account ET_c reduction due to water deficit, while the computation of $ET_{c,synthetic}$ ignores it. Fig. 3.3 suggests that water deficit was more pronounced in the maize fields than in the cotton fields. For economic reasons, in SRRD it is common practice to apply one irrigation only (the pre-irrigation) to the maize crops, and rely on rainfall for the rest of the growing season, while cotton crops typically receive one or two irrigations in addition to the pre-irrigation. Therefore, considering the crop water deficit could be important when estimating ET over systems such as SRRD; however, the VI-based approach is incapable of detecting the reduction in ET due to stomatal closure unless it is coupled to a water balance fed with field-specific irrigation data.

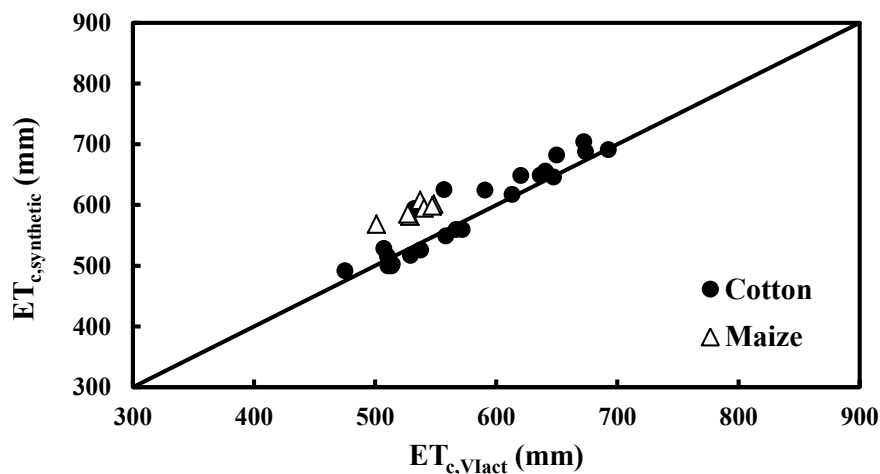


Figure 3.3. Relationship between evapotranspiration estimated with the synthetic crop coefficient ($ET_{c,synthetic}$) and obtained using $K_{cb,VI}$ and computing K_s and K_e running a water balance for a given irrigation schedule and ($ET_{c,VIact}$) for the 30 selected crops fields in APAZ-IV in the season 2014-15. Triangles represent maize fields (7) and circles represent cotton fields (23).

In theory, the energy balance approach to estimating ET_c may overcome this limitation. This was examined for the selected fields with known irrigation schedules. Fig. 3.4a represents K_c on the days of satellite overpass provided by EEFlux ($K_{c,EEFlux}$) against $K_{c,VIact}$. Overall, $K_{c,EEFlux}$ was greater than $K_{c,VIact}$, particularly at low K_c . Part of this deviation could be due to small differences between the typical values of θ_{FC} and θ_{WP} used in the water balance and the actual values of each selected field; however, this could not be assessed. Part

of the scatter (root mean square error, RMSE = 0.23) could be due to differences in the reference evapotranspiration used by EEFlux and that obtained from the weather stations. Recall that EEFlux uses gridded weather data stored in Earth Engine and the ASCE standardized Penman-Monteith equation (ASCE–EWRI, 2005) while the ET_0 from the weather stations is computed using measured data and FAO-56 Penman-Monteith equation (Allen et al., 1998). Nevertheless, the correlation between reference evapotranspiration derived from the two sources was unbiased and relatively good, with RMSE = 0.9 mm (Fig. 3.5).

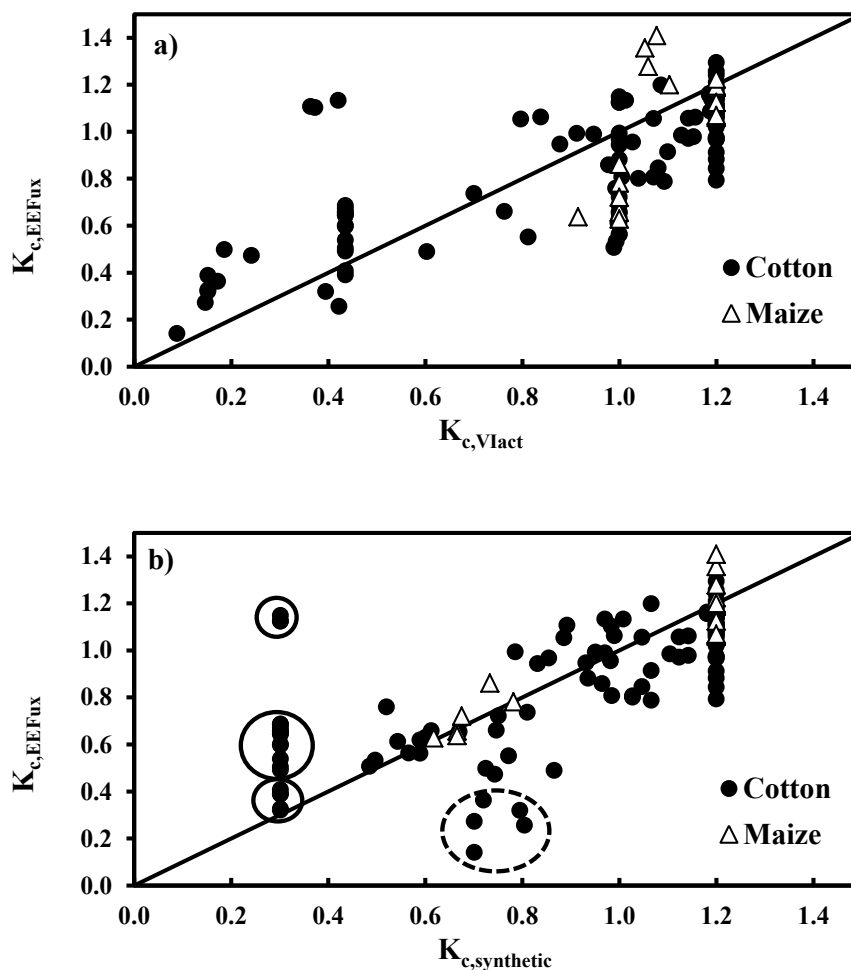


Figure 3.4. Relationship between crop coefficients obtained from EEFlux ($K_{c,EEFlux}$) and the corresponding a) crop coefficient ($K_{c,VIact}$) obtained from $K_{cb,VI}$ and computing K_s and K_e running a water balance for a given irrigation schedule or b) synthetic crop coefficients ($K_{c,synthetic}$). Triangles represent maize fields and circles cotton fields on dates of overpass satellite in season 2014-15.

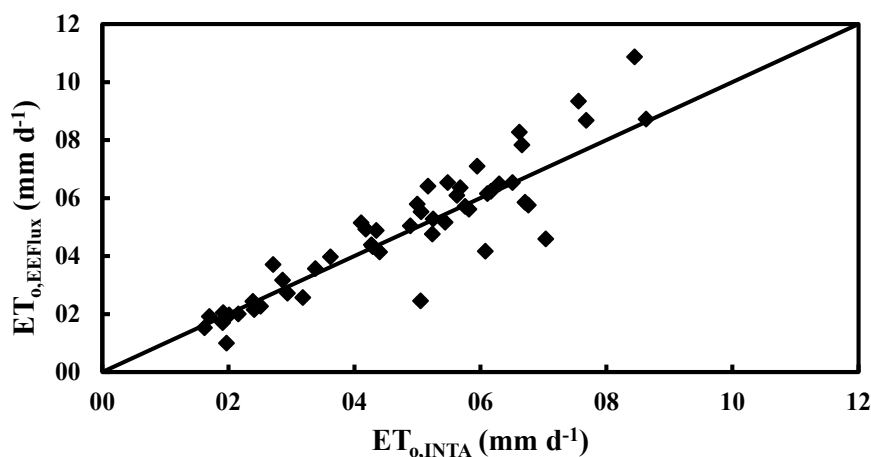


Figure 3.5. Relationship between reference evapotranspiration provided by EEFlux ($ET_{o,EEFlux}$) and recorded at the INTA weather station ($ET_{o,INTA}$) on dates of satellite overpass in the years 2014-18.

However, the field irrigation schedules across the SRRD system are unknown. Therefore, field daily ET_c is estimated more adequately using $K_{c,synthetic}$, which is represented vs. $K_{c,EEFlux}$ in Fig. 3.4b for the selected fields. This figure highlights deviations as a consequence of applying the $K_{c,synthetic}$ method. The symbols circled with a continuous line correspond to satellite overpass dates soon after pre-irrigation and before crop emergence. $K_{c,EEFlux}$ detected the wet soil that resulted in high evapotranspiration (the upper and lower circle mark data points corresponding to 1 and 4 days after pre-irrigation, respectively, while the middle circle indicates data points corresponding to 3 days after pre-irrigation). Conversely, the smoothing feature of $K_{c,synthetic}$ resulted in $K_{c,synthetic}$ less than that actually expected for that soil surface wetness. The opposite circumstance occurred for the five data points circled with a discontinuous line: on that satellite overpass date, the plants were small or had not emerged, the previous soil-wetting event had occurred 6 days before (thus the soil surface was already dry) and a posterior rainfall event occurred 2 days later. In this case, the smoothing feature of $K_{c,synthetic}$ resulted in higher values than those actually expected for the soil surface wetness on the day of the satellite overpass.

The difficulties of applying the energy balance (for instance, using METRIC) have been overcome by platforms like EEFlux; however, the number of satellites providing thermal data remains a limitation. In our analysis of SRRD over a 12 month period, the number of useful Landsat images varied across the scheme from 9 to 29, with frequency varying from biweekly to monthly.

3.5.2. Interpolation results

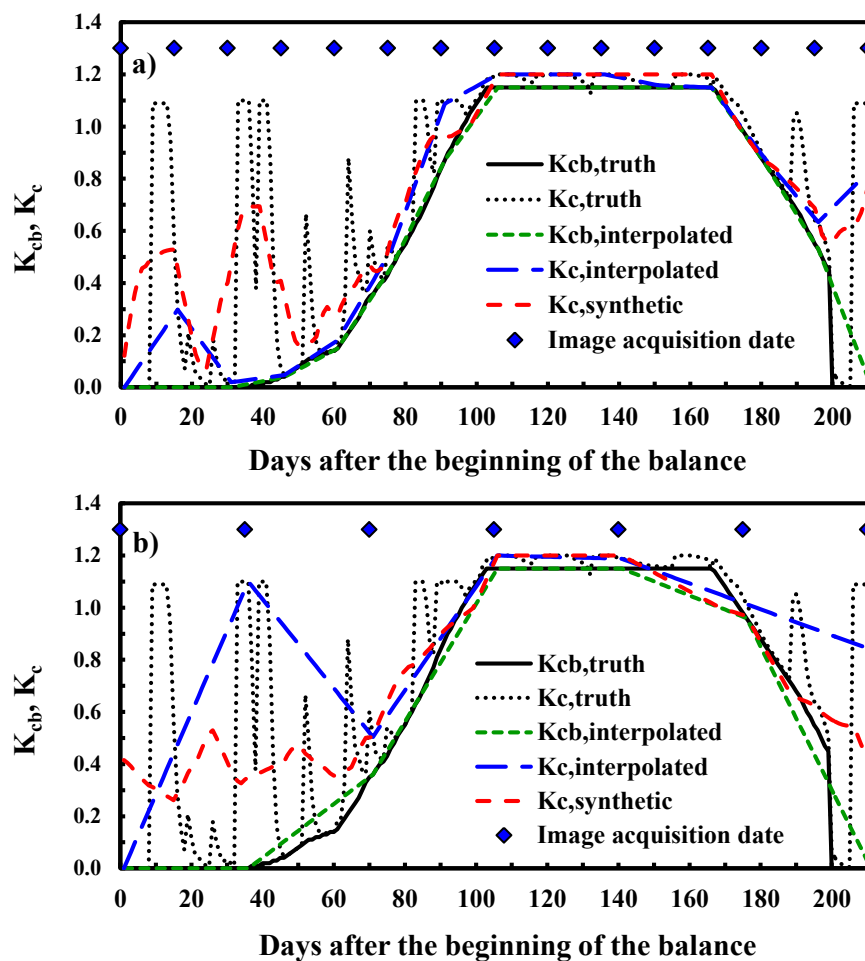


Figure 3.6. Evolution of $K_{c,truth}$, $K_{cb,truth}$, $K_{cb,interpolated}$, $K_{c,synthetic}$, and $K_{c,interpolated}$ in the interpolation simulation analysis for season 2014-15 and satellite overpass intervals of 15 (a) and 35 (b) days. Satellite overpass dates are indicated by diamonds. The simulation analysis was carried out for a cotton crop in the conditions of APAZ-IV.

The question is, with this frequency of images, which would be more appropriate: to interpolate K_c directly (for instance, output of the energy balance approach) or interpolate K_{cb} (for instance, output of the VI approach) and use an algorithm to derive K_c (for instance, the synthetic method). Fig. 3.6 depicts daily K_{cb} and K_c for the ideal cotton crop that represents the “truth” in the interpolation analysis that follows ($K_{cb,truth}$ and $K_{c,truth}$, respectively). The irrigation strategy in Fig. 3.6 was full irrigation. $K_{cb,interpolated}$ and $K_{c,interpolated}$ resulted from the linear interpolation of their respective “truth” values on the assumed days of satellite overpass (marked by diamonds at the top of each Fig. 3.6), and $K_{c,synthetic}$ resulted from applying the synthetic methodology using $K_{cb,interpolated}$ as an input. $K_{cb,interpolated}$ and $K_{c,interpolated}$ would

coincide with the respective “truth” coefficients if the satellite overpass were to be daily. Fig. 3.6a presents the five crop coefficient curves assuming an overpass interval of 15 days. The main observations were that $K_{cb,interpolated}$ represented $K_{cb,truth}$ very well; $K_{c,interpolated}$ fluctuated greatly capturing some of the variations of $K_{c,truth}$ but missing others; and $K_{c,synthetic}$ smoothed the fluctuations of $K_{c,truth}$. Similarly, Fig. 3.6b presents the same five crop coefficient curves although assuming an overpass interval of 35 days. $K_{cb,interpolated}$ still represented $K_{cb,truth}$ quite well; $K_{c,interpolated}$ deviated highly from $K_{c,truth}$ during most days of the initial and crop development stages; and $K_{c,synthetic}$ smoothed the fluctuations of $K_{c,truth}$ to a curve that was even flatter than that generated for the overpass interval of 15 days. This was just an example resulting from the specific rainfall pattern and irrigation schedule of a specific year. Fig. 3.7 shows the RMSE of the estimation of daily ET_c with the water balance run for the 30 years of weather data under the full irrigation strategy, using either $K_{c,interpolated}$ or $K_{c,synthetic}$. For short overpass intervals, the RMSE result of using $K_{c,synthetic}$ was greater than that employing $K_{c,interpolated}$. The curves crossed at an overpass interval of about 4 days, reaching a practically constant difference of about 0.3 mm day^{-1} for overpass intervals longer than 10 days. Although the difference between both RMSE was relatively small, it was noticeable that the standard deviation of RMSE was greater using $K_{c,interpolated}$ than using $K_{c,synthetic}$.

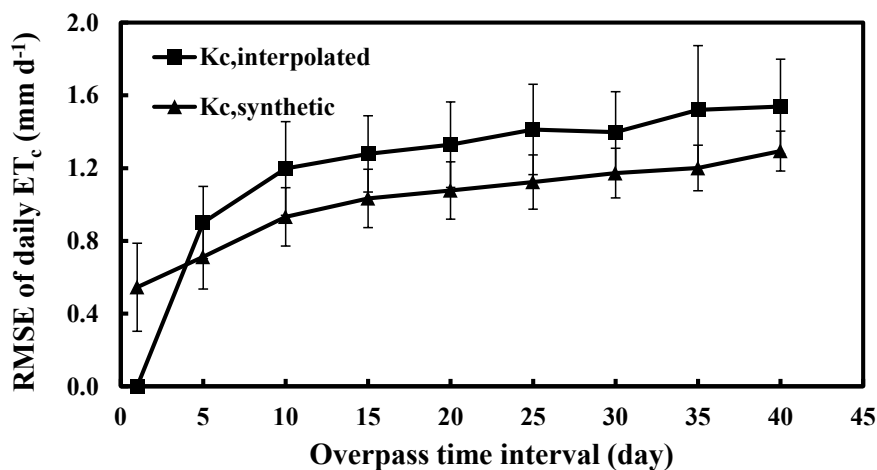


Figure 3.7. Root Mean Square Error (RMSE) of daily ET_c obtained from $K_{c,interpolated}$ and $K_{c,synthetic}$ with respect to the “truth” value as a function of the hypothetical interval of satellite overpass and assuming full irrigation strategy. The simulation analysis was carried out for a cotton crop in the conditions of APAZ-IV and 30 climate years (July 1, 1988 - June 30, 2018). The vertical bars indicate the standard deviation.

RE of seasonal $ET_{c,synthetic}$ was close to zero and showed little year-to-year variability when the water balance was run to prevent water deficit (Fig. 3.8a); however, under the

deficit irrigation strategy, seasonal $ET_{c,synthetic}$ was systematically greater (bias of about 5 %) than the seasonal ET_c obtained from $K_{c,truth}$ (Fig. 3.8b). Contrarily, the RE of seasonal ET_c obtained from $K_{c,interpolated}$ did not differ from zero and was similar under full irrigation and deficit irrigation; however, year-to-year variability was notably large. This is important because one of the advantages of the energy balance approach is its capacity to detect ET_c reduction due to crop water stress.

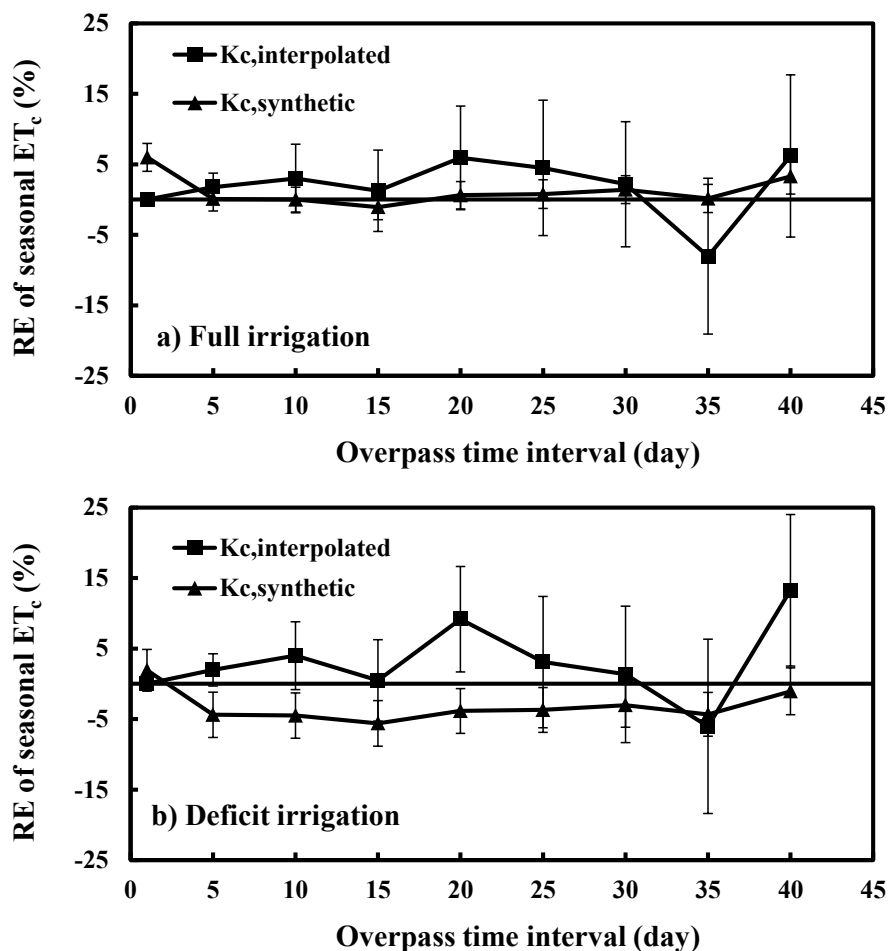


Figure 3.8. Relative Error (RE) of seasonal ET_c obtained from $K_{c,interpolated}$ and $K_{c,synthetic}$ with respect to the “truth” value as a function of the hypothetical interval of satellite overpass and assuming full (a) and deficit (b) irrigation strategy. The simulation analysis was carried out for a cotton crop in the conditions of APAZ-IV and 30 climate years (July 1, 1988 - June 30, 2018). The vertical bars indicate the standard deviation.

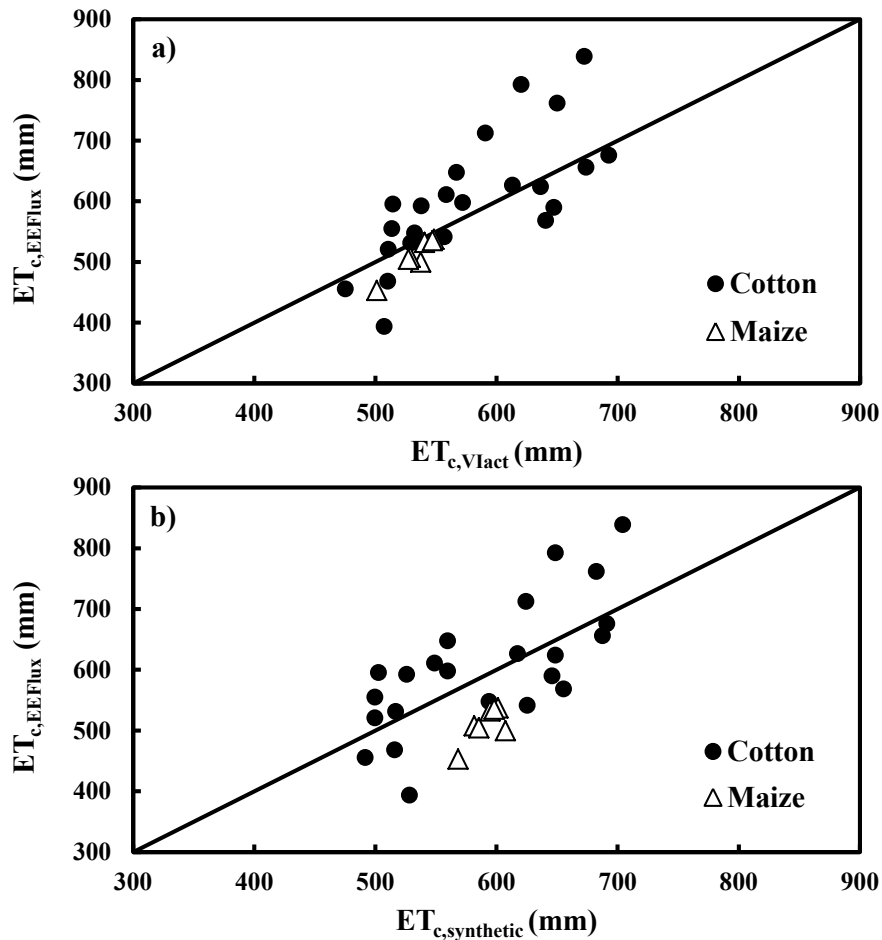


Figure 3.9. Seasonal ET_c in 30 selected crop fields obtained by interpolating K_c derived from actual and reference evapotranspiration provided by EEFlux on days of satellite overpass represented against: a) ET_c derived from interpolation of $K_{c,b,VI}$ on the days of satellite overpass and computing K_s and K_e running a water balance for a given irrigation schedule and b) ET_c derived from the synthetic crop coefficient method. In a) and b), the reference evapotranspiration was recorded at the INTA weather station. The crops were maize and cotton in APAZ-IV grown in the season 2014-15.

Fig. 3.9a compares seasonal $ET_{c,EEFlux}$ with $ET_{c,Vlact}$ computed for the 2014-15 irrigation season on the 30 selected fields. The satellite overpass interval for these computations varied from 24 to 66 days. It can be observed that cotton seasonal $ET_{c,EEFlux}$ was greater overall than the corresponding $ET_{c,Vlact}$ (Fig. 3.9a). The RMSE of seasonal $ET_{c,EEFlux}$ vs. seasonal $ET_{c,Vlact}$ was 75 mm and 27 mm for cotton and maize, respectively. The three satellite images that were available during the initial and early cotton development stages coincided in that particular year with dates immediately after rainfall events, so that $K_{c,interpolated}$ during that period was greater than $K_{c,Vlact}$ on most days (an example of $K_{c,interpolated}$ representative of this circumstance is in Fig. 3.10a). The opposite occurred for the maize fields. In the 2014 cropping season, satellite overpasses during the initial and early cotton development stages

coincided with dates several days after rainfall events, when the soil surface was already dry, so that the $K_{c,interpolated}$ during that period was lesser than $K_{c,VIact}$ on most days. However, this deviation is not visible in Fig. 3.9a because the underestimation consequence of the interpolation effect was compensated for by an overestimation of ET_c during the mid-season and late season stages, when the maize crops suffered water deficit but the last satellite overpasses occurred before the deficit period (an example of $K_{c,interpolated}$ representative of the two counteracting circumstances in the maize crops is in Fig. 3.10b).

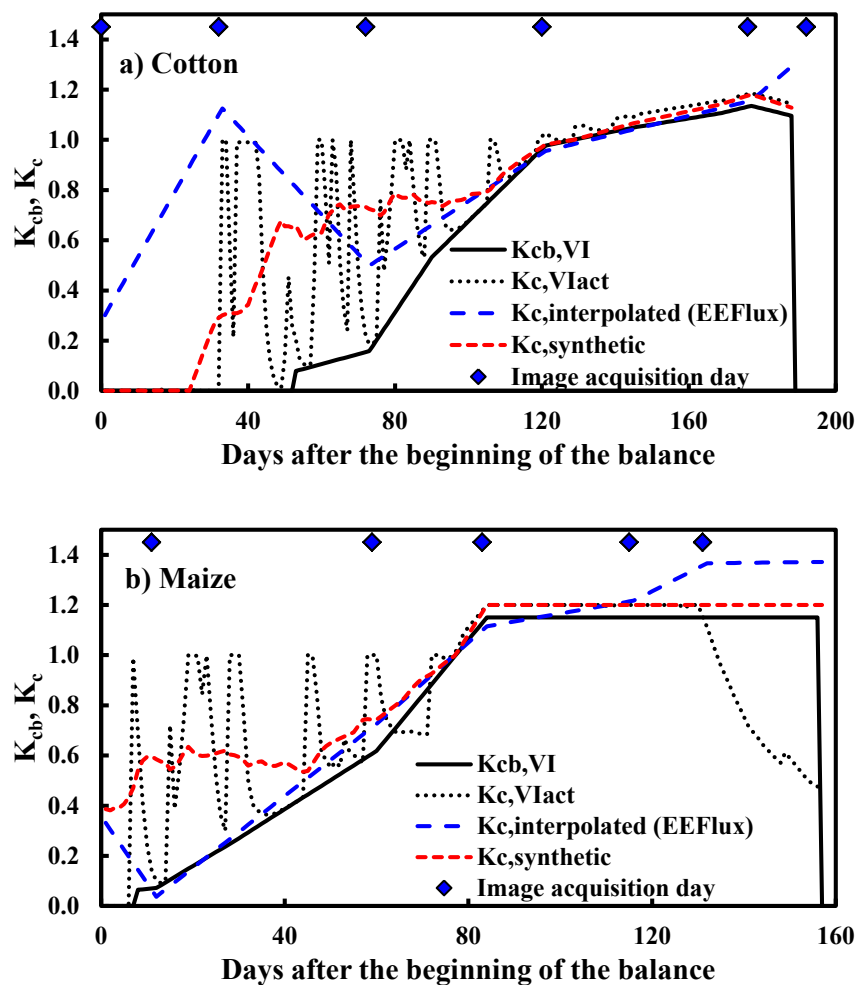


Figure 3.10. Evolution of $K_{cb,VI}$, $K_{c,VIact}$, $K_{c,interpolated}$ from EEFlux (obtained by interpolating K_c derived from actual and reference evapotranspiration provided by EEFlux) and $K_{c,synthetic}$, in a cotton field (a) and a maize field (b) from the 30 crop fields selected in APAZ-IV in the season 2014-15. Satellite overpass dates are indicated by diamonds.

Similarly to Fig. 3.9a, Fig. 3.9b compares seasonal $ET_{c,EEFlux}$ with $ET_{c,synthetic}$. The smoothing effect of $K_{c,synthetic}$ slightly reduced the discrepancy between the two approaches. This was evident for the cotton crops although the maize data points that in Fig. 3.9a were

close to the 1:1 line, in Fig. 3.9b were below that line (the RMSE of seasonal $ET_{c,EEFlux}$ vs. seasonal $ET_{c,synthetic}$ was 74 mm and 83 mm for cotton and maize, respectively). This reflects the incapacity of the $K_{c,synthetic}$ method to account for the reduction in ET_c as a consequence of the eventual crop water deficit.

3.6. Discussion

The standard deviation bars in Figs. 3.2a and 3.2c depict an important field-to-field crop growth variation. Other authors have observed it, as well as its implications for crop water use. Using a time series of SPOT and Landsat NDVI images, Simonneaux et al. (2008) and Er-Raki et al. (2010) classified winter wheat into classes that differed greatly within an irrigation scheme in central Morocco. Seasonal evapotranspiration for those wheat classes varied between 200 and 450 mm, a range of the same order as that obtained in our study using similar methodology. For instance, in the APAZ-IV and El Alto subsystems, $ET_{c,synthetic}$ varied between 437 and 902 mm and between 512 and 795 for cotton and maize fields, respectively. Tasumi et al. (2005) and Tasumi and Allen (2007) also reported growth variation in a variety of irrigated crops in Idaho using Landsat NDVI images. These authors did not use NDVI-derived K_c but obtained K_c directly by using an energy balance approach. Field-to-field ET_c variation was not discussed in these studies although the results showed that early-planted crops consumed more water than late-growing ones (Tasumi and Allen, 2007), but in a narrower range than that observed in the APAZ-IV and El Alto subsystems. These findings and similar ones by other authors (e.g., Santos et al., 2008; Gonzalez-Dugo et al., 2013; French et al., 2018; Segovia-Cardozo et al., 2019) stress the importance of exploring factors that influence irrigation decisions (Gibson et al., 2018), and of going deeper into methodologies to accurately determine spatially-distributed water use in irrigation schemes.

A crucial issue when determining ET_c by using methods based on remote sensing is soil evaporation under partial ground cover. Tasumi et al. (2005) observed that the variation in the K_c curves was considerably greater than that for the NDVI, which they attributed to the effect of wetting events on K_c , particularly during the initial and developmental growth stages. Methods based on VI are adequate for deriving K_{cb} but not for the soil evaporation component of K_c . Therefore, some complementary algorithm is necessary to overcome this limitation. One alternative is to run a water balance (Pôças et al., 2015) as we did to compute $ET_{c,VIopt}$ (for the entire subsystems) and $ET_{c,VIact}$ (for selected fields); however, this requires additional

soil information and knowing the irrigation dates of each field, which are rarely available on a scheme scale. The synthetic crop coefficient (Mateos et al., 2013) adopted in this study overcame this shortcoming by computing crop coefficients that took into account field specific K_{cb} while adjusting K_c to actual rain wetting events and typical irrigation frequency. The $K_{c,synthetic}$ curve depicted in Figs. 3.2b and 3.2d sounds like a realistic temporal evolution, first, better adjusted to local conditions than the $K_{c,standard}$ curve and, second, capturing the field-to-field variation that the $K_{c,standard}$ cannot do. The similarity of seasonal $ET_{c,VIopt}$ and $ET_{c,synthetic}$ in the APAZ-IV and El Alto subsystems (Table 3.4) and the good correlation between seasonal $ET_{c,VIact}$ and $ET_{c,synthetic}$ for cotton crops (Fig. 3.3) support the use of the $K_{c,synthetic}$ methodology. Even if only partially, this methodology approximates the single and dual crop coefficients that are so discrepant when ground cover is partial (López-Urrea et al., 2009). Additionally, the potential for better adjusting $K_{c,standard}$ to local conditions using a remote sensing approach (Tasumi et al., 2005; Segovia-Cardozo et al., 2019) was evident in SRRD.

It was notable how the synthetic approach missed the effect of deficit irrigation of maize (Fig. 3.3). This observation prompted the comparison with an energy balance approach. EEFlux was a helpful and friendly platform allowing non-experts to apply METRIC. The comparison of $K_{c,EEFlux}$ with $K_{c,VIact}$ in Fig. 3.4a indicated that the former was greater than the latter in the range of smaller values. Ayyad et al. (2019) obtained similar results when comparing EEFlux with other satellite-based models in irrigated areas of Egypt. One of the causes of this discrepancy could be the difference between METRIC and EEFlux. Firstly, EEFlux uses gridded weather data to estimate reference evapotranspiration, while METRIC and the VI-based approach use data from weather stations. Secondly, some authors have observed that the automated EEFlux calibration algorithm could require some adjustment to reproduce manually-calibrated METRIC products for certain environments (Foolad et al., 2018). Nevertheless, the RMSE of 0.22 found in our comparison of $K_{c,EEFlux}$ with $K_{c,synthetic}$ was of the same order as the results of other authors who compared METRIC with other models. For instance, French et al. (2015) found that METRIC ET_c estimates agreed with ET_c obtained from consecutive measurements of soil water content in cotton to about 2 mm d^{-1} . Paço et al. (2014) stated that ET_c of an olive orchard hedgerow computed using the FAO56 method agreed rather well with METRIC ET_c estimations. The deviation of the crop coefficients obtained with METRIC and with the FAO56 model developed by these authors (mean bias of 18 %) was similar or even greater than the deviation observed in our

comparison. Zhang et al. (2015) found a good correlation between METRIC ET_c estimates of sugarcane with those of ET_c computed with the FAO56 method using a VI-derived K_{cb} ($RMSE = 0.17-0.19 \text{ mm d}^{-1}$), although the former was lesser than the latter in the range of lower ET_c . However, K_c obtained from METRIC agreed quite well with K_c derived from VI in the two sugarcane fields monitored by these authors. Nevertheless, other authors who carried out inter-comparison of models observed greater discrepancies. For instance, Al Zayed et al. (2016) obtained a RMSE of 2 mm d^{-1} when comparing METRIC ET_c with ET_c derived from a water balance in the Gezira irrigation scheme (Sudan), with the former globally greater than the latter. Similarly, French et al. (2018) compared METRIC ET_c with estimates of ET_c computed with the FAO56 method (using VI-derived K_{cb}) obtaining that the former was about 1 and 2 mm d^{-1} greater than the latter for alfalfa and cotton, respectively, implying a significant deviation when computing seasonal ET_c .

However, the main source of error in the estimation of seasonal ET_c may derive from interpolation between spaced dates due to infrequent satellite overpass. He et al. (2017) compared METRIC ET_c estimates over an almond orchard in California with measurements taken with a micrometeorological tower. Satellite revisiting time was 16 days, but most images during December to March were not usable due to cloud cover. The conditions of the orchard were the ones that minimize the interpolation error (adult and uniform orchard, no rainfall, micro-irrigation). However, the mean relative difference of monthly aggregations from April to September was 10 %, within the range estimated in Fig. 8a for 15-day revisiting time. French et al. (2015) tested the impact of overpass frequency on cotton seasonal ET accuracy and showed a significant advantage in an 8-day overpass frequency compared with a 16-day observation interval. Similar results by Zhang et al. (2015) led these authors to conclude that the VI approach may be more practical for estimating sugarcane crop water use, where ground-based ET_o measurements are available through on-site weather stations. Our results support this conclusion except under the following circumstances: when satellite-revisiting time is less than one week; if deficit irrigation is a common practice; or where ground-based ET_o measurements are not available through automated weather stations or in a network covering all the scheme's conditions. The first condition was not met in SRRD but the other two were. The distance from SRRD fields to the nearest weather station may be up to 5 km, and the perception of farmers and agriculturalists is that significant weather variations are evident across the scheme on specific days. Thus, as concluded by Zhang et al. (2015) for a different environment, spatially distributed reference evapotranspiration (in this

case provided by EEFlux) seems to be a better choice in SRRD than reference evapotranspiration obtained at the weather stations.

In summary, a combination of the two approaches evaluated in this study could be the best option, as suggested by Paço et al. (2014). Meanwhile, it is clear that scheme performance assessment based on ET_c estimations interpolating satellite-derived K_c is subject to errors that advise against such applications.

3.7. Conclusions

In the assessment of irrigation schemes, water balance-related performance indicators could be notably improved if the crop evapotranspiration estimated is field-specific, and based on remote sensing techniques. The robustness of the VI-based approach is the confidence of the daily interpolation of the VI-derived K_{cb} . Its disadvantages are the need of a complementary procedure to account for soil wetting events and its inability to detect crop water stress. Therefore, if deficit irrigation is a common practice (as observed in some crops in SRRD), the VI-approach will overestimate crop evapotranspiration so that remote sensing methods based on the energy balance may be more appropriate. However, when satellite overpass frequency is greater than one week (and water deficit is mild or inexistent), the interpolation of crop coefficients obtained with the energy balance approach leads to errors of ET_c estimations that are greater than the errors resulting from estimating ET_c using VI-derived basal crop coefficients in combination with an algorithm to consider soil evaporation. The synthetic crop coefficient was an appropriate approach to deriving field-specific VI-based crop coefficients when the dates of field irrigation events are unknown, as commonly happens in large irrigation schemes, although other VI-based approaches may be as appropriate as the synthetic crop coefficient.

Future research should therefore investigate methods to combine both approaches to take advantage of the robustness of each of them avoiding their weaknesses.

References

- Al Zayed, I.S., Elagib, N.A., Ribbe, L., Heinrich, J., 2016. Satellite-based evapotranspiration over Gezira Irrigation Scheme, Sudan: A comparative study. *Agricultural Water Management*, 177, 66–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.06.027>

- Allen, R. G., Morton, C., Kamble, B., Kilic, A., Huntington, J., Thau, D., Gorelick, N., Erickson, T., Moore, R., Trezza, R., Ratcliffe, I., Robison, C., 2015. EEFlux: A Landsat-based evapotranspiration mapping tool on the Google Earth Engine. In; Emerging Technologies for Sustainable Irrigation. A joint ASABE / IA Irrigation Symposium. Long Beach, CA, pp. 1–11.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., 2009. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover. *Irrigation Science*, 28, 17–34.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Raes, D., Smith, M., Pereira, L.S., 2005. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 14-23.
- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., Kramber, W.; Lorite, I., Robison, C. W., 2007a. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 133 (4), 395-406
- Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007b. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 133 (4), 380–394.
- Angella, G., García Vila, M., López, J.M., Barraza, G., Salgado, R., Prieto Angueira, S., Tomsic, P., Fereres, E., 2016. Quantifying yield and water productivity gaps in an irrigation district under rotational delivery schedule. *Irrigation Science*, 34, 71–83. DOI 10.1007/s00271-015-0486-0
- Angella, G., Prieto, D., Salgado, R., Salvatierra, J., Wintten, C., Coronel Lozano, A., Sarria, C., Ybarra, R., 2011. La evaluación del desempeño de los sistemas de riego como una herramienta para la mejora de su gestión. In: XXIII Congreso Nacional del Agua. ISSN 1853-7685.
- Angueira, C., Zamora, E., 2007. Oeste del área de riego del Río Dulce, Santiago del Estero, Argentina. Ed. INTA. ISSN 1850 4086. Serie informes técnicos EEASE N°40.

- ASCE–EWRI, 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE–EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Rep., ASCE Reston, Va. 120 p.
- Ayyad, S., Al Zayed, I.S., Ha, V.T.T., Ribbe, L., 2019. The performance of satellite-based actual evapotranspiration products and the assessment of irrigation efficiency in Egypt. *Water*, 11, 1913; doi:10.3390/w11091913
- Bastiaanssen, W.G.M., Brito, R.A.L., Bos, M.G., Souza, R.A., Cavalcanti, E.B., Bakker, M.M., 2001. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. *Irrigation and Drainage Systems* 15: 53–79.
- Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holstlag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212-213, 198–212.
- Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1987. Crop coefficients derived from reflected canopy radiation: A concept. *Transactions of the ASAE*, 30, 703–709.
- Bausch, W.C., Neale, C.M.U., 1989. Spectral inputs improve corn crop coefficients and irrigation scheduling. *Transactions of the ASAE*, 32, 1901–1908.
- Borgia, C., García-Bolaños, M., Li, T., Gómez-Macpherson, H., Comas, J., Connor, D., Mateos, L., 2013. Benchmarking for performance assessment of small and large irrigation schemes along the Senegal Valley in Mauritania. *Agricultural Water Management*, 121, 19–26.
- Bos, M.G., Burton, M.A., Molden, D.J., 2005 *Irrigation and drainage performance assessment –practical guidelines*. CABI Publishing, Wallingford, UK, 158 pp
- Calera, A., Jochum, A.M., Cuesta-Garcia, A., Montoro-Rodriguez, A., Lopez-Fuster, P., 2005. Irrigation management from space: towards user-friendly products. *Irrigation and Drainage Systems*, 19, 337–353.
- Calera, A., Campos, I., Osann, A., D’Urso, G., Menenti, M., 2017. Remote sensing for crop water management: from ET modelling to services for the end users. *Sensors*, 17 (5), 1104.
- Carpintero, E., Mateos, L., Andreu, A., González-Dugo, M.P., 2020. Effect of the differences in spectral response of Mediterranean tree canopies on the estimation of

- evapotranspiration using vegetation index-based crop coefficients. *Agricultural Water Management*, 238, 106201, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106201>
- Chalghaf, I, Elhaddad, A., García, L.A., Lecina, S., 2015. Remote sensing and district database programs for irrigation monitoring and evaluation at a regional scale. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 141 (11), 04015016.
- Choudhury, B.J., Ahmed, N.U., Idso, S.B., Reginato, R.J., Daughtry, C.S.T., 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of the Environment*, 50, 1–17.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No.24, Rome, Italy.
- D’Urso, G., Richter, K., Calera, A., Osann, M.A., Escadafal, R., Garatuza-Pajan, J., Vuolo, F., 2010. Earth observation products for operational irrigation management in the context of the PLEIADeS project. *Agric. Water Manag.* 98 (2), 271–282.
- Droogers, P., Bastiaanssen, W., 2002. Irrigation performance using hydrological and remote sensing modeling. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128 (1), 11-18.
- Echevehere, P. H., 1976. Normas de reconocimiento de suelos. INTA-CIRN. Pub. N° 152 - 2° Edición. Castelar, Buenos Aires.
- Elhaddad, A., Garcia, L. A., 2011. Surface energy balance model for calculating evapotranspiration using a raster approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137 (4), 203–210.
- Elhaddad, A., Garcia, L. A., 2014. Using a surface energy balance model (ReSET-Raster) to estimate seasonal crop water use for large agricultural areas: Case study of the Palo Verde irrigation district. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140 (10), 05014006.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Duchemin, B., 2010. Combining satellite remote sensing data with the fao-56 dual approach for water use mapping in irrigated wheat fields of a semi-arid region. *Remote Sensing*, 2, 375-387. doi:10.3390/rs2010375
- Foolad, F., Blankenau, P., Kilic, A., Allen, R. G., Huntington, J. L., Erickson, T. A., Ozturk, D., Morton, C. G., Ortega, S., Ratcliffe, I., Franz, T. E., Thau, D., Moore, R., Gorelick, N., Kamble, B., Reville, P., Trezza, R., Zhao, W., Robison, C. W., 2018. Comparison of

- the Automatically Calibrated Google Evapotranspiration Application—EEFlux and the Manually Calibrated METRIC Application. doi: 10.20944/preprints201807.0040.v1
- French, A.N., Hunsaker, D.J., Bounoua, L., Karnieli, A., Lueck, W.E., Strand, R., 2018. Remote Sensing of Evapotranspiration over the Central Arizona Irrigation and Drainage District, USA. *Agronomy*, 8, 278. doi:10.3390/agronomy8120278
- French, A.N., Hunsaker, D.J., Thorp, K.R., 2015. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. *Remote Sensing of Environment* 158, 281–294.
- Galizzi, F., González, C., Nazar, P., Elias Tissera, N. J., Ramírez, N. M., Gómez, N. A., 2015. Condición inicial de un suelo degradado por el uso agrícola continuado en la zona IV de riego del Rio Dulce (Provincia de Santiago del Estero). X Jornadas de Ciencia y Tecnología de Facultades de Ingeniería del NOA. Salta 21 al 22 de mayo de 2015.
- Gibson, K.E.B., Yang, H.S., Franz, T., Eisenhauer, D., Gates, J.B., Nasta, P., Farmaha, B.S., Grassini, P., 2018. Assessing explanatory factors for variation in on-farm irrigation in US maize-soybean systems. *Agricultural Water Management*, 197, 34–40
- Gonzalez-Dugo, M. P., Escuin, S., Cano, F., Cifuentes, V., Padilla, F.L.M., Tirado, J.L., Oyonarte, N., Fernández, P., Mateos, L., 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. II. Application on basin scale. *Agricultural Water Management*, 125, 92– 104.
- González-Dugo, M.P., Mateos, L., 2008. Spectral vegetation indices for benchmarking water productivity of irrigated cotton and sugarbeet crops. *Agricultural Water Management*, 95, 48–58.
- Gonzalez-Dugo, M.P., Neale, C.M.U., Mateos, L., Kustas, W.P., Prueger, J.H., Anderson, M.C., Li, F., 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1843–1853.
- He, R., Jin, Y., Kandelous, M.M., Zaccaria, D., Sanden, B.L., Snyder, R.L., Jiang, J., Hopmans, J.W., 2017. Evapotranspiration estimate over an almond orchard using Landsat satellite observations. *Remote Sensing*, 9, 436. doi:10.3390/rs9050436
- Huete, A.R., Jackson, R.D., Post, D.F., 1985. Spectral response of a plant canopy with different soil background. *Remote Sensing of the Environment*, 17, 37–53.

- Irmak, A., Allen, R.G., Kjaersgaard, J., Huntington, J., Kamble, B., Trezza, R., Ratcliffe, I., 2012. Operational Remote Sensing of ET and Challenges, Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling, Dr. Ayse Irmak (Ed.), ISBN: 978-953-307-808-3, InTech, Available from: <https://www.intechopen.com/books/evapotranspiration-remote-sensing-and-modeling/operational-remote-sensing-of-et-and-challenges>
- Kustas, W.P., Norman, J.M., 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences*, 41, 495–516.
- López-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Montoro, A., López-Fuster, P., 2009. Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 96, 1031–1036.
- Lozano, D., Mateos, L., 2008. Usefulness and limitations of decision support systems for improving irrigation scheme management. *Agricultural Water Management*, 95, 409–418
- Malano, H., Burton, M., 2001. Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. *International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage*, FAO, Rome, 43 pp
- Malano, H., Burton, M., Makin, I., eds., 2004. Benchmarking of irrigation and drainage sectors. *Irrigation and Drainage*, 53(2), 214 pp
- Mateos, L., González-Dugo, M.P., Testi, L., Villalobos, F.J., 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agricultural Water Management*, 125, 81–91.
- Melton, F.S., Johnson, L.F., Lund, C.P., Pierce, L.L., Michaelis, A.R., Hiatt, S.H., Guzman, A., Adhikari, D., Purdy, A.J., Rosevelt, C., Votava, P., Trout, T.J., Temesgen, B., Frame, K., Sheffner, E.J., Nemani, R.R., 2012. Satellite irrigation management support with the terrestrial observation and prediction system: A framework for integration of satellite and surface observations to support improvements in agricultural water resource management. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5, 1709-1721.
- Menenti, M., Visser, T.N.M., Morabito, J.A., Drovandi, A., 1989. Appraisal of irrigation performance with satellite data and georeferenced information, in Rydzewski, J.R. and Ward, C.F. (eds.) *Irrigation, Theory and Practice*, Proc. of the Int. Conf., Institute of

- Irrigation Studies, Southampton, 12–15 September 1989: 785–801. Pentech Press, London.
- Molden, D., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., de Fraiture, C., Kloezen, W.H., 1998. Indicators for comparing performance of irrigated agricultural systems. Research Report No 20. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 26 pp.
- Morábito, J., Bos, M., Vos, S., Brouwer, R., 1998. The quality of service provided by the irrigation department to the users associations, Tunuyán System, Mendoza, Argentina. *Irrigation and Drainage System*, 12, 49-65.
- Morello, J., Adámoli, J., 1974. Las grandes unidades de vegetación y ambiente del Chaco argentino. Segunda parte. Vegetación y ambiente de la provincia del Chaco. La vegetación de la República Argentina, Serie Fitogeográfica, 13, 130.
- Neale, C.M.U., Bausch, W.C., Heermann, D.F., 1989. Development of reflectance based crop coefficients for corn. *Transactions of the ASAE* 32, 1891–1899.
- NRCS National Engineering Handbook, 2004. Part 630 Hydrology. Chapter 10. Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Paço, T.A., Pôças, I., Cunha, M., Silvestre, J.C., Santos, F.L., Paredes, P., Pereira, L.S., 2014. Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *Journal of Hydrology*, 519, 2067–2080.
- Pereira, L.S., Paredes, P., Hunsaker, D.J., López-Urrea, R., Mohammadi Shad, Z., 2020a. Standard single and basal crop coefficients for field crops. Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agric. Water Manage.*
- Pereira, L.S., Paredes, P., López-Urrea, R., Hunsaker, D.J., Mota, R.M., Mohammadi Shad, Z., 2020b. Standard single and basal crop coefficients for vegetable crops, an update of FAO56 crop water requirements approach. *Agric. Water Manage.*
- Pôças, I., Calera, A., Campos, I., Cunha, M., 2020. Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: a review on spectral vegetation indices approaches. *Agricultural Water Management* Volume 233,106081, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106081>

- Pôças, I., Paço, T.A., Paredes, P., Cunha, Pereira, L.S., 2015. Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data. *Remote Sensing*, 7, 2373-2400. doi:10.3390/rs70302373
- QGIS Development Team, 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Rawles, W. J., Brakensiek, D. L., 1982. Estimating soil water retention from soil properties. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, 108(2), 166-171.
- Rodríguez-Díaz, J.A., Camacho-Poyato, E., López-Luque, R., Pérez-Urrestarazu, L., 2008. Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts: an application in Spain. *Agricultural Systems* 96, 250–259.
- Roerink, G. J., Bastiaanssen, W. G. M., Chambouleyron, J., Menenti, M., 1997. Relating crop water consumption to irrigation water supply by remote sensing. *Water Resources Management*, 11, 445–465.
- Santos, C., Lorite, I.J., Tasumi, M., Allen, R.G., Fereres, E., 2008. Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrigation Science*, 26, 277–288. DOI 10.1007/s00271-007-0093-9
- Segovia-Cardozo, D.A., Rodríguez-Sinobas, L., Zobelzu, S., 2019. Water use efficiency of corn among the irrigation districts across the Duero river basin (Spain): Estimation of local crop coefficients by satellite images. *Agricultural Water Management*, 212, 241–251.
- Simonneaux, V., Duchemin B., Helson, D., Er-Raki, S., Olioso, A., Chehbouni, A.G., 2008. The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco, *International Journal of Remote Sensing*, 29, 95-116. doi: 10.1080/01431160701250390
- Taghvaeian, S., Neale, C.M.U., 2011. Water balance of irrigated areas: a remote sensing approach. *Hydrological Processes*, 25, 4132–4141. DOI: 10.1002/hyp.8371
- Taghvaeian, S., Neale, C. M., Osterberg, J. C., Sritharan, S. I., Watts, D. R., 2018. Remote sensing and GIS techniques for assessing irrigation performance: Case study in Southern California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 144 (6), 05018002.

- Tasumi, M., Allen, R.G., 2007. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agricultural Water Management*, 88, 54–62.
- Tasumi, M., Allen, R.G., Trezza, R., Wright, J.L., 2005. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131, 94-109.
- Zema, D.A., Nicotra, A., Mateos, L., Zimbone, S.M., 2018, Improvement of the irrigation performance in Water Users Associations integrating data envelopment analysis and multi-regression models. *Agricultural Water Management*, 205, 38–49 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.032>.
- Zhang, H., Anderson, R.G., Wanga, D., 2015. Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. *Field Crops Research*, 180, 143–154.

CAPÍTULO 4.

CONCLUSIONES GENERALES

CAPÍTULO 4.

Conclusiones Generales

Los resultados a nivel internacional que nuestra revisión bibliográfica han desvelado que la transferencia de la gestión de los sistemas de riego (IMT, por sus siglas en inglés) es un proceso lento y complejo que exige compromiso político continuo y genuino. Los modelos adoptados deben estar rigurosamente adaptados a las condiciones locales y ser revisados, reorientados y refinados periódicamente. La evidencia de nuestra revisión de experiencias en distintos países dice que no contar con un programa formal de gobierno sobre la IMT amenaza la efectividad de las nuevas gestiones participativas.

La posibilidad, dentro del Sistema de Riego del Río Dulce (SRRD), de comparar el desempeño de un subsistemas con la operación y el mantenimiento (O&M) transferidos a una asociación de usuarios del agua con el desempeño de otro gestionado por el gobierno, fue una oportunidad excepcional reforzada por el conocimiento de las condiciones socio-técnicas iniciales de cada subsistema. La metodología de investigación de casos, aplicada en la mayoría de los estudios de IMT ante la imposibilidad de realizar experimentos controlados, permitió una evaluación faltante en el SRRD en particular y en Argentina en general.

La evaluación del desempeño de los dos subsistemas permitió diferenciar la calidad del servicio. El subsistema transferido a los agricultores utilizó más intensamente los permisos de riego y diversificó su patrón de cultivos en comparación con el canal gestionado por el gobierno. El servicio de entrega de agua en el subsistema transferido evolucionó a programas de entrega más flexibles que los del sistema no transferido. A pesar de esto, no está claro si la flexibilidad permitió un patrón de cultivo más diversificado y una mayor utilización de los derechos de agua de riego, si fue el patrón de cultivo diversificado existente el que promovió una distribución de agua más flexible, o si se trató de un proceso retroalimentado. En cualquiera de los casos, la IMT dio lugar a la mejora de la gestión del agua.

En el subsistema transferido, el uso del agua fue mayor que en el gestionado por el gobierno. Esto se debió al patrón de cultivo diversificado pues no implicó un aumento del suministro relativo de riego consecuencia de la IMT. La situación general denotó sub-

irrigación. Una tendencia histórica de suministro relativo de riego decreciente en todo el sistema es factor de confusión (común en los “experimentos naturales”) que podría estar enmascarando posibles efectos de la IMT. El proceso y los efectos de la IMT fueron más evidentes en las derivaciones de riego compuesta de agricultores del tipo empresarial que en las derivaciones de riego compuestas por pequeños agricultores, hasta el punto de que parte de los efectos en principio atribuidos a la IMT pudieron deberse a la naturaleza empresarial de algunas derivaciones de riego, ya que se observaron también en parte de las derivaciones de riego de tipo empresarial en el subsistema no transferido.

La disposición a participar en la gestión colectiva a cualquier nivel fue mayor en el subsistema transferido que en el no transferido. Los agricultores en el subsistema transferido eran más conscientes de los problemas del servicio de riego que los agricultores en el subsistema no transferido. La percepción de problemas en este último aumentó con el nivel de profesionalismo y asesoramiento de los agricultores. Sin embargo, sus solicitudes y quejas se transmitieron a través de procedimientos poco claros, a diferencia del sistema transferido, donde la transmisión siguió generalmente la jerarquía del sistema de riego, desde los administradores de las asociaciones de usuarios de agua (WUAs, por sus siglas en inglés) de menor orden hacia los niveles superiores.

Una observación que no tiene el carácter de conclusión por estar basada en observaciones dispersas, pero que han sugerido también otros autores, es que transferencias incompletas no logran la efectividad de las transferencias completas, y corren el riesgo de reversibilidad. Sin embargo, transferir la carga total del costo de O&M del sistema a los agricultores puede ser riesgoso, ya que aumentaría considerablemente el precio del servicio (en el SRRD implicaría aumentar las tarifas de riego nueve veces). Estas situaciones requieren de planificación integral de los objetivos de la IMT, para lo que las experiencias en otros países pueden enseñar de sus errores y aciertos.

La aplicación de modelos e indicadores para la evaluación del desempeño del riego abrió una línea de investigación metodológica. En la estimación de la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), componente de mayor peso en los principales indicadores de desempeño de los sistemas de riego, las técnicas de teledetección, con capacidad de diferenciar entre campos con alta resolución, reflejaron una situación de los cultivos más próxima a lo real que las técnicas convencionales (especialmente indiferenciadas). Entre las técnicas evaluadas, el coeficiente de cultivo sintético es un enfoque apropiado para derivar coeficientes de cultivo

específicos para cada campo cuando se desconocen las fechas de los riegos, como ocurre comúnmente en los grandes sistemas de riego. No obstante, si el riego deficitario es una práctica común, el coeficiente de cultivo sintético sobreestimaré la evapotranspiración del cultivo.

Los métodos de teledetección basados en el balance de energía de la superficie, que utilizan la temperatura radiante de la superficie, medida por algunos satélites, pueden ser más apropiados en tal situación y en particular cuando los pasos de satélites son frecuentes (pasos menores a una semana). Sin embargo, cuando la frecuencia de paso del satélite es mayor a una semana (y el déficit hídrico leve o inexistente), la interpolación de los coeficientes de cultivo obtenidos desde el balance de energía puede conducir a errores en las estimaciones de ET_c , errores que podrían ser mayores que los resultantes de la estimación ET_c utilizando coeficientes de cultivo basales derivados de índices de vegetación (y algún tipo de algoritmo, como el del coeficiente de cultivo sintético, para considerar la frecuencia de humedecimiento del suelo para obtener el coeficiente de cultivo).