



**FONTAGRO**



“Evaluación de los cambios en la productividad del agua, frente a diferentes escenarios climáticos, en distintas regiones del Cono Sur”  
Código: FTG-8042/08



## CONTENIDO

PRESENTACION

COORDINACION Y ASESORIAS DEL PROYECTO

1. RESUMEN EJECUTIVO FINAL

- Introducción
- Resultados
- Productos concretos alcanzados
- Tabla de indicadores
- Conclusiones

2. RESUMEN EXTENDIDO DE ARGENTINA

3. RESUMEN EXTENDIDO DE BOLIVIA

4. RESUMEN EXTENDIDO DE CHILE

5. RESUMEN EXTENDIDO DE URUGUAY





## PRESENTACION

El Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur – PROCISUR ([www.procisur.org.uy](http://www.procisur.org.uy)), creado en 1980 con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo –BID constituye un esfuerzo conjunto de los Institutos Nacionales de Investigación Agropecuaria del Cono Sur- INIA's, de Argentina, Bolivia, Brasil, Chile Paraguay, Uruguay y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura –IICA.

Desde el año 2004 PROCISUR a través de una Plataforma Regional ha venido apoyando directamente la cooperación técnica en el desarrollo del riego.

La cooperación técnica en riego tiene especial relevancia en los países del Cono Sur, porque se trata de un tema trascendente no tan solo para la agricultura sino también para el desarrollo integral de los territorios. El impacto del riego en el desarrollo se verá acrecentado en los próximos años por varias razones, entre las que se pueden mencionar: aumento de productividad para contribuir a la seguridad alimentaria, mitigar los efectos del cambio climático, sobre todo en términos de variabilidad de precipitaciones, contribuir a mejorar los índices de la huella hídrica en sistemas productivos más eficientes. Por otra parte, la intensificación de la agricultura en las zonas de riego se transforma en una generadora de nuevos trabajos, agroindustria y numerosos servicios asociados, al mismo tiempo que es un motor movilizador de nuevas tecnologías.

En el ámbito de la Plataforma de Recursos Hídricos y Tecnología de Riego y con el financiamiento de FONTAGRO se ejecutó el proyecto Evaluación de los cambios en la productividad del agua frente a diferentes escenarios climáticos en distintas regiones del Cono Sur.

En este proyecto los países de la región buscaron mejorar la eficiencia de los diferentes usos del agua, entre las medidas necesarias para disminuir la vulnerabilidad a los eventos extremos que se producen con mayor frecuencia debido a los efectos del cambio climático. En sus aspectos metodológicos el proyecto dio gran importancia a estudios de hidrología y modelamiento de cuencas que permitiera orientar la toma de decisiones y mejorar la productividad del agua. Sus resultados contribuyeron a un mejor conocimiento del comportamiento de diferentes cultivos, al someterlos a condiciones variables de demanda de agua, y ajustar modelos de respuesta que permitan predecir comportamientos futuros, ante posibles alteraciones en los aportes de agua. Por otra parte, el proyecto avanzó en la formulación de varias estrategias que permitirán mitigar, adaptar y capitalizar los posibles efectos del cambio climático, de manera de apoyar la toma de decisiones para las inversiones públicas y privadas de los países del cono sur. Todo ello contribuirá a disminuir los riesgos y la vulnerabilidad de los territorios de la zona en estudio, afectados por el cambio climático.

PROCISUR valora enormemente este esfuerzo, que permite aprovechar las capacidades técnicas disponibles en la región, creando sinergia al servicio de los países. Esperamos que esta publicación contribuya a difundir información que permita hacer un uso más eficiente y sustentable del recurso hídrico, por el cual habrá cada vez más competencia y restricciones para su uso.

**Emilio Ruz, Ph. D.**  
**Secretario Ejecutivo**  
**PROCISUR**



## COORDINADORES DEL PROYECTO Y ASESORES

- Alfonso Osorio Ulloa, Ingeniero Agrónomo, M. Sc. Coordinador General del Proyecto y de las actividades en Chile (aosorio@inia.cl)
- Daniel Prieto, Ingeniero Agrónomo, Dr. Coordinador de las actividades del proyecto en Argentina (dprieto@santiago.inta.gov.ar)
- René Chipana Rivera, Ingeniero Agrónomo, Dr. Coordinador de las actividades del proyecto en Bolivia (renechipana@yahoo.com)
- Claudio García, Ingeniero Agrónomo, Dr. Coordinador de las actividades del proyecto en Uruguay (c.gallarreta@gmail.com)

## ASESORES INTERNACIONALES

- Theib Oweis, Dr. ICARDA Siria
- Luciano Mateos, Dr. IAS-CSIC España
- Joan Girona, Dr. IRTA España
- Luis Santos Pereira, Dr. Portugal
- Elías Fereres, Dr. IAS-CSIC España
- Henoque Ribeiro da Silva, Dr. EMBRAPA, Brasil
- Walter Baethgen, Dr. U. de Columbia, USA



# RESUMEN EJECUTIVO FINAL

## Proyecto N°: FTG-8042/08

### Introducción

El calentamiento global está generando diversos efectos ambientales, económicos y sociales negativos en los países del mundo, los cuales se irán acentuando en los próximos años. La agricultura es una de las actividades económicas más afectadas por el cambio climático y también una de las más importantes en América Latina. Dado lo anterior, se hace imprescindible establecer estrategias de adaptación que permitan mantener y/o aumentar la producción de alimentos para una demanda mundial siempre en crecimiento, bajo los nuevos escenarios climáticos, como es la ocurrencia más frecuente de escasas o abundantes precipitaciones, originando sequías o inundaciones, respectivamente; y trayendo importantes pérdidas económicas.

En este ámbito, la importancia del riego es una de las variables que adquiere gran relevancia para la adaptación de la agricultura al cambio climático, colocando de relieve la necesidad de mejorar la eficiencia y la productividad de los diferentes usos del agua, entre las medidas necesarias para disminuir la vulnerabilidad a los eventos extremos que se producen con mayor frecuencia.

Los países integrantes de la Plataforma de Recursos Hídricos y Tecnología de Riego del PROCISUR, que ya han internalizado esta preocupación, enfrentaron la ejecución del presente proyecto, a través del cual se contribuye a conocer mejor el comportamiento de diferentes cultivos, al someterlos a condiciones variables de aportes de agua, no sólo para cuantificar los cambios en la productividad, sino también para generar las recomendaciones de manejo del riego que más se adapten a las condiciones de los sistemas productivos locales. Paralelamente y con un enfoque de cuencas, mediante el ajuste de modelos hidrológicos de respuesta, se buscó predecir las variaciones esperadas de la disponibilidad de agua a futuro; definir áreas de mayor o menor vulnerabilidad y/o donde será necesaria la aplicación de los manejos ajustados para adaptarse a tales cambios.

El proyecto se inició en mayo del 2009 y contó con la participación del consorcio integrado por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA, Chile), Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA, Uruguay), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, Argentina), Universidad Mayor de San Andrés (UMSA, Bolivia) y International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA, Siria). El objetivo del proyecto es contribuir al desarrollo de estrategias productivas que permitan aumentar la productividad del agua, recurso que será aún más crítico en muchas regiones, bajo los nuevos escenarios climáticos que se proyectan en las distintas zonas del Cono Sur de América, debido al efecto del cambio climático global. Dichas estrategias estuvieron enfocadas en dos ámbitos de acción probables: escasez hídrica (sequía) y exceso de pluviometría y/o aumento de la frecuencia de eventos extremos (inundaciones).



## Resultados

En el desarrollo del proyecto, se logró construir una línea base en las cuencas bajo estudio en cada país, de la disponibilidad de agua y su relación con los sistemas productivos e infraestructura de riego existente, pudiéndose realizar una caracterización de ellas. En total se estudiaron 10 cuencas: Río Limarí, Río Aconcagua, y Río Cachapoal en Chile; Valles de Río San Juan, Río Dulce y Río Quequén en Argentina; Arroyo Tala y Río San Juan en Uruguay y Río Keka y Río Porvenir en Bolivia.

En las cuencas en estudio, se establecieron ensayos que permitieron por una parte determinar las funciones de producción y estimar productividades del agua, y por otra definir estrategias de riego que permitan utilizar menores volúmenes de agua y/o mitiguen el efecto de anegamiento, todo esto con la finalidad de optimizar el uso del agua de riego y aumentar la productividad del agua de los cultivos. En este contexto, los ensayos establecidos fueron los siguientes:

- Chile: a.- Cuenca del Limarí: ensayos en vid de mesa y ensayos en vid pisquera. b.- Cuenca del Aconcagua: ensayos en paltos (Aguacate) y ensayos en vides de mesa. c.- Cuenca del Cachapoal, ensayos en cerezos. En cada cuenca los ensayos se localizaron en condiciones climáticas diferentes para tener la respuesta de los cultivos en un amplio rango de clima.
- Argentina: a.- Santiago del Estero: ensayos en soja, algodón y maíz; y b.- San Juan y Junín: ensayos en olivos.
- Uruguay: a.- Cuenca del arroyo Tala, en el norte del país, ensayos en pasturas; b.- Cuencas del Arroyo Pavón – Cufre y Río San Juan, en el sur, ensayos en papa y ensayos en olivos.
- Bolivia: a.- Valle del río Porvenir: ensayos en vid de mesa y tomate y b.- Cuenca del río Keka: ensayos en papa.

Se creó un programa de difusión, orientado a dar a conocer los alcances del proyecto a la comunidad. En dicho programa se incluyó el lanzamiento del proyecto, distribución de trípticos, implementación de página Web en la cual se encuentra toda la información de participación en congresos, simposios, seminarios y reuniones técnicas, así como los resultados del mismo. También se realizaron seminarios y días de campo en los cuales se han dado a conocer los resultados de los ensayos a la comunidad, conjuntamente con la distribución de material divulgativo. Están en proceso de elaboración publicaciones científicas, artículos divulgativos y la confección de un Manual de Estrategias de riego para los cultivos ensayados.

Al sistematizar la información generada, se ajustaron modelos de simulación oferta y demanda de agua, frente a diferentes escenarios climáticos, con el objetivo de contribuir a la generación de políticas de desarrollo y fomento de riego por parte de los organismos públicos y privados. En este sentido el proyecto pretende hacer una contribución al establecer criterios para predecir condiciones de mayor o menor déficit hídrico y señalar las estrategias posibles de implementar. Ello avalado por toda la información experimental que se obtuvo (ver Cuadro con indicadores del proyecto).

Una síntesis de los resultados obtenidos, en términos cuantitativos, se puede apreciar en el cuadro siguiente, específicamente en aquellos cultivos evaluados. Más antecedentes se pueden ver en Tabla de Indicadores del proyecto que se adjunta:

<b>Cultivo/Variiedad (Cuenca) (Chile)</b>	<b>Productividad del Agua (kg/m<sup>3</sup>) (*)</b>	
	<b>Testigo</b>	<b>Tratamiento restrictivo</b>
Vid de mesa/Crimson (Limarí)	3,76	5,44
Vid Pisquera/M. Rosada (Limarí)	5,52	6,35
Vid de Mesa/Flame Seedless (Aconcagua)	2,08	5,14
Vid de Mesa/Thompson Seedless (Aconcagua)	2,47	5,28
Cerezos (Cachapoal)	0,62	1,18

<b>Cultivo (Bolivia)</b>	<b>Productividad del Cultivo (kg/ha) (*)</b>	
	<b>Sin proyecto</b>	<b>Con Proyecto</b>
Producción de Papa	8.000	57.900
Producción de Tomate	35.000	106.900
Producción de Uva	20.000	60.900

<b>Cultivo (Uruguay)</b>	<b>Productividad del Cultivo (kg/ha) (*)</b>	
	<b>Sin proyecto</b>	<b>Con Proyecto</b>
Producción de forraje	7.500	11.000
Producción de aceite de oliva	650	1.000
Producción de papa	23.000	38.500

<b>Cultivo (Cuenca, Argentina)</b>	<b>Productividad del Agua (kg/m<sup>3</sup>) (*)</b>	
	<b>Sin proyecto</b>	<b>Con Proyecto</b>
Olivo (San Juan)	0,28	0,35 (**)
Olivo (Junín, Mendoza)	1,50	2,10
Algodón (Santiago del Estero)	0,33	0,57
Soja (Santiago del Estero)	0,46	0,65

(\*) Valores promedio (\*\*) se refiere a kg aceite/m<sup>3</sup>

## Productos concretos alcanzados

- Se logró caracterizar las 10 cuencas hidrográficas, desde el punto de vista de sus antecedentes de disponibilidad de agua, infraestructura de riego y potencialidad agrícola; como asimismo la inversión realizada en ellas.
- Se determinaron experimentalmente 20 funciones de producción de los cultivos más importantes en cada una de las cuencas seleccionadas. Ello permite establecer las variaciones de rendimiento respecto a diferentes niveles de restricción aplicada; como un aporte a enfrentar posibles períodos o escenarios de baja disponibilidad de agua.
- En cuanto a difusión, y como consecuencia del proyecto, se generaron diversas publicaciones de tipo divulgativo y científicas que dan cuenta de los resultados obtenidos. Ello se complementa con las abundantes actividades de extensión y transferencia tecnológica efectuada en cada uno de los países del consorcio.
- Finalmente, en términos de sistematización de la información, un producto importante logrado dice relación con la aplicación del modelo hidrológico SWAT para definir la oferta de agua de las cuencas en diferentes escenarios climáticos. Ello permite, con base científica predecir cuantitati-

vamente la disponibilidad de agua en la cuenca.



INDICADORES INFORME TÉCNICO FINAL  
PROYECTO N°: FTG-8042/08

"Evaluación de los cambios en la productividad del agua frente a diferentes escenarios climáticos, en distintas regiones del Cono Sur"

TABLA DE INDICADORES: Sobre la base de resultados de ensayos de campo y actividades , en los distintos países

No.	Indicador detalle	Unidad del Indicador	Valor antes del proyecto	Valor después del proyecto
<b>ARGENTINA</b>				
1	Rendimiento de Olivo (San Juan, Argentina)	kg/ha	7500	9.200
2	Rendimiento de Olivo (Junin, Mendoza, Argentina)	kg/pl	18	25.15
3	Rendimiento de Olivo (San Juan, Argentina)	kg aceite/ha	1180	1.400
4	Rendimiento de Olivo (Junin, Mendoza, Argentina)	kg aceite/pl	2.80	3.77
5	Rendimiento de Algodón (Santiago del Estero, Argentina)	kg/ha	2100	4.000
6	Rendimiento de Soja (Santiago del Estero, Argentina)	kg/ha	2000	3.000
7	Productividad del Agua en Olivo (San Juan, Argentina)	kg aceite/m <sup>3</sup>	0,28	0,35
8	Productividad del Agua en Olivo (Junin, Mendoza, Argentina)	kg/m <sup>3</sup>	1,5	2,1
9	Productividad del Agua en Algodón (Santiago del Estero, Argentina)	kg/m <sup>3</sup>	0,33	0,57
10	Productividad del Agua en Soja (Santiago del Estero, Argentina)	kg/m <sup>3</sup>	0,46	0,65
11	Funciones de producción obtenidas	Nº	0	4
12	Estrategias de riego deficitario (Olivo, Algodón, Soja, Maíz)	Nº	0	4
13	Superficie regada con nueva programación (Junin, Mendoza)	ha	0	450
14	Modelos de crecimiento de cultivos validados	Nº	0	1
15	Cuencas caracterizadas y modeladas	Nº	0	3
16	Número de agricultores informados	Nº	0	300
17	Participación en Congresos, Seminarios y otras actividades	Nº	0	9
18	Recursos Humanos Formados	Nº	0	9
<b>BOLIVIA</b>				
1	Rendimiento en Papa (Bolivia)	Kg/ha	8.000	57.900
2	Rendimiento en Tomate (Bolivia)	Kg/ha	35.000	106.900
3	Rendimiento en Uva (Bolivia)	Kg/ha	20.000	60.900
4	Agricultores capacitados (Bolivia)	Nº	0	500
5	Técnicos entrenados (Bolivia)	Nº	0	10
6	Cartillas elaboradas (Bolivia)	Nº	0	3
7	Artículos científicos elaborados (Bolivia)	Nº	0	4
8	Estrategias de riego deficitario (Bolivia)	Nº	0	6
9	Cuencas descritas (Bolivia)	Nº	0	2
10	Funciones de producción obtenidas (Bolivia)	Nº	0	3
11	Participación en Congresos, Seminarios y otras actividades (Bolivia)	Nº	0	6
12	Formación de estudiantes de grado y postgrado	Nº	0	7
<b>CHILE</b>				
1	Productividad del agua en Vid de mesa (Limarí, Chile/EI Peñon)	kg/m3	4,31	6,28
2	Productividad del agua en Vid de mesa (Limarí, Chile/Nueva Aurora)	kg/m3	3,20	4,59
3	Productividad del agua en Vid Pisquera (Limarí, Chile/Chilecito)	kg/m3	4,47	4,88
4	Productividad del agua en Vid Pisquera (Limarí, Chile/La Chimba)	kg/m3	6,56	7,81
5	Productividad del agua en Vid de Mesa (Aconcagua, Chile/Flame Seedless)	kg/m3	2,08	5,14
6	Productividad del agua en Vid de Mesa (Aconcagua, Chile/Thompson Seedless)	kg/m3	2,47	5,28
7	Productividad del agua en Cerezos (Cachapoal, Chile/La Compañía)	kg/m3	0,40	0,51
8	Productividad del agua en Cerezos (Cachapoal, Chile/EI Abra)	kg/m3	0,84	1,85
9	Número de agricultores informados y/o capacitados	Nº	0	200
10	Cuencas estudiadas y caracterizadas	Nº	0	3
11	Funciones de producción obtenidas	Nº	0	9
12	Participación en Congresos, Seminarios y otras actividades	Nº	0	7
<b>URUGUAY</b>				
1	Producción de forraje	kg MS /há	7.500	11.000
2	Producción de aceite de oliva (plantas jóvenes)	kg/ha	650	1.000
3	Producción de papa	kg/ha	23.000	38.500
4	Funciones de producción obtenidas	Nº	0	4
5	Profesionales capacitados en el uso del SWAT	Nº técnicos	2	6
6	Productores informados sobre el manejo de cuencas por el proyecto	Nº asistentes	5	53
7	Cuencas o microcuencas estudiadas en Uruguay	Nº	15	18
8	Formación de estudiantes de grado y posgrado	Nº personas	4	9
9	Publicaciones científicas y Divulgativas para técnicos y productores	Nº de publicaciones	7	11



## Conclusiones

En función de lo planteado anteriormente, y luego de 3 años de trabajo coordinado entre los cuatro países, las principales conclusiones que se pueden señalar son las siguientes:

- ✓ El enfoque de cuencas que se le dio al proyecto, en cada uno de los países integrantes del consorcio, permitió rescatar y sistematizar abundante información de distinto tipo que permitió configurar las características, potencialidades y vulnerabilidades de cada una de ellas, respecto del recurso hídrico.
- ✓ Los ensayos de campo, permitieron obtener información respecto de la respuesta de los diferentes cultivos a condiciones restrictivas de agua; y de esta manera establecer las funciones de producción y las condiciones mínimas de productividad en escenarios de posibles sequías. Para cada estrategia de riego ensayada y resultado obtenido se calcularon las productividades del agua ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ), observándose los cambios positivos que se generan; pero muchas veces contrapuestos con las productividades de la tierra, expresadas como  $\text{Kg}/\text{ha}$ .
- ✓ En aspectos de difusión, el proyecto privilegió actividades de relación directa con agricultores y profesionales interesados en la temática; marcando una señal en cuanto al uso de un indicador como Productividad del Agua (PA), que debería priorizarse en condiciones de restricción hídrica y de mayor competencia con otros usos .
- ✓ Al sistematizar la información, se visualiza que es imprescindible considerar como unidad de trabajo la Cuenca Hidrográfica, dado que permite establecer un manejo y estrategias integrales que comprometen a todos los usuarios.
- ✓ Como en todo proyecto de esta índole, el trabajo de investigación construye soluciones y al mismo tiempo descubre vacíos de información y plantea nuevas dudas e hipótesis que seguramente enriquecerán los futuros trabajos de las instituciones involucradas en el proyecto.

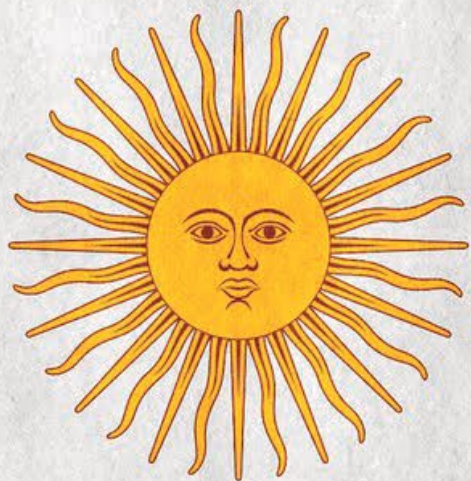
Como lecciones aprendidas es posible señalar, que muchas temáticas son comunes a nuestros países y es más fácil y rápido buscar resultados y soluciones conjuntamente a través de un consorcio como el logrado en este proyecto, que permite sumar visiones y consolidar redes de trabajo que perdurarán seguramente más allá del proyecto. Ello no deja de presentar dificultades, especialmente cuando cada país tiene formas diferentes de administración de recursos, pero que son subsanables teniéndose la flexibilidad y orientación que otorga FONTAGRO.

Como actividades destacadas pueden mencionarse: el trabajo en talleres de los integrantes del equipo de trabajo de los diferentes países, con a lo menos una frecuencia anual; lo que permite ir consensuando metodologías e interpretación de resultados

Otro aspecto o lección aprendida o confirmada es cuánto ayuda la ejecución conjunta de un proyecto de esta naturaleza a la consolidación y/o conformación de redes de cooperación entre nuestros países.

Finalmente debe mencionarse la importancia de fijar compromisos por país, dentro de la búsqueda de soluciones a un problema general.

Para mayor información sobre el proyecto, visitar el siguiente enlace: [www.riegoconosur.cl](http://www.riegoconosur.cl)



## Resumen Extendido Argentina

“Evaluación de los cambios en la productividad del agua, frente a diferentes escenarios climáticos, en distintas regiones del Cono Sur”

Código: FTG-8042/08



## EQUIPO DE TRABAJO

1. INTRODUCCIÓN
2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS: LÍNEA BASE
  - 2.1. Situación actual de los sistemas productivos
  - 2.2. Situación actual de la dotación y demanda de agua en las cuencas seleccionadas.
  - 2.3. Caracterización de la infraestructura de riego existente en las cuencas.
3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESTRATEGIAS DE RIEGO (ENSAYOS DE CAMPO)
  - 3.1. Metodología experimental
  - 3.2. Resultados y discusión
    - 3.2.1. Funciones de producción de cultivos seleccionados en condiciones de estrés hídrico
    - 3.2.2. Estrategias de riego deficitario controlado (RDC)
    - 3.2.3. Indicadores de productividad del agua
  - 3.3. Conclusiones
4. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DISPONIBILIDAD DE AGUA
  - 4.1. Selección del modelo hidrológico
  - 4.2. El Modelo SWAT
    - 4.2.1. Descripción del modelo
    - 4.2.2. Requerimientos de información
  - 4.3. Definición de escenarios climáticos.
  - 4.4. Modelación hidrológica de cuencas
    - 4.4.1. Cuenca del río Salí Dulce
      - 4.4.1.1. Información utilizada en el modelamiento
      - 4.4.1.2. Calibración, validación y resultados
    - 4.4.2. Cuenca del río Quequén Grande
      - 4.4.2.1. Información utilizada en el modelamiento
      - 4.4.2.2. Calibración, validación y resultados
    - 4.4.3. Cuenca del río San Juan
      - 4.4.3.1. Información utilizada en el modelamiento
      - 4.4.3.2. Calibración, validación y resultados
  - 4.5. Capacitación de profesionales en el uso de los modelos
  - 4.6. Conclusiones
5. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS
  - 5.1. Variación de la productividad del agua en los cultivos
  - 5.2. Estimación de la variación de la productividad del agua a nivel de cuenca
  - 5.3. Estrategias para el manejo del agua bajo escenarios climáticos probables
  - 5.4. Conclusiones
6. PROGRAMAS DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO EN ARGENTINA
  - 6.1. Presentación en Congresos, Seminarios, Talleres, Charlas Técnicas y Días de Campo
  - 6.2. Participación en Seminario Internacional
  - 6.3. Manual de estrategias de manejo del agua de riego para los cultivos seleccionados
  - 6.4. Publicaciones científicas
  - 6.5. Publicaciones divulgativas
7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES





## **EQUIPO DE TRABAJO (INVESTIGADORES Y ASESORES)**

### **Estación Experimental Santiago del Estero**

Ing. Agr., Dr. Daniel Prieto  
Ing. Agr., M. Sc. Gabriel Angella  
Ing. Agr., M. Sc. Salvador Prieto  
Ing. Howard van Meer  
Ing. Agr., M. Sc. Cristina Angueira  
Estudiante de grado: Clara Bertón  
Estudiante de grado: Anabel Lozano  
Estudiante de grado: Antonio Coria

### **Estación Experimental San Juan**

Ing. Agr. Facundo Vita Serman  
Ing. Agr. Alfredo Olguín  
Ing. Química Amalia Carelli  
Ing. Agr. Juan Pablo Turchetti

### **Estación Experimental Junín**

Ing. Agr., M. Sc. Carlos Puertas  
Ing. Agr., M. Sc. Eduardo Trentacoste  
Ing. Agr., Daiana Mateo  
Ing. Agr., Bruno Musale  
Ing. Agr. Víctor Novello

### **Instituto de Clima y Agua – Castelar, Buenos Aires**

Ing. Agr., M. Sc. María Victoria Feler  
Ing. Agr., Ph. D. Pablo Mercuri  
Lic. Néstor Barrionuevo  
Ing. Agr., Ph. D. Graciela Magrín (Consultora)  
Ing. Agr., M. Sc. Gabriel Vázquez Amábile (Consultor externo)

### **Asesores internacionales**

Theib Oweis, Dr. ICARDA Siria  
Elías Fereres, Dr. IAS-CSIC España  
Joan Girona, Dr. IRTA España



## 1. INTRODUCCIÓN.

La agricultura irrigada enfrenta el desafío de contribuir a uno de los objetivos del milenio más relevante como reducir la pobreza y el hambre, produciendo más alimentos, fibras y biocombustibles para satisfacer la demanda mundial creciente. Un segundo desafío es que la mayor producción debe lograrse reduciendo o manteniendo el volumen de agua utilizada y evitando su contaminación, para lograr la tan ansiada sustentabilidad de la producción. Ambos desafíos deben enfrentarse en el marco de un proceso de Cambio Climático que agregan incertidumbre sobre la disponibilidad del recurso agua en el futuro.

Para enfrentar ambos desafíos en ese contexto de incertidumbre y variabilidad climática, la agricultura irrigada, el uso que consume según las regiones entre un 70 y 90 % del agua azul utilizada, debe necesariamente mejorar su **eficiencia** y su **productividad**.

Mientras la ingeniería dura es la responsable de mejorar la eficiencia de captación, conducción y aplicación, el complejo componente agronómico de la agricultura de riego es el actor principal para lograr la mayor productividad.

Con este marco el proyecto tuvo como sus grandes objetivos a diferentes escalas, estudiar los cambios en la disponibilidad de los recursos hídricos producto de posibles escenarios climáticos a nivel de cuenca y evaluar formas de manejo del riego en función de la productividad del agua y de la tierra a nivel de cultivo para construir las mejores estrategias de manejo del recurso hídrico ante los esperados escenarios.

La complejidad de las situaciones de nuestros países por su extensión, variabilidad climática y condiciones socio-económicas hizo necesario ser selectivo en las cuencas y producciones estudiadas. En Argentina, se seleccionaron tres cuencas hidrográficas que se supuso representativas de posibles situaciones dispares en función de los grandes escenarios climáticos previstos por los trabajos del IPCC.

La Cuenca del Río San Juan, una típica cuenca de la región árida del oeste del país, con régimen nival dependiente de los glaciares andinos de altura para la cual la mayoría de los modelos climáticos proyectan una disminución de la disponibilidad de agua, y en la cual la agricultura es totalmente dependiente de la irrigación.

La cuenca del Río Salí-Dulce, que en su mayor parte tiene características semiáridas, representa una situación intermedia en relación a sus condiciones agroclimáticas y a las predicciones de los efectos del Cambio Climático. La agricultura irrigada en la Provincia de Santiago del Estero, con una agricultura de invierno totalmente dependiente del riego y otra de verano donde la irrigación se vuelve suplementaria fue el área de estudio.

La cuenca del Río Quequén Grande en la provincia de Buenos Aires, ubicada la región húmeda en la cual se pronostica un aumento de los recursos hídricos y de la frecuencia de eventos extremos. La irrigación en esta cuenca es todavía incipiente, pero resultó de interés porque de producirse los pronósticos climáticos de largo plazo el riego suplementario, hoy muy importante para la economía argentina, se iría desplazando hacia estas regiones, tendencia que ya se esboza en cuencas vecinas. En relación a los cultivos, se seleccionaron el Olivo en la cuenca del Río San Juan, segundo rubro productivo de la región por su gran crecimiento de los últimos años, por existir vacíos de información y por las posibilidades de extender los resultados hacia otras las áreas productivas de La Rioja, Catamarca y Mendoza.



En Santiago del Estero, se trabajó en dos cultivos tradicionales de la zona, el algodón, y el maíz y en soja como nueva alternativa. En los primeros se han generado vacíos de información por cambios recientes en la conducción de los cultivos y la potencial sustitución de sistemas de riego, mientras que la soja se seleccionó por su expansión en todo el país. El enfoque dado a las investigaciones tuvo como objetivo generar recomendaciones aplicables a las condiciones de riego suplementario e incluso en condiciones de secano de las regiones semiáridas, entre ellas la Cuenca del Río Quequén Grande, o la agricultura de secano de las provincias del noroeste argentino.

Participaron de este proyecto cuatro unidades del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), la EEA Santiago del Estero, la EEA San Juan, la EEA Junín de la provincia de Mendoza que complementó la información de San Juan y el Instituto de Clima y Agua del Centro de Investigación de Recursos Naturales de Castelar en la Provincia de Buenos Aires.

Se presentan en este informe, en forma resumida, los principales resultados y conclusiones del proyecto. La información generada ha sido realmente muy numerosa y seguramente lo procesado y analizado hasta el momento no exprese todos los productos que en beneficio de nuestras sociedades ha generado el proyecto.

Por lo anterior, complementando este informe se elaborará un documento in extenso, con toda la información; y seguramente a los largo de los próximos años, fuera del marco temporal del proyecto, se generará nuevas conclusiones y se abrirán nuevas líneas de investigación en función de interrogantes surgidas en este proyecto, enriqueciendo el accionar de nuestras instituciones en la región.

## **2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS: LÍNEA BASE**

### **2.1. Situación actual de los sistemas productivos.**

#### **2.1.1. Cuenca del Río San Juan**

Prácticamente la totalidad de la agricultura de esta cuenca se realiza bajo riego integral. Del total de 5.962 Explotación Agropecuarias (EAP) de la provincia, 75% producen bajo riego.

La ocupación del suelo agrícola es dominada por la vid, orientada a vinos y uvas de mesa. Dentro de la frutícola que le sigue, es claramente dominante la olivicultura dirigida a la producción de aceitunas aceiteras. En la actividad hortícola, diversificada tercer rubro productivo en importancia, predominan las Aliáceas, las hortalizas de Hoja, las Cucurbitáceas y las Solanáceas en ese orden. La provincia es el principal productor de espárrago.

El crecimiento de la actividad olivícola en San Juan como La Rioja y Catamarca, es de reciente expansión, incentivada por la aplicación de Regímenes de Promoción bajo la Ley 22.973 (conocida como de Diferimientos Impositivos) y modificatorias.

En relación a los sistemas de producción, la totalidad son puramente agrícolas y entre ellos predomina la producción vitícola tanto por el número de EAPs como por la superficie ocupada. El tamaño medio de las EAPs vitícolas es de 8, 26 y 19 ha para las dedicadas a uvas comunes, uvas finas y uvas de mesa y pasa respectivamente. En el caso de la producción olivícola el tamaño medio de las fincas se incrementa a 92 y 43 ha para la producción de aceituna aceitera y conservera, respectivamente (INDEC, CNA, 2002).

Las empresas familiares constituyen el 43% de las 4.780 censadas en el año 2002 (CNA, 2002). De estas, un 25% tienen además personal permanente.

#### **2.1.2. Cuenca de Río Salí-Dulce**

El análisis de los sistemas productivos se concentra en el sistema de riego del Río Dulce en la provincia de Santiago del Estero, que se abastece del agua almacenada por el Dique Frontal Río Hondo, ubicado en la parte media del curso y punto de estudio de la modelación hidrológica del proyecto en esta cuenca.

Los sistemas productivos son mayormente agrícolas puros, y en segundo lugar mixtos (agrícola – ganaderos). Estos últimos se desarrollan en las unidades económicas de mayor tamaño.

Prácticamente la totalidad de los cultivos irrigados en el área del Proyecto del Río Dulce son anuales con la única excepción del cultivo pluriannual de la alfalfa. Esta característica hace que si bien el tipo de cultivo permanece más o menos invariable, la superficie en hectáreas se modifica, muchas veces anualmente. Las hortalizas en su conjunto, algodón alfalfa, maíz y recientemente soja son los principales cultivos.

Coexisten en el área unidades productivos familiares y no familiares, pero no hay una diferenciación de tipo de cultivo, sino en la superficie cultivada.

### 2.1.3. Cuenca del Río Quequén Grande

No se dispone de información muy detallada de esta cuenca en cuanto a ocupación de suelo y sistemas productivos. Como en todo el país la última información oficial data de 2002 y la misma está disponible públicamente por departamento.

En base a un pro-rateo de la información de los partidos en función de su superficie en la cuenca, se estima que en el año 2002, había en la cuenca aproximadamente 1.035 EAP.

La ocupación del suelo, según Vázquez, et al, 2012 era en el 2008 de 175.000 ha dedicadas a la agricultura, y 330.000 ha pasturas y pastizales de uso ganadero por un stock ganadero aproximado a las 450.000 cabezas vacunas, 43.000 ovinas y unos 3.000 cerdos existente en el año 2002 (CNA, 2002).

En el área de la cuenca se produce desde hace algunos años un fuerte crecimiento de la agricultura, en detrimento de las áreas de pastizales de las llanuras primeras y de las lomas al final del período.

La mayoría de los sistemas productivos del área son ganaderos-agrícolas, existiendo sistemas ganaderos puros y en menor medida agrícola puros.

## 2.2. Situación actual de la dotación y demanda de agua en las cuencas.

### 2.2.1. Cuenca del Río San Juan

La precipitación en los valles irrigados por el Río San Juan varía de 100 a 200 mm/año.

La demanda media de agua para el sector agrícola se estima en 1.400 hm<sup>3</sup>/año relativamente muy cercano a los aportes medios del Río San Juan 2050 hm<sup>3</sup>/año, Dada la variabilidad de estos aportes con frecuencia estos no son suficientes para cubrir la demanda. Por ejemplo el aporte medio anual durante el quinquenio 1967-1972 fue de 769 hm<sup>3</sup>/año, cercano al 50% de la demanda (Salvioli, 2012).

La demanda de riego es variable en año a año y a lo largo de año, siendo máxima en los meses de diciembre/enero y mínimo en la época invernal. Esta circunstancia permite aprovechar los meses de junio y julio para la “monda” (limpieza de canales) y el mantenimiento de las compuertas del sistema de riego.

Existen según Salvioli, (2012), 4.453 pozos de agua subterránea para uso agrícola y de estos sólo unas 700 perforaciones están activas, la mayoría de ellas para reforzar las dotaciones de riego superficial que distribuye el sistema.

El costo del agua de riego tiene 2 grandes componentes, el *Canon* fijado anualmente por hectáreas con derecho a riego y la *Tasa de retributiva* de los servicios hídricos que constituye el pago por el servicio de provisión de agua y de acuerdo al Código de Agua debe cubrir la recuperación de los costos de operación, mantenimiento y gestión.

## 2.2.2. Cuenca de Río Salí-Dulce

La precipitación en la Cuenca del Río Salí-Dulce varía desde casi 2.000 mm/año en su cabecera hasta los 500 mm/año en la llanura central de Santiago del Estero donde se desarrolla el área de riego bajo estudio.

El aporte medio del Río al Dique Río Hondo durante el período 1967/68 – 2010/11 fue de 4.332 hm<sup>3</sup>/año, mientras que el volumen medio derivado al sistema de riego en igual período fue de 832 hm<sup>3</sup>/año, con un porcentaje medio de los aportes para riego del 26%. Únicamente en los dos años hidrológicos de mínimos aportes de la serie, 1971/1972 y 1988/89, el % de derivación superó en un 15 y 20% los aportes, lo que demuestra que el sistema tiene posibilidades de expandirse, si se realizan nuevas obras de regulación.

A nivel mensual no existe correspondencia entre los aportes y las demandas. Mientras los aportes se concentran en los meses de Enero a Marzo, la derivación de agua para riego tiene su máximo en los meses de agosto y setiembre, poniendo en claro la importancia de la regulación que ejerce el Dique Río Hondo, garantizando el suministro de agua de riego muy por encima de los aportes durante los meses de Agosto a Noviembre.

La distribución real del uso de agua de riego, con su máximo en agosto-setiembre no se corresponde con la distribución mensual de los requerimientos de riego, cuyo máximo es de Noviembre a Enero, sino que responde a la práctica de los agricultores de realizar uno o hasta dos fuertes riegos de pre siembra y confiar en los aportes de la lluvia en verano.

Únicamente en un sector cercano al Río se dispone de agua subterránea pero esta no es muy utilizada. Recién en los últimos años, unos pocos productores que han introducido sistema de riego localizado hacen uso de agua de esta fuente.

El Canon de riego se calcula en base al costo del servicio de provisión de agua, variando en función de la superficie con derecho de riego. El porcentaje de recaudación se ha mantenido bajo a lo largo de los años, proviniendo del Estado Provincial la mayor parte de los fondos para la operación y el mantenimiento.

## 2.2.3. Cuenca de Río Quequén Grande

Como se mencionó el riego suplementario no es actualmente una práctica habitual en los sistemas productivos de esta cuenca pero siendo este tipo de riego el que más ha crecido en el país en los últimos 10 años y notándose en los 4 últimos, un claro desplazamiento de este hacia el sur, se prevé que el área bajo riego aumente en los próximos años.

El Censo Agropecuario 2002, indica que la superficie bajo riego en la cuenca era del orden de 4.050 ha, siendo un 89% de esa superficie (3.590 ha) regadas por aspersión con equipos de pivot central (37 equipos en funcionamiento en el año 2002). La restante superficie se riega por goteo 430 ha y por superficie 40 ha.

El riego por aspersión se concentra en los cereales extensivos, principalmente maíz y en menor medida trigo, mientras que el goteo y la pequeña área de superficie se aplica en hortalizas y principalmente en los “cinturones verdes” de las ciudades.



## 2.3. Caracterización de la infraestructura de riego existe en las cuencas

### 2.3.1. Cuenca del Río San Juan

En el Km 58 desde el origen del río San Juan se encuentra el dique Caracoles, con un volumen de embalse de 569 hm<sup>3</sup>. A 19 km aguas debajo de este, se ubica el azud Punta Negra, donde se están las tomas de riego para los valles de Ullum y Zonda, con 5.641 ha de concesiones de agua para riego. En esta ubicación se está construyendo el embalse Punta Negra, de 504 Hm<sup>3</sup> de capacidad. Aguas abajo a 15 km, del anterior, está el embalse de Ullum, que funciona desde 1980, con capacidad de 440 Hm<sup>3</sup> de almacenamiento original, hoy reducida en un 15% a causa del aporte de material sólido que arrastra el río. Este sistema de embalses con una capacidad conjunta de 1.447 hm<sup>3</sup> regula el Río San Juan, lo que posibilita distribuir la entrega de agua para riego con un mayor arreglo a la demanda (Vicente y Miranda, 2012).

Para su distribución, el agua derivada del embalse de Ullum toma carga en el dique nivelador José Ignacio de La Roza y se canaliza por el canal General Matriz hasta el partidor San Emiliano, desde donde nace la red de riego para el valle de Tulum, en tres canales matrices, del Norte o Quiroga, del Centro o Ciudad y del Sur o Céspedes. A partir de ellos se ramifica el sistema en canales secundarios, terciarios y “ramos” comuneros. Estos últimos son competencia de los regantes.

El área total concesionada es de 100.759 ha, permanente y 19.145 accidental. La longitud de canales es de 867 km revestidos y 326 km en tierra. Además existen 1.119 km de drenajes y 184 km de desagües.

Como complemento del agua derivada en Ullum, la red de riego del valle se refuerza con el aporte de aguas provenientes de los acuíferos subterráneos a través de bombeo, del encauzamiento de torrentes estacionales y la recuperación de drenajes. Además, muchas propiedades cuentan con pozos desde los que bombean directamente a las acequias de riego internas de las fincas.

### 2.3.2. Cuenca del Río Dulce

El sistema de Riego del Río Dulce se inicia con el Dique Frontal Río Hondo con una capacidad de 1.745 hm<sup>3</sup>. El agua almacenada en el dique que tiene una superficie máxima de 29.670 ha, es devuelta al río y aproximadamente unos 60 km aguas abajo el Dique Derivador Los Quiroga le da la carga para ingresar al sistema de canales.

La red de riego consta de un canal matriz, 8 canales secundarios y numerosos canales terciarios hasta llegar a las acequias comuneras, que bajo la responsabilidad de los regantes distribuye el agua a las fincas.

La red cuenta con 60,4 km de canales revestidos y 169,4 km de canales de tierra. El canal Matriz tiene una capacidad de 100 m<sup>3</sup>/s para el riego de 120.000 ha. Los canales secundarios varían en su capacidad entre 20 y 2 m<sup>3</sup>/s de acuerdo al área servida

### 2.3.3. Cuenca del Río Quequén Grande

Como se mencionó el área regada en esta cuenca de la Provincia de Buenos Aires es todavía baja



y fundamentalmente por aspersión, teniendo como fuente el agua subterránea.

Se estima que la lámina media anual aplicada en riego suplementario es de 150 a 200 mm/año, lo que hace una extracción anual del orden de los 6 a 7,5 Hm<sup>3</sup>/año.

La explotación del agua subterránea está regulada por la Autoridad de Agua de la Provincia, siendo obligatorio el registro de los pozos. Sin embargo no es hasta el momento una práctica corriente realizarlo.

### 3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESTRATEGIAS DE RIEGO (ENSAYOS DE CAMPO)

#### 3.1. Metodología experimental

Para la investigación de las estrategias para un uso eficiente del recurso hídrico en riego en las cuencas, se realizaron ensayos en las Estaciones Experimentales del INTA, en Santiago del Estero, San Juan y Junín.

En Santiago del Estero, se trabajó en los cultivos de Soja, Algodón y Maíz, y en San Juan y Junín en Olivo. La elección de los cultivos respondió a dos criterios básicos: ser relevantes para la región y/o a nivel nacional y 2 carecer o requerirse confirmación de información validada a nivel local.

Todos los ensayos fueron de Riego Deficitario Controlado, pero mientras en Junín y Santiago del Estero, el déficit controlado se impuso sostenidamente durante todo el ciclo, en San Juan se impuso en momentos estratégicos del ciclo del cultivo.

Con algunas variantes los ensayos tuvieron dos objetivos comunes:

1. Determinar la función de producción y el requerimiento hídrico del cultivo.
2. Determinar el efecto de los diferentes tratamientos de riego sobre: el crecimiento, el rendimiento y sus componentes, la calidad del producto y la productividad del agua.

En Junin el ensayo se llevó a cabo en una parcela comercial implantada en alta densidad (555 plantas ha<sup>-1</sup>). Se evaluaron 5 tratamientos de riego correspondientes a diferentes tasas de la evapotranspiración del cultivo (125%, 100%, 75%, 50% y 35% de la ETc) en forma sostenida en el ciclo.

Sobre las plantas se evaluó largo de brotes, área de sección transversal de tronco, volumen de copa y fracción de radiación solar interceptada. Se monitoreó el estado hídrico de suelo por el método gravimétrico y el estado hídrico de planta a través del potencial hídrico de tallo. Para el análisis del rendimiento de aceitunas por planta se realizaron 2 muestreos, en abril simulando una cosecha de aceitunas verdes y en mayo cuando los frutos ya habían alcanzado el mayor contenido de aceite para su extracción. Se determinó el peso medio de fruto, relación pulpa/carozo, contenido de materia grasa y humedad, y el rendimiento total de aceitunas por planta en el segundo muestreo.

En el aceite se analizan índices clásicos de calidad (acidez e índice de peróxidos) además del contenido de polifenoles totales, estabilidad oxidativa y perfil de ácidos grasos.

En San Juan se ensayó en un olivar intensivo de seis años de edad de la cv. Arbequina, con un marco de plantación de 6X2m, regado por goteo con dos emisores por planta (4 l.h<sup>-1</sup> cada uno) en el campo de la Estación Experimental Agropecuaria INTA en San Juan.

Se evaluaron tratamientos de Riego Deficitario Controlado (RDI o RDC): (T1) tratamiento sin restricción como control; (T2) RDI desde el inicio del endurecimiento del carozo hasta el viraje de verde brillante a opaco (periodo de endurecimiento de carozo) y (T3) RDI desde cuaje del fruto hasta cosecha. En T2 y T3 el déficit hídrico resultó de reducir un 30% del agua disponible en el suelo a Capacidad de Campo.

El control de las estrategias de riego se realizó en base a la programación del CPBM, (Capraro et. al., 2011) donde se medía continuamente la humedad con un sensor capacitivo (FDR) a 30 cm de

profundidad, en la zona de máxima densidad de raíces. Con una sonda Divinner, Sentek, se evaluó el contenido y variación de todo el perfil de suelo.

Se midió el potencial hídrico de hoja al mediodía en hoja tapada y sin destapar entre las 12:30 y 15:00 hr y el potencial hídrico ( $\Psi_{\text{hoja}}$ ) de pre-amanecer usando una cámara de presión (Scholander et al., 1965). La conductancia estomática y la fotosíntesis se evaluaron con un equipo ADC LC Pro. Las mediciones se realizaron en forma quincenal.

El momento de cosecha de cada tratamiento se decidió mediante determinaciones semanales del porcentaje de materia grasa en base seca (Soxlet) durante la fase 3 de crecimiento del fruto, considerando el momento oportuno cuando el porcentaje de aceite en fruta se hace constante durante 2 análisis sucesivos. En cada muestreo además se evaluó el índice de madurez (IM), peso y volumen de 50 frutos.

A cosecha se midió la producción de aceitunas por planta y sobre una submuestra se determinó el número de frutos, peso y volumen medio de fruto, contenido de materia grasa y humedad. A partir de otra submuestra se determinó el rendimiento industrial de aceite. La cantidad de agua aplicada con el riego se midió con caudalímetros. La productividad del agua se expresó como Kg de aceite.  $\text{Ha}^{-1} \cdot \text{m}^3$  aplicados.

De la fruta de cada parcela se extrajo el aceite de una muestra representativa de 25 kg utilizando una elaboradora Spremlive, Oliomio. En el aceite obtenido se evaluó el Índice de Estabilidad Oxidativa (OSI), composición fenólica, ácidos grasos y tocoferoles.

En Santiago del Estero los experimentos, con un diseño en bloques completamente aleatorizados se realizaron en los cultivos anuales de algodón soja y maíz en el Campo Experimental La María, de la EEA Santiago del Estero.

El suelo pertenece a la serie La María, clasificado como Haplustol torriorthentico, moderadamente fértil, bien drenados y moderadamente alcalino en profundidad.

En cada experimento y cultivo, se evaluaron 5 tratamientos de riego deficitario controlado (RDC) o regímenes hídricos (RH) que consistieron en la reposición del 100 (T100%,), 75 (T75%,), 50 (T50%,), 25% (T25%,) y 0% (T0%, sin riego) de la evapotranspiración del cultivo (Allen, et al; 1998). La lámina de riego para el tratamiento T100% se calculó cada 7 días utilizando la Evapotranspiración de Referencia calculada por el método de Penman-Monteith (Allen, et al; 1998) y usando los kc es el coeficiente de cultivo del citado autor.

En algodón la distancia entre surcos fue de 0,5 m, la densidad de 240.000 plantas. $\text{ha}^{-1}$  (12 plantas metro lineal<sup>-1</sup>). El material biológico empleado fue GUAZUNCHO 2 INTA. En soja la distancia entre surcos fue de 0.5 m, la densidad 350.000 plantas. $\text{ha}^{-1}$  (17.5 plantas metro lineal<sup>-1</sup>). El material biológico empleado DM 8002 RR. En maíz, la distancia entre surcos fue de 0.5 m, la densidad de 80.000 plantas  $\text{ha}^{-1}$  (4 plantas metro lineal<sup>-1</sup>) y el material biológico Dow MASS 636.

Los datos meteorológicos se obtuvieron de una estación automática (Vantage Pro2, Davis Instrument Corp., Hayward, California) ubicada a 350 metros de distancia del sitio de los experimentos.

El contenido de agua se monitoreo semanalmente desde la siembra hasta los 2.30 metros de profundidad con sonda de neutrones (Troxler 4301) en 11 intervalos: 0-30, 30-45, 45-60, 60-75, 75-90, 90-105, 105-125, 125-150, 150-175, 175-200 y 200-230 centímetros.

Durante el desarrollo del cultivo se registraron los eventos fenológicos más relevantes,, se realizaron mediciones de materia seca total y particionada y del área foliar en diferentes momentos según el cultivo en un área de 0.5 m<sup>2</sup> (0.5 m lineales de 2 surcos contiguos). Se determinó la altura y número de nudos por planta en el tallo principal en los 3 cultivos en cada momento de muestreo para determinar la biomasa aérea.

El rendimiento se determinó a partir de la cosecha de 8.m<sup>2</sup> (8 m lineales en 2 surcos contiguos) en los tres cultivos. En algodón sobre una submuestra de 1.m<sup>2</sup> (1 m lineal en 2 surcos contiguos) se determinó el número de capullos.planta<sup>-1</sup> y el peso promedio del capullo. En soja y maíz se determinó el número de plantas.m<sup>-2</sup>, número de semillas.planta<sup>-1</sup> y peso de 1000 granos.

Para comparar el efecto de los tratamientos sobre las variables en estudio se hizo análisis de la varianza (ANOVA) y se estimó la significancia de la diferencia de medias con el test de Tukey (InfoStat, 2008).

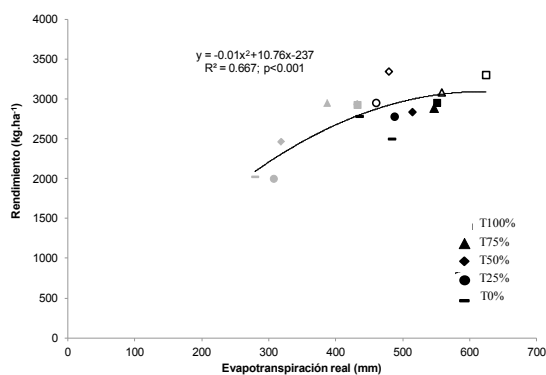
## 3.2. Resultados y Discusión

### 3.2.1.Funciones de producción de cultivos seleccionados en condiciones de estrés hídrico.

#### a. Soja

El ajuste de las funciones de producción se basa en los resultados de las campañas agrícolas 2010/2011 y 2011/2012. La primera, se sembró el 13 de diciembre de 2010 (Ambiente 1), la segunda se sembró en 2 fechas, el 22 de diciembre de 2011 (Ambiente 2) y 25 de enero de 2012 (Ambiente 3).

A través de ambientes, el rendimiento se relacionó significativa ( $p < 0.001$ ) y positivamente con la evapotranspiración real, ETr (Figura 1). La relación entre ambas variables fue descrita por una función polinómica de segunda grado, que se indica en la figura.

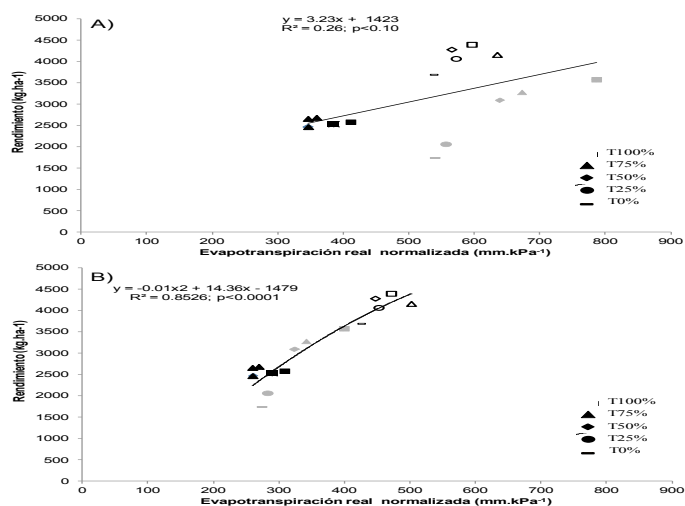


**Figura 1.** Relación entre el rendimiento y la evapotranspiración real en soja a través de los diferentes regímenes hídricos y ambientes (Ambiente 1, símbolos negros; Ambiente 2, símbolos vacíos y Ambiente 3, símbolos grises).

#### b. Algodón

En algodón, el ajuste de la función de producción se basó en los resultados de las campañas agrícola-

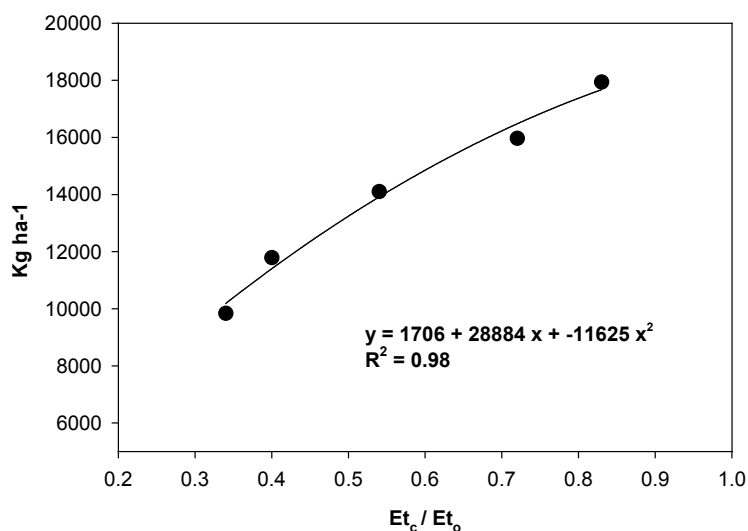
las 2009/2010 (Ambiente 1), 2010/2011 (Ambiente 2), 2011/2012 (Ambiente 3). En las dos primeras campañas, el algodón se sembró en diciembre (23/12/2009 y 7/12/2009 respectivamente), mientras que en el tercer año se sembró en octubre (25/10/2011). Independientemente de las diferencias en la fecha de siembra entre campañas, la duración total del ciclo (días entre siembra y cosecha) fue similar entre experimentos (148, 153 y 150 días en los experimentos 1, 2 y 3, respectivamente). Inicialmente, no se obtuvo una buena relación entre el rendimiento y la ETr pero como esta relación depende de la magnitud del déficit de presión de vapor (DPV, Steduto et al. 2007), se normalizó la transpiración con el DPV según el método propuesto por Tanner y Sinclair (1983), encontrándose una relación significativa ( $p < 0.0001$ ) y positiva entre el rendimiento y la ETr normalizada (Figura. 2).



**Figura. 2.** Relación entre el rendimiento y la evapotranspiración real normalizada con el déficit de presión de vapor en algodón a través de los diferentes regímenes hídricos y ambientes (Ambiente 1, símbolos negros; Ambiente 2, vacíos y Ambiente 3, grises).

### *c. Olivo*

El ajuste de la función de producción para este cultivo se realizó en base a los ensayos de Junín. El rendimiento de fruto a nivel de superficie presentó una respuesta de segundo orden al aumento de la lámina de riego, alcanzando los máximos rendimientos con riegos correspondientes a valores de  $ET_c / ET_o$  superiores a 0,7 (Figura 3).



**Figura 3.** Producción de frutos a nivel de superficie (kg ha<sup>-1</sup>) promedio para los tres ciclos de estudio en relación al coeficiente  $E_t_c / E_t_o$  de los distintos tratamientos de riego. NOTA: SI ES POSIBLE REAHACER FIGURA INDICANDO EN EJE X LOS VALORES DE  $E_t_c$ ; O BIEN % DE  $E_t_c$ .

### 3.2.2. Estrategias de riego deficitario controlado.

#### a. Soja

En los dos primeros ambientes, sembrados en fecha óptima, la duración del ciclo del cultivo fue similar. Mientras que en el ambiente 3, como consecuencia del atraso en la fecha de siembra y exposición del cultivo a un fotoperiodo menor, el ciclo total se redujo un 20%.

Las condiciones climáticas durante el ciclo del cultivo, variaron entre ambientes. En los dos primeros ensayos, la evapotranspiración de referencia ( $E_{T_o}$ ) fue similar pero en el Ambiente 2, la precipitación efectiva total fue 35% inferior, por lo que las necesidades de riego promedio fueron superiores. En el Ambiente 3, la  $E_{T_o}$  promedio disminuyó como consecuencia del retraso en la fecha de siembra y ubicación del ciclo hacia la salida del verano; mientras que la  $E_{T_o}$  total por la menor duración del ciclo del cultivo.

A través de ambientes, la  $E_{T_r}$  varió significativamente ( $p < 0.0001$ ) entre RH, siendo las diferencias dependiente del ambiente ya que la interacción  $A * RH$  fue significativa ( $p < 0.001$ ). En dos de los tres ambientes evaluados la  $E_{T_r}$  fue significativamente menor ( $p < 0.05$ ) respecto al T100% a partir de reducciones del 25% de riego (T75%), mientras que en el ambiente restante fue significativamente menor ( $p < 0.05$ ) a partir de reducciones del 50% del agua de riego (T50%). Es importante destacar que la disminución de la  $E_{T_r}$  en los tratamientos con RDC y sin riego, fue proporcionalmente menor a la disminución del riego como consecuencia del consumo de agua acumulada en el suelo al momento de la siembra del cultivo (datos no mostrados).

Al analizar el rendimiento, el efecto de los diferentes RH fue independiente del ambiente ya que la interacción  $A * RH$  fue no significativa ( $p = 0.05$ , Cuadro 3). A diferencia de los resultados obtenidos en la  $E_{T_r}$ , la disminución del rendimiento relativo a T100% en las diferentes estrategias de RDC fue

proporcionalmente menor a la disminución de la ETr. Entre los diferentes tratamientos de RDC, se destacaron T75% y T50% ya que el rendimiento no disminuyó significativamente ( $p=0.05$ ) con respecto al tratamiento T100%.

El componente que explicó las diferencias encontradas en el rendimiento entre los RH, fue el número de granos (NG) ya que no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.05$ ) en el peso de grano. Es importante destacar que si bien el índice de cosecha varió entre RH ( $p<0.05$ ), esta diferencia solo se manifestó entre el tratamiento sin riego y el resto de los RH.

Finalmente, considerando tanto el rendimiento como la ETr, podemos decir que entre las diferentes estrategias de RDC, se destacaron los tratamientos T75% y T50% respecto al tratamiento sin limitantes hídricas (T100%) ya que si bien el riego y la ETr fueron significativamente menor, el rendimiento fue igual al tratamiento T100% y significativamente ( $p<0.05$ ) superior al resto de los RH. Estos resultados, demuestran por primera vez en soja cultivada en Argentina que es posible realizar riegos deficitarios controlados con reducciones de hasta 50% de la lámina de riego y consecuentemente de la ETr, sin mermas significativas en el rendimiento.

## ***b. Algodón***

Se evaluó la respuesta del cultivo en dos ambientes contrastantes. En los dos ambientes la duración total del ciclo fue similar. Sin embargo, la duración de las fases siembra-primer pimpollo, primera flor-fin de floración efectiva y fin de floración efectiva-primer capullo se modificó entre ambientes, siendo la primera de menor duración y la segunda y tercera de mayor duración en el ambiente 1.


Las condiciones hídricas de la atmósfera variaron sensiblemente entre ambientes como consecuencia de la marcada diferencia en la ETo, ya que en el ambiente 2 tanto la ETo promedio como la total durante el ciclo del cultivo fue 32% superior.

A través de ambientes, la ETr varió significativamente ( $p<0.0001$ ) entre RH, siendo las diferencias dependiente del ambiente ya que la interacción A\*RH fue significativa ( $p<0.001$ ). Con respecto al tratamiento sin limitantes hídricas (T100%), en el ambiente 1 donde las la demanda de vapor fue menor, la ETr fue significativamente menor ( $p<0.05$ ) a partir de reducciones del 50% de riego (T50%), mientras que en el ambiente restante fue significativamente menor ( $p<0.05$ ) a partir de reducciones del 25% del agua de riego (T75%). Al igual que en soja, la disminución de la ETr en los tratamientos con RDC y sin riego, fue proporcionalmente menor a la disminución del riego como consecuencia del consumo de agua acumulada en el suelo al momento de la siembra del cultivo (datos no mostrados).

Al analizar el rendimiento, el mismo fue significativamente superior en el ambiente 1. En este ambiente, la fase reproductiva comprendida entre primera flor y primer capullo fue un 30% mayor por lo que esta sería una de las causas del mayor rendimiento promedio en el ambiente 1.

Al analizar el efecto de los diferentes RH en el rendimiento, la respuesta dependió del ambiente ya que la interacción A\*RH fue significativa ( $p<0.05$ ). En el ambiente 1, de menor demanda de agua, no se encontraron diferencias en el rendimiento entre los tratamientos regados, siendo solamente significativamente ( $p<0.05$ ) menor el rendimiento en el tratamiento sin riego con respecto a T100%. Por el contrario, en el ambiente 2, se obtuvieron diferencias en el rendimiento entre los tratamientos regados, siendo el rendimiento significativamente menor en los RH T25%. En ambos ambientes, se destacan los tratamientos de RDC, T75% y T50% ya que tanto el rendimiento como el porcentaje de desmote, no disminuyeron significativamente ( $p=0.05$ ) con respecto al tratamiento T100%.

Si bien las diferencias en el rendimiento entre los ambientes fue explicada en mayor medida por



el peso promedio del capullo, dentro de cada ambiente, el componente numérico que explicó las diferencias encontradas en el rendimiento entre los RH, fue el número de capullos por unidad de superficie ya que no se encontraron diferencias significativas ( $p=0.05$ ) en el PC.

Finalmente, considerando tanto el rendimiento como la ETr, podemos decir que entre las diferentes estrategias de RDC y respecto al tratamiento sin limitantes hídricas (T100%), se destacaron los tratamientos T75% y T50% ya que si bien el riego y la ETr fueron significativamente menor, el rendimiento fue igual al tratamiento T100% y significativamente ( $p<0.05$ ) superior al resto de los RH. Estos resultados, demuestran por primera vez en algodón cultivada en Argentina que es posible realizar riegos deficitarios controlados con reducciones de hasta 50% de la lámina de riego y consecuentemente de la ETr, sin mermas significativas en el rendimiento.

### ***c. Olivo en Junín***

Los tratamientos de riego deficitario lograron importantes ahorros de agua de riego, que variaron aproximadamente desde un 25% para el tratamiento de 75% ETc hasta un 55% para el tratamiento más deficitario (35% ETc).

Los tratamientos más restrictivos (i.e. 35% ETc y 50% ETc) presentaron menores valores de la evolución del potencial hídrico de tallo (PHT) en la mayor parte del ciclo respecto al resto de los tratamientos, presentando los tratamientos más irrigados (75%ETc, 100%ETc y 125%ETc) valores similares entre ellos para los tres ciclos de cultivo. Durante la temporada 2011-2012 los menores valores alcanzados en los tratamientos 35% ETc y 50% ETc fueron inferiores a los alcanzados en ambos ciclos previos, evidenciando un nivel de estrés moderado a severo para la especie.

Las tendencias de crecimiento de los tratamientos reflejaron las distintas cantidades de agua aportadas. Los tratamientos 125%ETc y 100%ETc presentaron valores similares entre ambos, diferenciándose significativamente ambos del tratamiento con menor aporte de agua (35% ETc).

El rendimiento de frutos por planta fue afectado significativamente para los tratamientos 35% ETc y 50% ETc excepto en el primer ciclo de estudio dado que la carga frutal inicial era similar para todos los árboles bajo ensayo al momento de iniciar el experimento. Por su parte, el rendimiento de aceite a nivel de planta (i.e. kg de fruto afectado por el rendimiento industrial de aceite) presentó una tendencia similar.

### ***d. Olivo en San Juan***

Mediante el seguimiento del estado hídrico del cultivo determinado por el potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_{hoja}$ ) a medio día, en hoja tapada y pre-amanecer, se pudo saber que todos los tratamientos fueron logrados en las temporadas 2008-2009 a la 2011-2012.

En la temporada 2008-2009 el  $\Psi_{hoja}$  en T3 alcanzó valores sensiblemente menores al testigo durante todo el ciclo con excepción del final del mismo donde se recupera por dos intensas lluvias. Los tratamientos de RDI lograron importantes ahorros de agua de riego, que variaron desde un 25% para el tratamiento de 75% ETc hasta un 55% para el más deficitario (35% ETc).

Durante la temporada 2009-2010 el T3 alcanzó un  $\Psi_{hoja}$  sensiblemente menores al testigo durante todo el ciclo y aún mayores que los de la temporada anterior ( $<-5$  MPa) y además el nivel de estrés alcanzado luego del fin del periodo de endurecimiento de carozo (Fase 3 del crecimiento de la fruta) fue superior.



En la temporada 2010-2011 la aplicación de los tratamientos mostró diferencias significativas en el estado hídrico de la planta. El T3 alcanzó un  $\Psi_{\text{hoja}}$  sensiblemente menor al testigo desde los 20 días posteriores a la aplicación del déficit y durante todo el ciclo de desarrollo de la fruta. Los niveles alcanzados, si bien menores a la temporada anterior, mostraron un nivel de estrés alto en las situaciones de déficit hídrico. El T2 entró rápidamente en estrés una vez iniciado el déficit y luego se recuperó al finalizar esa etapa.

Al igual que en las 3 anteriores, en la temporada 2011-2012 los tratamientos mostraron diferencias significativas en el estado hídrico de la planta. El T3 alcanzó un  $\Psi_{\text{hoja}}$  sensiblemente menor al testigo a los pocos días posteriores a la aplicación del déficit y durante todo el ciclo de desarrollo de la fruta. Los niveles alcanzados mostraron un nivel de estrés alto en las situaciones de déficit hídrico. El T2 entró rápidamente en estrés una vez iniciado el déficit pero luego de reestablecido el riego no se recuperó.

En la temporada 2008-2009 el rendimiento de aceitunas disminuyó a medida que el estrés hídrico fue más prolongado (diferencias no significativas). Esta disminución se explicó por el menor peso y tamaño de los frutos al aumentar el periodo de déficit de agua y no por el número de frutos ya que este es fijado el año anterior.

En la temporada 2009-2010, el rendimiento de aceitunas disminuyó a medida que el estrés hídrico fue más prolongado. Esta disminución se explicó por el menor peso y tamaño de los frutos, pero también por el menor número de frutos. El estrés durante el periodo de inducción floral del ciclo anterior probablemente influyó en el número total de frutos por planta.


En la temporada, 2010-2011 no hubo diferencias entre los tratamientos en el rendimiento. El Testigo mostró una caída sensible en la producción a diferencia de los tratamientos bajo déficit. Esto se puede deber a que se encuentra en año de descarga (off), luego de haber alcanzado un nivel productivo alto el año anterior. Los tratamientos con déficit hídrico mostraron una menor variación frente al año anterior lo que puede sugerir un equilibrio obtenido del control de la carga por el uso del riego deficitario

En la última temporada 2011-2012 el rendimiento de aceitunas se vio severamente afectado por un invierno con temperaturas mínimas muy bajas que afectaron sensiblemente la producción del olivar. En este caso, el Testigo fue el más afectado, frente a los otros tratamientos. En estudios previos sobre la misma variedad (Turchetti et al., 2012) y en el mismo olivar se observó el efecto del déficit hídrico previo al inviernos y su influencia sobre la tolerancia al frío. El déficit hídrico aplicado en la temporada anterior sobre T2 y T3 pudo aumentar la tolerancia al frío (Turchetti et al., 2012).

En la temporada 2008-2009 la producción de aceite por hectárea, fue menor en el tratamiento T3 mostrando una disminución del 23% sobre el control. La caída de producción de aceite de este tratamiento se debe a la notable reducción de la síntesis de aceite por la fruta. El T2 no mostró reducción significativa frente al Testigo y esto se justifica por el bajo impacto que tiene un RDC en el periodo de endurecimiento del carozo (EC) sobre el contenido total de aceite en el fruto.

La reducción del agua aplicada en relación al tratamiento control en T2 y T3 fue proporcionalmente mayor que la reducción de la producción de aceite por ha, por lo tanto la productividad del agua (Kg aceite / m<sup>3</sup> de agua) fue mayor en ambos tratamientos.

En la temporada 2009-2010 el rendimiento de aceite por hectárea fue menor en los tratamientos



T2 y T3 alcanzando una disminución del 27 y 48 %, respectivamente, sobre el control y esto estuvo fuertemente influenciado por el rendimiento total de fruta obtenido. El T3 mostró una reducción significativa en la síntesis de aceite asociado al mayor nivel de estrés al que estuvo sometido durante la fase 3 de crecimiento del fruto.

La reducción del agua aplicada en T2 y T3 en relación al tratamiento control fue proporcional a la reducción de la producción de aceite por ha, por lo tanto la productividad del agua (aceite Kg/ m<sup>3</sup> de agua) fue igual en todos los tratamientos.

En la Temporada 2010-2011 el contenido y la producción de aceite por hectárea no mostraron diferencias significativas sometiendo las plantas a distintos periodos de déficit.

El porcentaje de agua aplicada en relación al tratamiento control se redujo en T2 y T3 un 73% y un 66%, respectivamente pero no tuvo impacto en la producción de los tratamientos en déficit, por lo tanto la productividad del agua (aceite Kg/ m<sup>3</sup> de agua) aumentó sensiblemente en los mismos.

En la última temporada el porcentaje de agua aplicada en relación al tratamiento control se redujo en T2 y T3 un 77% y un 50%, y nuevamente no tuvo relación con los niveles productivos porque estos fueron definidos por la helada como factor adverso y la tolerancia inducida por la práctica sistemática de estrategias de déficit hídrico. La productividad del agua (aceite Kg/ m<sup>3</sup> de agua) fue muy afectada por la caída de producción fundamentalmente en el Testigo.

En relación a la calidad del aceite, en la temporada 2008-2009, el T3 se observó un aumento significativo en el ácido oleico, polifenoles, tocoferoles, en la relación mono-poliinsaturados. El aumento de dichos parámetros tuvo impacto sobre la estabilidad oxidativa de los aceites donde el tratamiento con el periodo más amplio bajo estrés hídrico manifestó un aumento en la estabilidad de su aceite. El T2 solo mostró diferencias en los tocoferoles frente al testigo. En el caso del campesterol, cuyo nivel está asociado a parámetros de genuinidad de aceite, no mostró diferencias significativas ante la aplicación de las distintas estrategias de riego.

En la temporada 2009-2010 el efecto del déficit de agua en distinto momento fenológico no fue muy claro. En el T3 se observó una disminución del contenido de polifenoles y un aumento de los tocoferoles, campesterol y relación mono-poliinsaturados. Se destaca el aumento de los niveles de polifenoles y la relación MUFA/PUFA en el tratamiento Testigo lo que puede estar relacionada a características ambientales al momento de la síntesis de aceites. Esto tuvo como consecuencia un aumento significativo en la estabilidad oxidativa de estos aceites en este tratamiento. Así mismo, el contenido de ácido oleico no mostró diferencias entre los tratamientos.

En la temporada 2010-2011 el efecto del déficit de agua en distinto momento fenológico mostró tendencia a una mayor síntesis de tocoferoles y polifenoles como en la primer temporada, aunque las diferencias no son significativas. El aumento de dichos parámetros tuvo impacto sobre la estabilidad oxidativa de los aceites donde ambos tratamientos bajo estrés hídrico manifestaron un aumento en la estabilidad de sus aceites. Se destaca el aumento de ácido oleico en los tratamientos con déficit sobre el testigo.

En la última temporada, 2011-2012 se destaca el aumento de ácido oleico en los tratamientos con déficit sobre el testigo. La OSI no mostró diferencias significativas.

Los tratamientos ensayados mostraron un comportamiento muy diferente en relación a parámetros fisiológicos, productivos, cualitativos y de consumo de agua.

La implementación del RDC desde cuaje supuso una reducción del 30 al 50% del agua aplicada durante todo el año según la temporada, representando más del 60% de reducción durante ese periodo. El RDC en endurecimiento de carozo (verano) solo reduce el 20-30% del agua anual pero más del 50% en ese periodo, que corresponde al pleno verano.

En los primeros años de implementada ambas estrategias, se afecta la producción de aceite por ha, pero luego la producción tiende a equilibrarse manifestando menor variación interanual. En relación a lo anterior, la productividad del agua fue similar en los 2 primeros años entre los tratamientos, sin embargo mejora sensiblemente a medida que pasan las temporadas en los tratamientos bajo déficit hídrico.

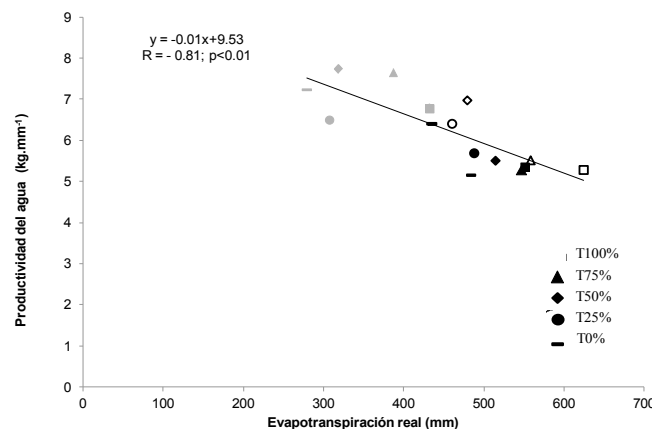
En relación al efecto sobre la calidad de los aceites, la estabilidad de los mismos aumentó cuando se aplicó un RDC. Esta mayor estabilidad se asocia a contenidos mayores de polifenoles, tocoferoles y a una mejor relación de Ac. Grasos Mono y Poli Insaturado (MUFA/PUFA). Sin embargo, esto no se cumplió en las temporadas donde el tratamiento sin déficit (Testigo) tuvo niveles altos de estos compuestos, asociado a características climáticas de esa temporada.

El perfil de ácidos grasos fue variable durante las temporadas, aunque se observó una tendencia al aumento del contenido de ácido oleico en los tratamientos con déficit hídrico. Esto resulta de suma importancia ya que 'Arbequina' en los valles cordilleranos del nor-oeste argentino suele tener bajos niveles de este ácido graso, lo cual genera problemas de calidad y genuinidad de los aceites (Gómez del Campo et al., 2011).

### 3.2.3. Indicadores de productividad del agua.

#### a. Soja

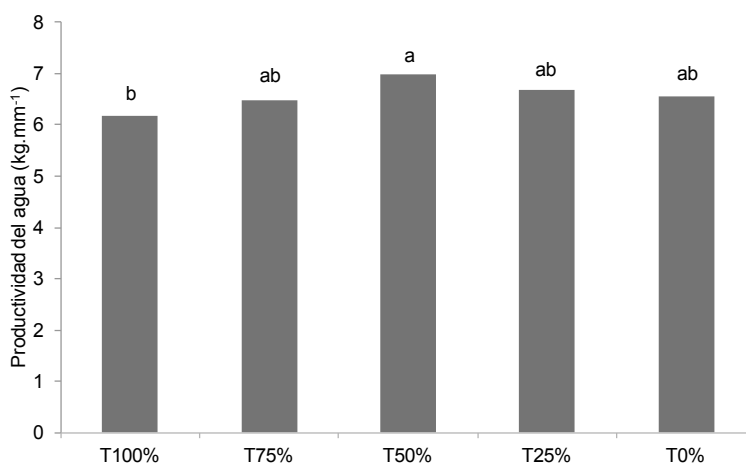
A través de los diferentes regímenes hídricos y ambientes evaluados, la productividad del agua (i.e. PAETr, relación entre el rendimiento y la ETr), correlacionó negativamente con la ETr, por lo que la productividad del agua se incrementa conforme disminuye la ETr (Figura 4).



**Figura 4.** Correlación entre la productividad del agua y la evapotranspiración real del cultivo de soja a través de los diferentes regímenes hídricos y ambientes (Ambiente 1, símbolos negros; Ambiente 2, símbolos vacíos y Ambiente 3, símbolos grises).

A través de RH, se obtuvieron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la productividad del agua (i.e. PAETr, relación entre el rendimiento y la ETr), siendo la misma 13% superior en el tratamiento con

restricciones del 50% de agua de riego (T50%) respecto al control sin limitantes hídricas (T100%, Figura 5). (Abbate, et al; 2004) demostraron en trigo que la productividad del agua expresada como cantidad de biomasa producida por unidad de agua transpirada se incrementa ante condiciones limitantes hídricas como consecuencias del cierre parcial estomático. Si bien en el presente trabajo no se evaluó la conductancia estomática, el cierre estomático explicaría las diferencias obtenida en la PAETr entre Regímenes Hídricos.



**Figura 5.** Productividad del agua en los regímenes hídricos 100, 75, 50, 25 y 0% de reposición de la evapotranspiración del cultivo de soja.

Es importante destacar que independientemente de las diferencias en la PAETr entre Regímenes Hídricos, se obtuvieron diferencias significativas ( $p < 0.0001$ ) en la PAETr entre ambientes. La misma fue un 33 y 18% significativamente superior en el ambiente 3, respecto a los ambientes 1 y 2, respectivamente. Nobel (2008) demostró que la productividad del agua se incrementa en ambientes donde la demanda de vapor de agua es menor. Por lo tanto, la mayor Productividad del Agua obtenida en el ambiente 3, podría estar relacionada con la menor evapotranspiración de referencia promedio y consecuentemente menor demanda ambiental de vapor de agua registrada en ese ambiente.

Estos resultados demuestran por primera vez en soja que es posible incrementar la productividad del agua combinando estrategias de riego deficitario controlado y fechas de siembra que expongan el cultivo en ambientes con menor evapotranspiración.

### ***b. Algodón***

La productividad del agua, calculada como la relación entre el rendimiento y la ETr del cultivo, claramente fue diferente entre ambientes. Como consecuencia de una mayor demanda de vapor de agua por la atmósfera la productividad del agua fue significativamente menor en todos los Regímenes Hídricos, en el Ambiente 2 (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Productividad del agua ( $t/m^3$ ) (DEFINIR UNIDAD) calculada como la relación entre el rendimiento y la evapotranspiración real del cultivo en algodón en diferentes ambientes (Ambiente 1, fecha de siembra 7/12/2010; Ambiente 2: fecha de siembra 25/10/2011) y regimenes hídricos expresados como porcentaje de reposición de la evapotranspiración del cultivo de algodón.

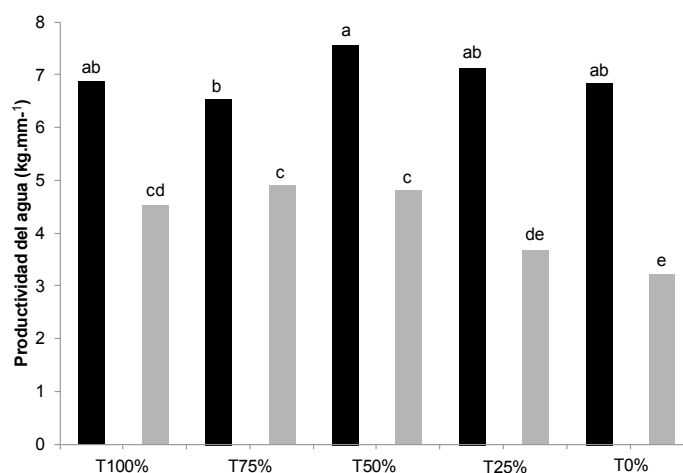
Ambiente	Promedio	T100%	T75%	T50%	T25%	T0%
Ambiente 1	7.1 (0.2)	6.9 (0.2) ab	6.5 (0.2) b	7.6 (0.4) a	7.1 (0.5) ab	6.8 (0.1) ab
Ambiente 2	4.2 (0.2)	4.5 (0.4) cd	4.9 (0.3) c	4.8 (0.3) c	3.7 (0.3) de	3.2 (0.3) e
Promedio		5.7 (0.5)	5.7 (0.4)	6.2 (0.6)	5.4 (0.7)	5.0 (0.7)
	***	RH	*		A*RH	*

<sup>1</sup> p valor para las fuentes de variación del ANOVA. Letras diferentes indican diferencias significativas según LSD de Fisher ( $p < 0.05$ ) para comparar las ambientes (A), regimenes hídricos (RH) e interacción A\*RH.

\* indica diferencias significativas con un nivel de probabilidad de 1% ( $p < 0.05$ ).

\*\*\* indica diferencias significativas con un nivel de probabilidad de 0.01% ( $p < 0.0001$ ).

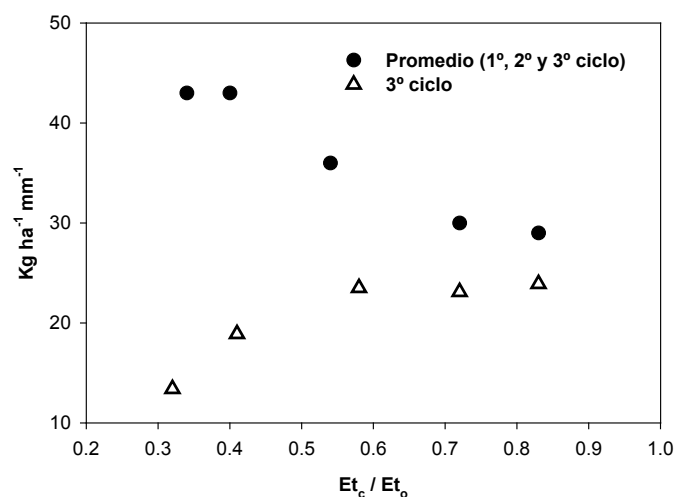
La respuesta de la productividad del agua a los diferentes tratamientos, dependió de la ambiente ya que la interacción Ambiente\*Régimen Hídrico fue significativa ( $p < 0.05$ , Cuadro 1). En el ambiente 1, si bien la productividad del agua fue levemente superior en el régimen hídrico T50%, estas diferencias fueron solamente significativas con respecto a T75% (Figura 6). En el ambiente 2, nuevamente la productividad del agua fue levemente superior en el régimen hídrico T50%, siendo en este caso superior al Régimen Hídrico con menor lámina de riego (Figura.6). Por lo tanto, y si bien en términos generales la productividad del agua fue mayor en el tratamiento de RDC T50% (Cuadro 1), estas diferencias no son del todo robustas ya que la respuesta no fue absoluta.



**Figura 6.** Productividad del agua en los regímenes hídricos 100, 75, 50, 25 y 0% de reposición de la evapotranspiración del cultivo de algodón en dos ambientes (Ambiente 1, barras negras; Ambiente 2, barras grises).

### c. Olivo en Junín

Al analizar la productividad del agua, razón entre los kg de fruta producidos y la lámina de agua consumida, puede observarse que el valor promedio para los tres ciclos de estudio indica una mayor productividad en los tratamientos con menores coeficientes Etc / Eto (Figura. 7).

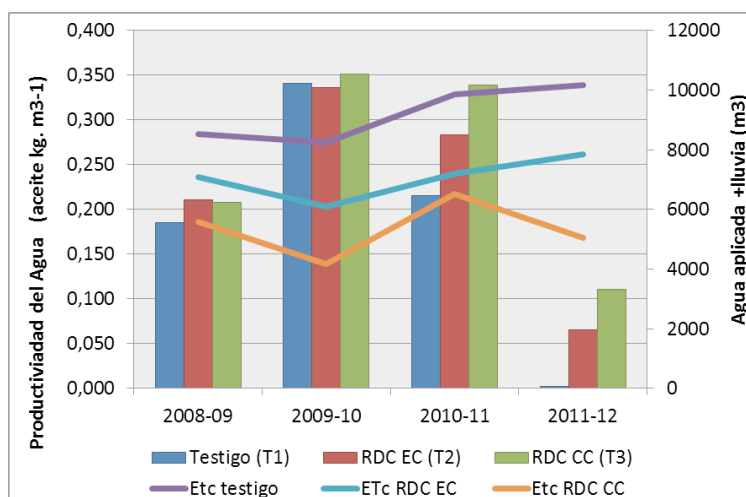


**Figura 7.** Productividad del agua ( $\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ) en relación al coeficiente  $E_t / E_o$  correspondiente a los distintos tratamientos de riego. (promedio de 1°, 2° y 3° ciclo,  $\Delta$  3° ciclo).

Sin embargo, esto debe ser considerado con precaución ya que la tendencia observada en esta variable es diferente para cada ciclo, mostrando para el tercer y último ciclo estudiado una menor productividad en estos tratamientos menos irrigados. Esto puede ser indicativo de la falta de sustentabilidad de estrategias de riego deficitarias severas aplicadas en forma continua a través de los años.

#### d. Olivo San Juan

En las primeras temporadas en que se aplicaron los tratamientos de riego la productividad del agua se mantuvo igual o levemente superior en los tratamientos con distintos períodos de déficit hídrico (Figura 8).



**Figura 8.** Productividad del agua y  $E_t$  en Arbequina durante la aplicación del ensayo.

Sin embargo, en la tercera temporada se observó un aumento significativo de la productividad del agua a medida que el período de déficit hídrico es más amplio. Esto se debe a que se observó un

mejor control sobre la carga y por consecuencia sobre la vecería natural del cultivo cuando es aplicado un déficit hídrico. La 4° temporada, si bien no sirve como parámetro de productividad, evidencia un menor impacto del frío extremos en tratamientos con déficit en la temporada anterior.

### 3.3. Conclusiones

Se generaron funciones de producción en condiciones locales de varios cultivos que no se disponían y que serán de gran utilidad para los tomadores de decisiones, si son bien difundidas y aplicadas.

Se cuantificó y caracterizó la respuesta cuantitativa y cualitativa de los cultivos de olivo, algodón, soja y maíz a las estrategias de Riego deficitario ensayadas.

En todos los casos, alguna de las estrategias de RDC, superaron a los testigos sin estrés hídrico en alguno de sus aspectos y aparecen como las estrategias a recomendar en muchas situaciones.

Los ensayos mostraron que los resultados de estas estrategias son dependientes o condicionan la respuesta de un siguiente año en el cultivo de olivo y de las condiciones ambientales en el caso de soja, algodón.

En el caso de los cultivos anuales, diferentes condiciones ambientales pueden lograrse con otras medidas de manejo de los cultivos como retraso de las siembras.

De mucho interés son los resultados referidos a la productividad del agua, un tema en la agenda de la investigación en riego y recursos naturales. Los ensayos confirmaron su correlación negativa con el aporte de agua y con la productividad de la tierra así como positiva con la calidad de la producción.

En el caso de los cultivos anuales, la productividad del agua fue también dependiente de las condiciones ambientales y modificables no solo con estrategias de manejo del riego, sino también con prácticas de manejo de los cultivos.

Finalmente queda claro que la disponibilidad relativa de los recursos tierra y agua, definen si el factor a maximizar es la productividad de la tierra o la del agua y por lo tanto la estrategia de riego a adoptar.

## 4. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DISPONIBILIDAD DE AGUA

### 4.1. Selección del modelo hidrológico

Los modelos hidrológicos han sido desarrollados y aplicados de manera creciente durante las últimas cuatro décadas. Este incremento sostenido se debe principalmente a dos motivos. Uno de ellos se basa en que los modelos han sido mejorados a partir de nuevas metodologías que surgieron del proceso de investigación. El otro motivo radica en la demanda de nuevas herramientas mejoradas y el interés creciente de trabajar con los recursos hídricos.

Existe una gran variedad de modelos hidrológicos, con distintos enfoques. Los puramente empíricos predicen caudales a largo plazo para aguas superficiales, como por ejemplo el modelo MONERIS (Behrendt and Opitz, 2000). Asimismo existen modelos híbridos de dinámica tridimensional que trabajan sobre una plataforma SIG (Sistema de información Geográfico), como es el caso de MIKE SHE (Boggild et al., 1999) y SWAT (Rosenthal et al., 1995).

### 2.2. El Modelo SWAT

SWAT es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas (Arnolt et al, 1990). Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes.

#### 4.2.1. Descripción del modelo

El modelo combina ecuaciones de base física y empírica y utiliza datos de entrada que se encuentren rápidamente disponibles. Asimismo, permite a los usuarios estudiar los impactos a largo plazo. SWAT está definido por 8 componentes principales: hidrología, clima, erosión y sedimentación, temperatura de suelo, fenología vegetal, nutrientes, pesticidas y manejo del suelo.

#### 4.2.2. Requerimientos de información

La información requerida para correr el modelo SWAT se puede resumir en climática, altimétrica, tipo de suelos, uso de suelo y caudales observados para la calibración.

### 4.3. Definición de escenarios climáticos

Para determinar el efecto de un cambio climático en los caudales esperados se utilizó el programa LARS-WG (Semenov and Stratonovitch, 2010), generador de tiempo estocástico para el análisis de escenarios climáticos. Se corrió LARS WG con línea base para 1000 años para temperatura mínima y máxima y precipitación y luego se ordenó de mayor a menor el resultado de precipitación total de los meses diciembre, enero, febrero y marzo (DEFM) para cada año y se dividió la serie en 3 períodos de 333 años cada uno (seco (ES), normal (EN) y húmedo (EH)). Luego se generaron los escenarios climáticos según el siguiente criterio: para el *escenario normal*; se tomaron al azar 33 años de cada uno de los 3 períodos; para el escenario seco se tomaron al azar 60 datos del período seco,



30 del normal y 10 del húmedo. Para el escenario húmedo se tomaron al azar 60 años del período húmedo, 30 del normal y 10 del seco.

## 4.4. Modelación hidrológica de cuencas

El objetivo básico del componente de modelación hidrológica fue estimar a nivel de cuenca el impacto de posibles escenarios climáticos futuros, sobre la disponibilidad en cantidad y calidad de los recursos hídricos.

El modelo SWAT, (Arnold et al., 1994) por sus características, fue el seleccionado como el más apropiado para el estudio a realizar mientras se definió una metodología particular para definir escenarios climáticos de menor plazo que los del IPCC.

### 4.4.1. Cuenca del Río Salí-Dulce

#### 4.4.1.1. Información utilizada

La simulación de esta cuenca tuvo como principales inputs:

- Información meteorológica de las estaciones meteorológicas de San Miguel de Tucumán AERO, y Famaillá, más datos de precipitación diaria de los puestos Clavillo del Potro y El Nogalito.
- El modelo digital de elevación (DEM) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) NASA versión 2 - 90m del GeoPortal CGIAR -CSI (Consortium for Spatial Information).
- Información de suelos generada a partir de los perfiles modales de las distintas unidades cartográficas del Atlas de Suelo de la República Argentina (INTA, 1989) a escala 1:500.000. Los parámetros hidro-físicos de los suelos no disponibles en las descripciones edafológicas se estimaron usando el criterio de especialistas en el tema y el programa *Soil Water Characteristics*. En consulta con los especialistas también se clasificaron los suelos en los diferentes grupos hidrológicos que requiere el método del Número de la Curva.
- El uso de suelo para la parte agrícola se determinó al nivel de predio usando la información provista por la Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombes" (EEAOC). Para las demás provincias y usos no-agrícolas se utilizaron las coberturas 1:1.000.000 de uso de suelo LCCS de FAO y coberturas específicas realizadas por la ONG Proyunga. Se decidió usar un uso promedio de la última década porque la cuenca experimentó un cambio grande en el uso del suelo, especialmente en las partes más llanas en los últimos años.

El punto de salida de la cuenca, para el que se cuenta con información de caudales fue el Dique de Río Hondo, dando una superficie total de la cuenca de 24120 km<sup>2</sup>.

Para la calibración y validación del modelo se utilizaron datos de caudales diarios aportados al Dique de Río Hondo (UER – AyEE - HIDROELECTRICA RIO HONDO S.A). Para la calibración y validación se usaron los registros del periodo 1998-2003 y 2004-2010 respectivamente. El caudal promedio anual sobre el periodo 1967-2010 es de 138,65 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> con un desvío estándar de 55,9 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> - con los picos de caudal más altos en los meses de febrero y marzo generalmente.

#### 4.4.1.2. Calibración y resultados.

La primer corrida del modelo para el periodo de calibración 1998- 2003 devolvió estimaciones de caudales muy superiores a los observados haciendo necesario un ajuste y un análisis de sensibilidad. Se empleó un análisis de sensibilidad para 20 parámetros hidrológicas relacionadas al modelo para la cuenca usando el algoritmo-Hybercube-One factor At a Time incorporado en SWAT. El modelo resultó mas sensible a Contenido de humedad del suelo, Número de Curva, Profundidad mínima del acuífero freático, porcentaje de percolación e índice de área foliar.

Se realizó una auto calibración usando el software SWATCUP y se fijó el periodo de precalentamiento en 4 años, sabiendo que el flujo base es importante en esta cuenca ya que en los 7-9 meses de otoño, invierno y principios de primavera, el caudal se mantiene estable sin mayores alteraciones durante ese periodo.

Se calibró el modelo usando los caudales mensuales de la subcuenca 8 (subcuenca de salida al embalse) para el periodo 1998-2003, obteniéndose un  $R^2$  y NS fueron de 0.74 y 0.69 respectivamente. Los datos modelados se apartaron de los medidos en algunos los picos de caudal en particular la crecida de febrero y marzo del 2000 tercer y cuarto caudal más alto de la serie.

El periodo de validación mostró una leve mejora en el ajuste general con un  $R^2$  de 0.79 y NS de 0.74 respectivamente. Los valores de NS encontrados representan un buen ajuste según la escala de ns.

El Cuadro 2 resume los resultados para los períodos de calibración y validación.

**Cuadro 2.** Resultados de la Calibración y Validación – Caudales Mensuales

	Calibración	Validación
	1998-2003	2004-2010
Caudal medio Río Hondo ( $m^3.s^{-1}$ )	179.0	116.4
Caudal medio modelado ( $m^3.s^{-1}$ )	189.3	156.3
Coefficiente de Nash y Sutcliffe (NS)	0.69	0.74
$R^2$	0.74	0.79
RMSE ( $m^3.s^{-1}$ )	94.3	67.1

Cuando se introdujeron los escenarios climáticos calculados se obtuvieron los resultados que se muestran en el Cuadro 3.

**Cuadro 3.** Resultados de la aplicación del modelo en diferentes escenarios climáticos.

Caudal	Escenario		
	Seco	Normal	Húmedo
Media Observado (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	208,1	230,9	258,8
Máximo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	1.014,0	1.111,0	1.542,0
Mínimo (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	40,49	45,12	51,17
Desvio estandar (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	149,94	177,11	204,12

Se puede observar que en todos los escenarios, de acuerdo a las simulaciones de SWAT, se espera un aumento del caudal.

## 4.4.2. Modelación Hidrológica Cuenca del Río Quequén Grande

### 4.4.2.1. Información utilizada

Como inputs se utilizó:

- Información meteorológica de las estaciones meteorológicas de Benito Juárez, y Balcarce. La primera se encuentra ubicada dentro de la cuenca, mientras que Balcarce se sitúa al este de la misma. Ambas estaciones cuentan con registros históricos extensos y confiables.
- El modelo digital de elevación (DEM) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission NASA versión 2 - 90m del GeoPortal CGIAR -CSI (Consortium for Spatial Information)
- Base de datos con perfiles modales para las distintas unidades cartográficas del Atlas de la República Argentina (INTA, 1989) para unidades más detalladas 1:50.000 mapeadas también por INTA.
- Uso de Tierras basado en una clasificación no supervisada de la campaña agrícola 2003/04 a partir de imágenes del sensor TM del satélite Landsat 5 que fue contrastada con las estadísticas publicadas por el RIAN para cada partido de la Provincia de Buenos Aires.
- Datos de medición de Caudales de la estación La Cascada calculados a partir de alturas del agua proporcionados por la Autoridad del Agua (ADA) de la Provincia de Bs As y el cálculo teórico de relación Altura/ Caudal a partir de la medición de la sección. Se contó con registros diarios desde Julio de 1963 hasta Agosto del 2006. Sin embargo, se utilizaron para la calibración y validación los registros del periodo 1990-2000 y 2000-2006. Los caudales mensuales para el periodo 1996 -2000 estuvieron en un valor medio de 16,5 m<sup>3</sup>/s y un desvío de 20.4 m<sup>3</sup>/s. Para el periodo 2001-2006, hubo un rango de datos faltantes entre Mayo del 2003 y Diciembre 2004.

### 4.4.2.2. Calibración y resultados

Incorporados los inputs y delimitadas las cuencas se realizó la corrida de calibración. Los resultados de la modelación, estuvieron inicialmente lejos de predecir el escurrimiento superficial y el escurrimiento base de la cuenca. A partir de estos resultados se ajustaron la evapotranspiración real, el Número de Curva para todas las HRUs los parámetros relacionados al flujo subsuperficial y se extendió el periodo de “Warm –Up” de 2 años a 6 años.

El Periodo de Calibración fue de 1996 al 2000 y el Periodo de Validación del 2001-al 2006 (Registros

de caudal observado ausentes en los años 2003 y 2004). Una vez finalizada la calibración, se corrió el modelo para el periodo completo desde 1996 al 2006.

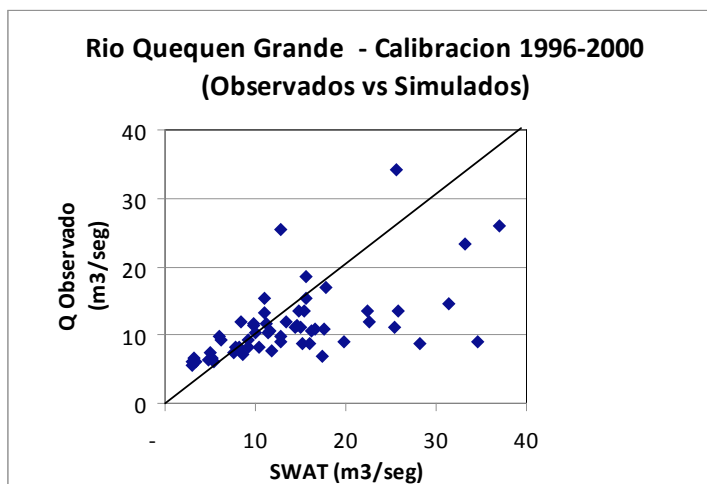
Los resultados para los caudales mensuales (Cuadro 4), muestran que los caudales mensuales fueron, en promedio, satisfactoriamente predichos por el modelo. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe fue de 0.75 en calibración y 0.61 en validación.

La Figura 9 presenta este coeficiente en forma gráfica y los puntos que más se aparta de la línea 1:1 son meses de caudales extremos. Esto parece estar relacionado con haber contado con una deficiente información de lluvias, en una cuenca de gran extensión.

El coeficiente de correlación también fue alto (0.72 en calibración y 0.80 en validación), indicando que el modelo predijo bien los aumentos y disminuciones de caudal a lo largo del tiempo.

**Cuadro 1.** Resultados de la Calibración y Validación – Caudales Mensuale

Período	Calibración	Validación
	1996-2000	2001-2006
Q Medio Observado(m <sup>3</sup> /s)	16.54	36.01
Q Medio SWAT (m <sup>3</sup> /s)	16.70	36.58
R <sup>2</sup> <sub>Nash</sub>	0.75	0.61
R Pearson (Correlación)	0.72	0.80
RMSE	14.17	33.31



**Figura 9.** Q Observado vs Q predicho por SWAT

### 4.4.3. Modelación Hidrológica Cuenca del Río San Juan

#### 4.4.3.1. Información utilizada

A diferencia de las dos cuencas anteriores, por la baja disponibilidad de información de precipitaciones en esta cuenca de régimen nival, se decidió no trabajar con el modelo SWAT en la misma, prefiriéndose la validación de un modelo estadístico.

Una segunda diferencia respecto con las cuencas anteriores es que la misma falta de información no posibilitó la generación de los escenarios climáticos con la metodología general aplicada en la mayoría de las cuencas estudiadas tanto en Argentina, como en Uruguay y Bolivia.

En este caso, entonces como se explica en el informe se trabajó con los clásicos escenarios A2 y B2 del IPCC.

La estación de control o aforos elegida en esta cuenca corresponde al Km 47.3 (latitud: 31° 32', longitud: 68° 53', altitud: 945 m.s.n.m.) ubicada aguas arriba del embalse de Ullum.


En la estación Km 47.3, del río **San Juan el área es de 25.670 km<sup>2</sup>**, y el módulo de período 1909 – 2004 de 65.2 m<sup>3</sup>/s (SsRH). En el hidrograma típico de este punto puede observarse el régimen hídrico de este río es nival, donde la curva de ascenso comienza en Octubre hasta llegar a su máximo en Diciembre para luego iniciar la curva de recesión del hidrograma, que responde a la variabilidad de la temperatura en superficie y disponibilidad de la nieve acumulada durante la temporada invernal. El año hidrológico es Julio hasta Agosto.

Escenarios Climáticos 2071-2100: Para conocer estos futuros escenarios climáticos se ha recurrido al informe final de la Actividad B-9, de Octubre 2005, elaborado por el CIMA-CONICET, titulado Cambio Climático Segunda Comunicación Nacional, Gobierno de la República Argentina. Este informe comprende las actividades totales llevadas a cabo para la obtención de los escenarios climáticos regionales, con base en los escenarios de emisiones SRES IPCC A2 y B2. Los escenarios actuales de emisiones son los provistos por el Informe especial del IPCC sobre escenarios de emisión (IPCC SRES: IPCC Special Report on Emissions Scenarios). Los escenarios SRES A2 y SRES B2 son definidos así:

Tomando como base el citado trabajo, se estableció que el valor de precipitación nival proyectado para la década 2081-2090 en las áreas de acumulación nival en la alta cuenca del río San Juan es aproximadamente del orden de –155 mm (escenario A2) y –30 mm (escenario B2). Estos valores fueron calculados considerando los meses de acumulación nival que va desde Abril a Setiembre inclusive, y haciendo uso de los datos mensuales de anomalía de precipitación y no los estacionales (trimestres) que de todas maneras publicamos en este informe.

Esta anomalía de precipitación nival es el cambio esperado para la década 2081- 2090, representativa del clima futuro correspondiente al período 2071-2100 con respecto al clima presente, donde el CIMA ha elegido la década 1981-1990 como la representativa del clima actual correspondiente al período 1961-1990. En el caso de la precipitación, la estimación resulta más ajustada dado que en la región prácticamente se registran solamente precipitaciones invernales, siendo las que ocurren en el verano de menor importancia en la formación de los caudales.

Como las variables que regulan la escorrentía superficial son numerosas y las relaciones entre si y con los caudales muy complejas, se requiere la formulación de un modelo de funcionamiento para esta cuenca. En ausencia de este modelo, la estimación realizada en este informe debe tomarse como una tendencia.



En este estudio por la razón antes expuesta, simplemente se obtuvo un modelo estadístico de regresión múltiple lineal, y la mejor correlación entre la caída de nieve y el caudal se obtuvo cuando se relacionaron las series históricas del equivalente de agua de la nieve anual [mm] y volumen o derrame estival Octubre – Marzo [hm<sup>3</sup>].

La estación nivométrica usada en esta relación es la instalada en el sitio llamado Teatinos (70° 21' W – 32° 03' S, 3.400 m.s.n.m) en la alta cuenca del río de Los Patos afluente de aquél. Los datos de equivalente de agua de la nieve desde el año 1965 y hasta la actualidad fueron obtenidos de la Dirección Provincial de Hidráulica de San Juan.

La expresión del modelo de regresión obtenido es:

$$V = 239.4 + 2.127 * EAN\_Teatinos \quad [1]$$

R: 0.90 e.c.m.: 389 hm<sup>3</sup> Período de calibración: 1965/66 – 1994/1995

Donde:

V [hm<sup>3</sup>]: volumen desde octubre hasta marzo; EAN\_Teatinos [mm]: equivalente de agua de la nieve máxima anual en la estación nivométrica Teatinos; R: coeficiente de correlación; e.c.m.: error cuadrático medio

#### 4.4.3.2. Calibración y resultados

Durante la etapa de calibración del modelo (1965/66-1994/95) se usó la técnica de validación cruzada (cross-validation) debido que la serie histórica de nieve es reducida, y los pronósticos ciegos (1995/96 – 2008/09) con algunos faltantes de datos de nieve.

La precipitación nívica media histórica (1961-1990) en Teatinos es de 510 mm. Teniendo en cuenta las anomalías mensuales de precipitación nívica desde Abril hasta Setiembre de acuerdo al escenario A2 se esperaría una disminución de la misma del orden de 155 mm. Entonces de la diferencia entre la media de 510 mm y 155 mm, resulta en 355 mm el equivalente de agua medio esperado para el período 2071-2100.

Con este dato de 355 mm y usando la expresión [1] el volumen Octubre – Marzo medio a esperar en el período 2071-2100 es de 994 hm<sup>3</sup>, que representa una disminución del 22.7% en disponibilidad estacional de agua con relación a la media histórica 1961-1990 en el río San Juan que es de 1287 hm<sup>3</sup>.

Al considerar el escenario B2, el panorama es diferente dado que desde abril hasta junio las anomalías son positivas, y negativas desde julio hasta setiembre, siendo el resultado de su acumulación de – 30 mm a esperar en el período 2071-2100. Por lo tanto el equivalente de agua de la nieve para ese trienio sería de 480 mm y la disponibilidad de agua estacional de 1260 hm<sup>3</sup>, es decir, solamente una disminución del 2% con relación a la climatología 1961-1990.

### 4.5. Capacitación de profesionales en el uso de los modelos.

El equipo del proyecto no contaba con conocimientos en el uso modelos hidrológicos al iniciar el mismo, y no se había pre-determinado en la formulación del proyecto que modelo se usaría, previendo el análisis de los modelos posibles, la selección del modelo y el desarrollo de las capacidades durante el proyecto.

Por esta razón la primera actividad de este componente fue la realización de un Curso-Taller de Trabajo en Marzo de 2010 al que fueron invitados los Ing. Agr (M.Sc.). Fernanda Gaspari e Ing.Agr

(M.Sc) Gabriel Vazquez, Amabile docentes de la Maestría de Manejo de Cuencas de la Universidad Nacional de La Plata en Argentina como instructores. También participó por Uruguay, el Ing. Agr. (PhD) Mario Perez con experiencia en el uso de modelos hidrológicos. Durante este taller se mantuvo una primera reunión con los expertos de Cambio Climático Dr. Walter Baethgen, del Instituto Internacional de Investigación en Clima y Sociedad (IRI) de la Universidad de Columbia en U.S.A, la Dra. Graciela Magrín del Instituto de Clima y Agua del INTA Castelar.

Seleccionado el modelo SWAT como el más ajustados a los objetivos del componente, los grupos de trabajos de los diferentes países iniciaron un trabajo colectivo de auto-capacitación, a partir de los conocimientos básicos obtenidos en el Curso-Taller inicial.

Los grupos de “modeladores” de los diferentes países mantuvieron una fluida comunicación, que les permitió un intercambio de experiencia, socializó el conocimiento y les permitió tener un desarrollo armónico de sus capacidades.

Esta comunicación electrónica se complementó con otras 2 reuniones presenciales, en Chillán Chile en Julio, 2011 y nuevamente Buenos Aires en el 2012.

El grupo tuvo una cuarta reunión, en Montevideo para definir la metodología de cálculo de los escenarios climáticos en la que aportaron sus conocimientos como invitados y asesores, el Dr. Walter Baethgen, la Dra. Graciela Magrín y el Dr Raúl Morales .de la Universidad de Chile.

Sin lugar a dudas, la constitución de equipos de trabajo en cada una de las instituciones de los países con un manejo idóneo del modelo SWAT, y la conformación de una red de trabajo con una comunicación fluida, son unos de los productos importantes logrado por el proyecto.

## **4.6. Conclusiones (En revisión)**



## 5. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESCENARIOS CLIMATICOS

Si bien los resultados relativos a la productividad del agua no son todavía conclusivos, es posible relacionarlos con los escenarios climáticos previstos.

En caso del escenario climático seco, la prioridad deberá darse a la productividad del agua sobre la productividad de la tierra. Ante esa situación, se deberá preferir las estrategias con mayor productividad del agua de los ensayos. Suponiendo que los escenarios secos se corresponden a años de fuerte demanda atmosférica, las estrategias de riego preferidas en caso de ser posibles, deberían ser las de 75% de la ETc.

Con escenarios medios y húmedo en las cuencas del Río Sali-Dulce y Quequén, debe preferirse maximizar la productividad de la tierra, dado que en estas hay recursos suficiente. Estas situaciones son sin embargo todavía muy hipotéticas, ya que en dichas cuencas se cuenta todavía con mucha superficie disponible para aumentar el área irrigada. En el Río San Juan, se entiende que aún en estas condiciones, debieran preferirse estrategias de Riego Deficitario Controlado.



## 6. PROGRAMA DE DIFUSION DEL PROYECTO EN ARGENTINA

### 6.1. Presentación en Congresos, Seminarios, Talleres, Charlas Técnicas y Días de Campo

- Meer, van H., M.V. Feler, D. Prieto Garra, 2013. Respuesta Hidrológica ante diferentes escenarios climáticos en la Cuenca del Salí-Dulce usando SWAT. Paper N° 429 Presentado y aprobado en XXI Congreso Nacional del Agua, San Juan 14 al 18 de Octubre, 2913.
- Prieto Angueira, S., D. Prieto Garra y G. Angella, 2013. Evaluación de diferentes estrategias de riego deficitario controlado en el cultivo de Soja [Glycinea Max (L.) Merrill]. Paper N° 429 Presentado y aprobado en XXI Congreso Nacional del Agua, San Juan 14 al 18 de Octubre, 2913.

### 6.2. Participación en Seminario Internacional

- Se participó en el Seminario Internacional de Cierre en Salto, Uruguay, donde los Ing. Agr (M.Sc) Salvador Prieto Angueira, Ing. Agr (Ms) Carlos Puerta, presentaron los resultados preliminares de la determinación de funciones de producción y estrategias de riego deficitarios en Soja, Algodón y Olivo y el Ing. Howard van Meer los referidos a la modelación hidrológica de las Cuencas del Río Quequén Grande y Salí-Dulce.


### 6.3. Manual de estrategias de manejo de agua de riego para los cultivos seleccionados

Documento en elaboración, en cuyo contenido se consideran estrategias de riego para cada cultivo estudiado en el proyecto, en Argentina y otros países; y cuya edición se efectuará dentro del presente año.

### 6.4. Publicaciones científicas ISI.

Las principales publicaciones científicas producto de un proyecto de investigación, se generan luego de 1 o 2 años de finalizado el mismo, una vez que los resultados han sido debidamente analizados y el “paper” propuesto pasó todas las etapas de la evaluación y/o revisión. Sin embargo el grupo ha hecho esfuerzos importantes para difundir no solo a nivel de campo sino también a nivel científico, lográndose las publicaciones y presentaciones en Congresos con referato que se listan.

- Capraro F., Tosetti S., Vita Serman F., 2011. Real-time soil moisture control for a very high frequency drip irrigation in olive groves. Acta Horticulturae N° 888. P. 239- 246. ISSN: 0567-7572
- Pacheco D., Olguín A., Bueno L., Vita Serman F., 2011. Plant and soil water status behavior under different irrigation strategies in Arbequina cv. Olive orchard. Acta Horticulturae N° 889. P. 311-316. ISSN: 0567-7572
- Vazquez Ambile, G., A.P Ricca, D. Rojas, M. L. Ortiz de Zarate, N. Bosch, D. Pons, A. Rodriguez Vagaría, F. j. Gaspari, M.V. Feler, P.A. Mercuri, H. van Meer, E. Flamenco y M.F. Feiguin, 2013. NPS pollution analysis in groundwater and streams of rural watersheds in western and southeastern Pampas, Argentina” Paper N°1620759 presentado y aprobado en la ASABE, meeting
- Vita Serman, F. Capraro, S. Tosetti, A. Olguín, L. Bueno, V. Cornejo, 2012. “Intelligent irri-



gation control in olive groves (*Olea europaea* L.): a novel approach for water resource optimization". *Acta Horticulturae* (ISHS) N° 949. P. 343-350. ISSN: 0567-7572

- Vita Serman, F., D. Pacheco, A. Olguín Pringles, L. Bueno, F. Capraro, A. Carelli, 2011. Effect of different RDI strategies on productivity, quality and water use efficiency in a high-density Arbequina olive orchard located in an arid region of Argentina. *Acta Horticulturae* N° 888. P. 81-88. ISSN: 0567-7572.

## 6.5. Publicaciones Divulgativas.

El grupo argentino del proyecto no ha realizado hasta el momento publicaciones Divulgativas; sin embargo, la divulgación del proyecto, de los trabajos y los primeros resultados han sido difundidos en los días de campo de nuestras estaciones experimentales.

(NOTA: INDICAR listado de talleres o días de Campo donde se realizó la difusión o bien indicar si hay en proceso algunas publicaciones de este tipo).

## 7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Al cierre del proyecto, los objetivos se consideran cumplidos.

Se conoce en las cuencas estudiadas los posibles cambios en la disponibilidad de agua si los escenarios climáticos previstos ocurren.

Se dilucidaron importantes aspectos de la productividad del agua, que demostraron que no solo no tiene siempre una relación positiva con la productividad de la tierra y que por lo tanto cada situación requiere de un análisis particular para decidir a qué objetivos apuntar o como alcanzar un equilibrio entre ambas productividades.

La respuesta a las estrategias de riego deficitario ha dado respuestas claras en relación a la productividad del agua pero también a su relación con el rendimiento, con la calidad de la producción.

Algunos ensayos mostraron que se puede aumentar la productividad del agua no solo con riego deficitario controlado sino también con otras prácticas de manejo de los cultivos anuales.

En conjunto se generaron las bases que ayuden a los tomadores de decisiones a diferentes a nivel de finca como de gobierno.

Otros productos menos tangibles y de largo plazo se han logrado con el proyecto, la consolidación de una red de trabajo surgida desde la Plataforma temática del PROCISUR, el fortalecimiento de nuestras instituciones a través de la capacitación de equipos en el uso del modelo SWAT, el surgimiento de nuevas interrogantes a partir de los avances logrados en los ensayos que seguramente definirán buena parte de la agenda de investigación en agua de nuestras instituciones en el corto y mediano plazo.





FONTAGRO



## Resumen Extendido Bolivia

“Evaluación de los cambios en la productividad del agua, frente a diferentes escenarios climáticos, en distintas regiones del Cono Sur”

Código: FTG-8042/08



## EQUIPO DE TRABAJO

1. INTRODUCCIÓN
2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS: LÍNEA BASE
  - 2.1. Situación actual de los sistemas productivos
    - 2.1.1. Cuenca del río Keka
    - 2.1.2. Cuenca del río Porvenir
  - 2.2. Situación actual de la dotación y demanda de agua en las cuencas seleccionadas.
    - 2.2.1. Cuenca del río Keka
    - 2.2.2. Cuenca del río Porvenir
  - 2.3. Caracterización de la infraestructura de riego que existe en las cuencas.
    - 2.3.1. Cuenca del río Keka
    - 2.3.2. Cuenca del río Porvenir
3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESTRATEGIAS DE RIEGO
  - 3.1. Metodología experimental
    - 3.1.1. Cultivo de la papa
    - 3.1.2. Cultivo del tomate
    - 3.1.3. Cultivo de la vid
  - 3.2. Resultados y discusión
    - 3.2.1. Cultivo de la papa
    - 3.2.2. Cultivo del tomate
    - 3.2.3. Cultivo de la vid
  - 3.3. Conclusiones
4. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DISPONIBILIDAD DE AGUA
  - 4.1. Selección del modelo hidrológico
  - 4.2. El Modelo SWAT
    - 4.2.1. Descripción del modelo
    - 4.2.2. Requerimientos de información
  - 4.3. Definición de escenarios climáticos.
  - 4.4. Modelación hidrológica de cuencas
    - 4.4.1. Información utilizada en el modelamiento
    - 4.4.2. Calibración y validación del modelo
    - 4.4.3. Resultados del modelamiento bajo distintos escenarios climáticos
  - 4.5. Conclusiones
5. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS
  - 5.1. Variación de la productividad del agua en los cultivos
  - 5.2. Estimación de la variación de la productividad del agua a nivel de cuenca
  - 5.3. Estrategias para el manejo del agua bajo escenarios climáticos probables
  - 5.4. Conclusiones
6. PROGRAMAS DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO
  - 6.1. Presentación en Congresos, Seminarios, Talleres, y Días de Campo
  - 6.2. Participación en Seminario Internacional en Uruguay
  - 6.3. Manual de estrategias del manejo del agua
  - 6.4. Publicaciones científicas
  - 6.5. Publicaciones divulgativas
7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES





## **EQUIPO DE TRABAJO**

- René Chipana Rivera, Dr.
- Rolando Céspedes Paredes, Ingeniero
- Ángela Palacios Nogales, Ingeniera
- Hugo Bosque Sánchez, Ingeniero, M. Sc.
- Silvia Catacora Chávez, Licenciada
- Aquiles Arce Laura, Dr.
- David Cruz Choque, Dr.
- Luz Mery, Ingeniera
- Germán Copa, Ingeniero
- César Velasco, Becado
- Adrián Ramos Paye, Becado
- Milton Macías Villalobos, Becado
- Quintín Huaraya, Tesista
- Rocío Quispe July, Tesista
- Roger Chipana Vásquez, Tesista
- Lucio Villca, Tesista
- Igor Coronel, Tesista
- Willy Mamani, Tesista
- Iván Mamani, Tesista
- David Padilla, Tesista

## **Asesores Externos**

- Dr. Henoque Ribeiro da Silva, EMBRAPA Brasil
- Dr. Theib Oweis, ICARDA Syria
- Dr. Luis Santos Pereira, Portugal

# 1. INTRODUCCIÓN

Bolivia presenta seis grandes regiones agro productivas, las cuales son: Altiplano, Valles, Gran Chaco, Llanos Tropicales y Amazonía, de ellas las más sensibles al cambio climático son las dos primeras debido a que los sistemas productivos dependen del agua proveniente de los glaciares y por la topografía montañosa, en el caso de los valles. En tal sentido en el presente estudio se eligieron dos cuencas, la cuenca del río Keka en la región del altiplano y la cuenca del río Provenir en la región de los valles (Figura 1).

La cuenca del río Keka es una de las más importantes del altiplano boliviano puesto que es una región eminentemente productora de alimentos de origen agrícola y pecuario, que además descarga sus aguas en el lago Titicaca. Por otro lado, la situación de los valles interandinos de Bolivia es crítica, debido a la disminución progresiva de los nevados y su efecto directo en la disponibilidad de agua para riego, lo que provoca una baja producción de alimentos, afectando la seguridad alimentaria de los pobladores rurales de dicha región.

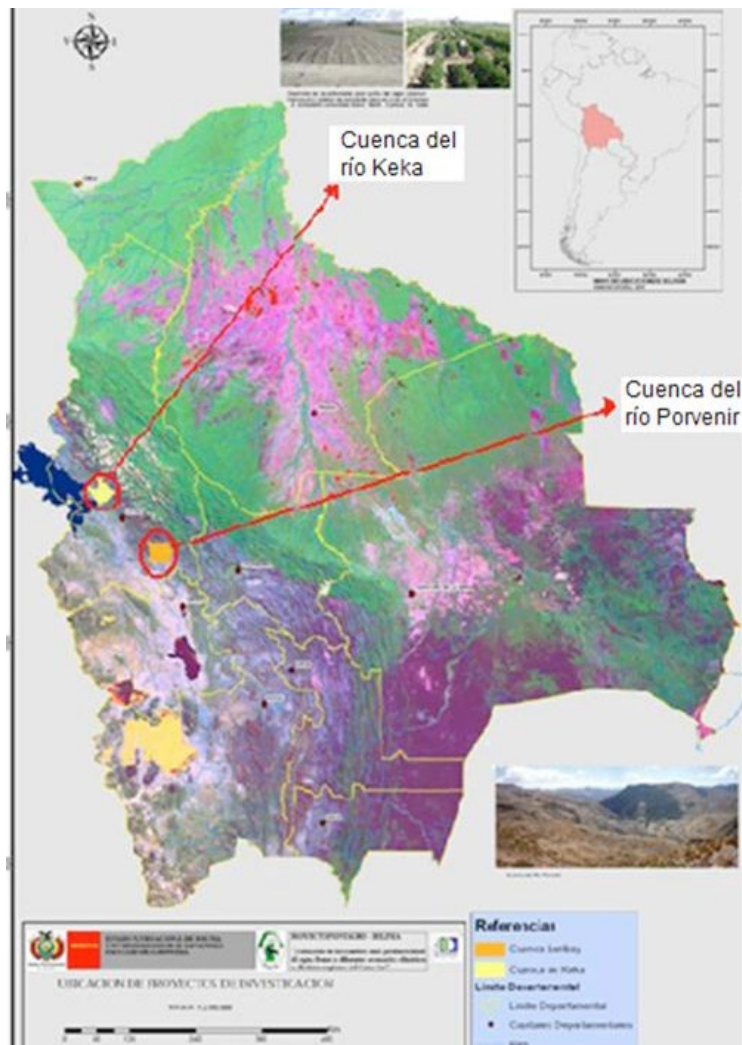


Figura 1. Ubicación de las cuencas del río Keka y río Porvenir en Bolivia.

## 2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS.

### 2.1. Situación actual de los sistemas productivos.

#### 2.1.1. Cuenca del río Keka

La cuenca del río Keka geográficamente está situada entre los paralelos 15°58' a 16°16' de latitud sur y 68°30' a 68°24' de longitud oeste, y rango de altitud 3.371 a 6.194 msnm. Posee una superficie de 1.050,46km<sup>2</sup>. La topografía que presenta es suavemente ondulada, alternada con serranías de pendientes moderadas a escarpadas. El comportamiento térmico corresponde a una zona semiárida y fría, variando a templada y seca. Presenta temperaturas anuales promedio de 7,1°C, que varían entre 0,5°C bajo cero y 14,6°C.

Los cultivos principales son la papa, cebada, cebolla, haba, oca, quinua, tarwi, papaliza, avena, trigo, cañahua, izaño y alfalfa. Los rendimientos de estos cultivos son muy bajos.. Una alta proporción de estos productos son auto-consumidos, debido a la predominancia de la pequeña agricultura y el minifundio.

En la parte media y baja de la cuenca se tiene el cordón lechero del departamento de La Paz, donde la tenencia de ganado promedio por familia es 5 cabezas de ganado vacuno, 15 de ovino y 5 de porcino. El ganado de mayor importancia en las alturas (faldas de la cordillera) son las llamas que completan una actividad ganadera de subsistencia familiar.

#### 2.1.2. Cuenca del río Porvenir

La cuenca del río Porvenir geográficamente está ubicada entre las coordenadas en UTM WGS84 zona 19S de: 662681 m Este máximo y 648839 m Este mínimo; 8119071 m Sur máximo y 8109627 m Sur mínimo, posee una extensión de 247,019 Km<sup>2</sup>. Esta cuenca, presenta dos sectores, el primero es el sector del altiplano, que se encuentra a una altura entre los 3.200 a 3.900 msnm, el clima es frío y la temperatura media varía de 5 a 15 °C, con una humedad ambiental promedio de 50%. El segundo es el sector de los valles y está entre 2.400 a 2.900 msnm, que está clasificada como mesotermal, presenta una temperatura media anual de 18°C, con temperatura extrema de 30,8°C y mínima extrema de 4 °C.

La producción agrícola se basa en el sistema tradicional, por tanto las comunidades están conformadas por pequeños agricultores. El sector de los valles se caracteriza por contar con cultivos frutícolas y hortícolas, como: durazno, uva, pera, ciruelos pacay, tomate, maíz, lechuga, zanahoria, cebolla, acelga y ajipa, entre los principales. En el sector del altiplano, se tiene cultivos como la papa, oca, haba, cebada, avena y alfalfa, predominantemente.

El sistema de producción pecuario en la zona alta es extensivo. Los ovinos ocupan el primer lugar, con 27.353 cabezas en la zona del altiplano y en la zona del valle con un total de 4.420 cabezas.

## 2.2. Situación actual de la dotación y demanda de agua en las cuencas seleccionadas.

### 2.2.1. Cuenca del río Keka

La precipitación promedio anual en la cuenca del río Keka es de 455,9 mm, distribuido principalmente entre los meses de diciembre a marzo, ocurriendo la precipitación máxima media en el mes de enero con 106,8 mm y el mínimo en el mes de julio con 6,60 mm. Las precipitaciones máximas anuales en 24 horas varían de 15 mm a 51 mm.

Esta cuenca puede ser subdividida en siete subcuencas, cuyas aguas desaguan el lago Titicaca. Los caudales estimados para un periodo de retorno de cinco años se muestran en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Superficie y caudales estimados para las subcuencas.

Subcuenca	Superficie (ha)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Achacachi	4.810,48	6,3
Kellhuani	7.893,72	12,2
Chachacomani	17.959,63	19,4
Labrahuani	7.834,71	14,0
Keka	19.250,33	34,2
Tambo	17.329,89	17,8
Jacha Jahuirá	24.921,23	44,5

Respecto al agua subterránea, en la actualidad existe una gran cantidad de pozos someros destinados principalmente al riego de cebolla, también existen pozos ubicados entre 30 a 50 m de profundidad utilizados para riego. En términos generales se puede indicar que pese al gran potencial, el agua subterránea es utilizada en proporciones mínimas.

En lo referente a la demanda de agua, en la cuenca del río Keka se estima que se riegan aproximadamente 3.500 ha distribuidas en sistemas de riego tradicionales, comunales. Gran parte de la agricultura se desarrolla bajo condiciones de secano, se estima que se tiene unas 9.000 ha bajo este sistema, incluyendo cultivos y forrajes y praderas nativas. La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) calculada mediante el método de Penman–Monteith, varía entre los 2,5 mm/d en el mes de julio a 5,1 mm/d en el mes de noviembre.

### 2.2.2. Cuenca del río Porvenir

El promedio de precipitación anual en los valles de esta cuenca es de 291,5 mm. Los meses en que se registran los promedios más altos de precipitación son diciembre y enero con 57,3 y 79,4 mm, respectivamente y los meses con menor precipitación promedio son junio con 1 y julio con 0,9 mm. Por tanto la agricultura es altamente dependiente de la práctica del riego.

El río Porvenir nace en la cordillera de las Tres Cruces y atraviesa toda la región de El Porvenir y Azambo para unirse al río Luribay en la comunidad de Anquioma. Respecto a los caudales del río Porvenir, en el Cuadro 2 se muestra el registro de ocho meses, de la parte alta, media y baja de la

cuenca, toda vez que no existen registros históricos.

**Cuadro 2.** Caudales mensuales observados, obtenidos en tres puntos de la cuenca del río Porvenir

Año	Mes	Cuenca alta Q (m3/s)	Cuenca media Q (m3/s)	Cuenca baja Q (m3/s)
2010	Septiembre	-	0,42	0,04
2010	Octubre	-	0,84	0,72
2010	Noviembre	0,96	1,44	12
2010	Diciembre	0,73	-	14
2011	Enero	-	-	39,2
2011	Febrero	0,85	-	21
2011	Marzo	-	6,80	6,32
2011	Abril	-	2,23	3,75

En esta cuenca el agua superficial representa un gran potencial hídrico; pero no existe infraestructura hidráulica, ni una organización de regantes a nivel de cuenca, que pueda mejorar o impulsar el aprovechamiento de este recurso en forma equitativa y sostenible.

Respecto al agua subterránea, no existen estudios hidrogeológicos para esta región, no obstante, en algunas comunidades de la zona alta existen pozos someros que se destinan al consumo humano y del ganado.

En lo referente a la demanda de agua, se puede indicar que en la zona de los valles es donde se presenta la mayor extensión de cultivos bajo riego, llegando a un total de 1.579 ha, lo cual constituye el 90 % del total de la tierra cultivable en estas zonas.


La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) calculada mediante el método de Penman–Monteith, varía entre los 2,6 mm/d en el mes de julio a los 5,5 mm/d en el mes de noviembre. En la zona de los valles la agricultura se practica durante todo el año cultivándose hortalizas y especies frutales.

## 2.3. Caracterización de la infraestructura de riego existe en las cuencas.

### 2.3.1. Cuenca del río Keka.

Del total de sistemas de riego existentes un 17% son sistemas mejorados y/o nuevos y el resto son parte de los sistemas de riego antiguos. Los sistemas antiguos presentan canales de tierra y tienen problemas de mantenimiento, existiendo fugas de agua por infiltración. La gran parte de los canales no presentan estructuras de control tales como compuertas, vertederos y repartidores. En los sistemas antiguos las tomas de agua en los ríos son rudimentarias que consiste en un azud construido con piedra y ramas de árboles. En varios sistemas de riego se revistieron los canales con hormigón armado, con hormigón ciclópeo o con emboquillado de piedra, mejorándose notablemente la eficiencia de conducción. El 99% de las parcelas son regadas mediante el método de riego por superficie, fundamentalmente surcos e inundación, en tanto que entorno al 1% es regado por aspersión.

Un aspecto importante que se debe resaltar es que en la cuenca del río Keka no existen embalses



artificiales, tales como represas, por lo que en gran parte del año las aguas de esta cuenca desembocan en el lago Titicaca. Asimismo, la gestión de los sistemas de riego se viene realizando en el marco de los usos y costumbres ancestrales, plasmados en comités de riegos, mismos que están organizados de manera que toda la comunidad pueda acceder a estos servicios. En tal sentido desde hace más de diez años atrás viene funcionando la Asociación de Usuarios del río Keka.

### **2.3.2. Cuenca del río Porvenir.**

La mayor parte de la infraestructura de riego en la cuenca del río Porvenir está en los valles. La infraestructura de riego está principalmente constituida por obras de toma rústicas (construidas con piedras, troncos de árboles y sacos de arena) y canales que generalmente son de tierra, sin embargo, existen sistemas con canales construidos con hormigón.

El 97% de las parcelas son regadas mediante el método de riego por superficie (surcos e inundación), en tanto cerca al 3% es regado por aspersión y goteo. Asimismo, se debe hacer notar que en esta cuenca no existen embalses artificiales de almacenamiento ni de regulación de agua por lo que durante todo el año las aguas de esta cuenca desembocan en el río La Paz, que es parte de la cuenca del río Amazonas.

Por otro lado, los sistemas de riego en las comunidades están organizadas internamente, existiendo el cargo de “Alcalde de Aguas”, “Juez de Riego”, o en su defecto la máxima autoridad sindical (Secretario General) es el encargado de controlar la operación y mantenimiento de los sistemas de riego. A nivel de cuenca, no existe una asociación de usuarios.

### 3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESTRATEGIAS DE RIEGO

#### 3.1. Metodología experimental.

Los trabajos de investigación con los cultivos de papa, tomate y vid se efectuaron directamente en las parcelas de los agricultores. En los tres cultivos se utilizó el diseño experimental de parcelas completamente al azar, ensayándose tres tratamientos: T1, que recibió el 100% de la ETo; T2 que recibió 75% de la ETo; y T3 que recibió 50% de la ETo.

##### 3.1.1. Cultivo de papa.

Los experimentos de campo se desarrollaron a cabo en dos gestiones agrícolas, 2010 a 2011 y 2011 a 2012, en la comunidad “Barco Belén”, ubicada a 16° 01'25" latitud sur y 68°42'45" longitud oeste, a una altitud de 3.820 msnm. Forma parte de la cuenca del río Keka.

La variedad de papa (*Solanum tuberosum* L.) utilizada en los experimentos fue la Wuaycha Paceña. Después de efectuarse los riegos iniciales, y una vez que las plantas alcanzaron el 80% de brotación y emergencia se inició el riego diferenciado en el mes de diciembre. La cosecha se realizó de forma manual, el 15 de abril de 2011 en la primera gestión y el 18 de abril de 2012 en la segunda gestión.

##### 3.1.2. Cultivo de tomate.

El estudio se llevó a cabo durante las gestiones agrícolas 2010 – 2011 y 2011 – 2012, en la comunidad de Villa San Juan, perteneciente a la cuenca del río Porvenir, con coordenadas geográficas de 17°01'42,21" latitud sur, 67°35'45,02" de longitud oeste y a una altura de 2.683 m.s.n.m. El material vegetal que se empleó fue tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill), variedad Super Río Grande. La cosecha se hizo manualmente en el periodo comprendido entre los 96 días después del trasplante hasta los 152 días después del trasplante, llegándose a realizar nueve cosechas en la primera gestión agrícola y ocho en la segunda.

##### 3.1.3. Cultivo de vid

El trabajo de investigación del cultivo de vid se realizó en las gestiones agrícolas 2010 – 2011 y 2011 – 2012, en la comunidad de El Porvenir localizada en la cuenca del río Porvenir que está situada a 17°01'48,30" latitud sur, y 67°33'41,39" longitud oeste, a una altitud de 2819 msnm. En la investigación se emplearon cepas de vid (*Vitis vinífera* L.) de la variedad “Moscatel de Alejandría” plantadas hace más de 50 años. En la gestión agrícola 2010 – 2011, la cosecha se realizó a los 18 días del mes de abril del año 2011, en tanto que en la segunda gestión se efectuó a los 2 días de mes de mayo del año 2012.

## 3.2. Resultados y discusión

### 3.2.1. Cultivo de papa

En la gestión 2010 -2011, antes de los riegos diferenciados se aplicaron 170,71 mm de agua a todos los tratamientos. Hubo trece eventos para los que se calculó el riego, sin embargo, en varios periodos no se efectuaron los riegos debido a que la precipitación efectiva fue mayor que la ETo. La frecuencia de riego varió entre 3 a 7 días. El riego se efectuó hasta el 6 de febrero de 2011. A partir de esa fecha hasta la cosecha (15 de abril de 2011) los riegos se paralizaron, debido a las elevadas precipitaciones y al elevado contenido de humedad del suelo.

La evapotranspiración de referencia en el periodo alcanzó a los 421,23 mm, la precipitación efectiva a los 169,33 mm, la lámina de riego en T1 fue 298,25 mm, en T2 fue 266,36 mm y para T3 234,48 mm. Cabe señalar que el agricultor, propietario del predio donde se hizo la investigación sugirió e insistió en aplicar láminas mayores a las predeterminadas, puesto que indicaba que le interesaba obtener la máxima producción en su parcela.

En la gestión 2011 -2012, antes de los riegos diferenciados se aplicaron 236,3 mm de agua. Se efectuaron 22 eventos de riego no obstante en varios no se efectuaron los riegos debido a que la precipitación efectiva fue mayor que la ETo. Las frecuencias de riego variaron entre 3 a 6 días. A partir del 20 de marzo de 2012 los riegos se interrumpieron debido a las elevadas precipitaciones y al elevado contenido de humedad del suelo. La evapotranspiración de referencia en el periodo alcanzó a los 675,35 mm, la precipitación efectiva a los 148,14 mm, la lámina de riego en T1 fue 542,69 mm, en T2 fue 466,09 mm y para T3 389,50 mm.

Respecto a la producción de tubérculos, en ambas gestiones, el tratamiento T1 presentó el mayor rendimiento con respecto a T2 y T3.

En relación a la productividad del terreno y productividad del agua, en el Cuadro 3 se muestran los valores promedio de volumen total de agua aplicado y rendimiento (productividad del terreno) y rendimiento del agua aplicada (productividad del agua), también conocido como Índice de Eficiencia de Uso del Agua (EUA), para las gestiones agrícolas 2010 - 2011 y 2011 - 2012.

**Cuadro 3.** Relación entre volumen de agua y rendimiento de tubérculo de papa e Índice de Eficiencia de Uso del Agua, gestión agrícola 2010 - 2011 y 2011 - 2012.

Tratamiento	Agua aplicada (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )		Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> )		Productividad del agua (kg m <sup>-3</sup> )	
	2010/2011	2011/2012	2010/2011	2011/2012	2010/2011	2011/2012
T 1	5.675,7	7.308,3	57,90	41,12	10,20	5,63
T 2	5.356,9	6.542,3	41,50	39,56	7,75	6,05
T 3	5.038,0	5.776,4	37,57	28,34	7,46	4,91

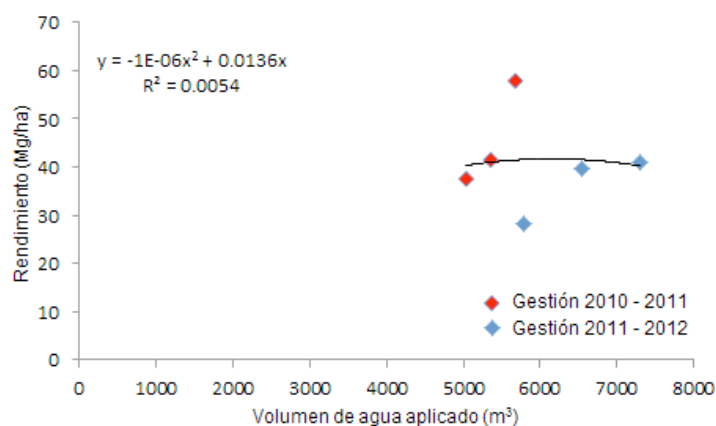
Para la temporada 2011 - 2012 considerando los promedios de los aportes de agua al suelo, tanto por la precipitación pluvial efectiva así como por el riego, en T1 se tiene el mayor volumen de agua con 5675,7 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, siguiéndole T2 con 5356,9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y finalmente T3 con el menor volumen de agua 5038,0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Los índices de eficiencia de agua promedio siguen esa tendencia, siendo que en T1 se obtuvo el valor promedio más alto con 10,20 kg de tubérculos por m<sup>3</sup> de agua, en T2 se alcanzó



7,75 kg de tubérculos por m<sup>3</sup> de agua, y T3 se obtuvo 7,46 kg de tubérculos por m<sup>3</sup> de agua.

Para la gestión 2011 – 2012, en T1 el volumen de agua aplicado fue 7308,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, siguiéndole T2 con 6542,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y el menor valor se obtuvo en T3 con 5776,4 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Respecto a los índices de eficiencia de agua promedio, cabe indicar que no siguieron la anterior tendencia, obteniéndose en T2 el valor promedio más alto con 6,05 kg de tubérculos por m<sup>3</sup> de agua, en el T1 se alcanzó 5,63 kg de tubérculos por m<sup>3</sup> de agua y en T3 se obtuvo 4,91 kg de tubérculos por m<sup>3</sup> de agua.

En la Figura 2 se muestra la función producción de la aplicación total de agua y rendimiento de tubérculos frescos. Se puede observar que el coeficiente de determinación englobando a las dos gestiones agrícolas es muy bajo, sin embargo, cuando se analiza separadamente por gestión este parámetro es alto.



**Figura 2.** Función producción del cultivo de papa para las gestiones agrícolas 2010 - 2011 y 2011 - 2012.

La razón por la que los rendimientos y la eficiencia de uso de agua fueron inferiores en la segunda gestión agrícola, puede atribuirse al hecho de que las plantas muy probablemente sufrieron una anoxia, toda vez que en la primera gestión los riegos se paralizaron en fecha 9 de abril de 2011, en tanto que en la segunda los riegos fueron suspendidos en fecha 20 de marzo de 2012, en pleno periodo de lluvias.

### 3.2.2. Cultivo de tomate

En la gestión 2010 -2011, se empezó a regar las parcelas el 5 de noviembre de 2010, a partir de esa fecha se tomaron 22 periodos de riego, con frecuencias de riego de 4 a 8 días. En algunos periodos no se hizo el riego debido a que la precipitación efectiva fue mayor que la ETo, o por encontrarse el suelo con contenidos de humedad elevados. La última aplicación de agua mediante el riego fue realizada el 31 de enero de 2011. La evapotranspiración de referencia en el periodo agrícola fue de 514,2 mm, la precipitación efectiva fue de 266,9 mm, la lámina de riego en T1 fue 353,8 mm, en T2 fue 265,4 mm y para T3 176,9 mm.

En la gestión 2011 -2012, los riegos se iniciaron también el 5 de noviembre de 2011 y concluyeron el 12 de febrero de 2012, ocurriendo 21 periodos de riego con frecuencias de 2 a 9 días, siendo que en algunos no se hizo el riego debido a que la precipitación efectiva fue mayor que la ETo. La evapotranspiración de referencia en el periodo agrícola alcanzó a los 439,7 mm (menor que en la gestión 2010 – 2011), la precipitación efectiva a los 296,6 mm (mayor que en la gestión 2010 – 2011), la lámina de riego en T1 fue 232,9 mm, en T2 fue 174,7 mm y para T3 116,5 mm. Las láminas de riego fueron inferiores que en la gestión 2010 - 2011.

En la gestión 2010 - 2011 en T1 se obtuvo el mayor rendimiento con 106,96 Mg/ha, en T2 se alcanzó a los 97,37 Mg/ha y en T3 el menor rendimiento con 90,46 Mg/ha, existiendo diferencias significativas entre tratamientos. En la gestión 2011 – 2012, en T1 se obtuvo el mayor rendimiento con 103,33 Mg/ha, en T2 se obtuvo 99,17 Mg/ha y en T3 el menor rendimiento con 79,17 Mg/ha. En términos generales los rendimientos de tomate fueron inferiores que la primera gestión, principalmente en T3, lo que puede atribuirse a que solamente se hicieron ocho cosechas debido al daño causado a los frutos por las lluvias.

En lo que respecta a la productividad del terreno y productividad del agua en el Cuadro 4 están consignados los valores promedio de volumen de agua aplicado; los rendimientos del cultivo por unidad de superficie y por unidad de agua aplicada (productividad del terreno y productividad del agua, respectivamente) para las gestiones agrícolas 2010 - 2011 y 2011 - 2012. Además se adicionó a la lámina total aplicada los 79 mm de agua aplicados al suelo en el mes de octubre, a todas las unidades experimentales (primera gestión) y 61 mm (segunda gestión), con la finalidad de asegurar un “prendimiento” uniforme de las plántulas de tomate.

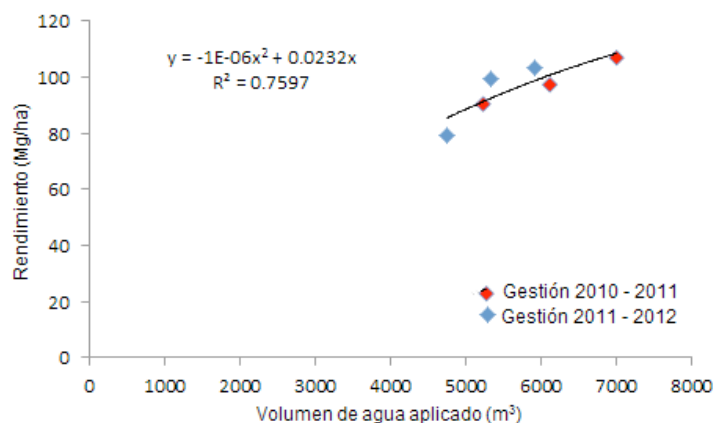
**Cuadro 4.** Relación entre volumen de agua y rendimiento de tomate e Índice de Eficiencia de Uso del Agua, gestión agrícola 2010 - 2011 y 2011 - 2012.

Tratamiento	Agua aplicada (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )		Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> )		Productividad del agua (kg m <sup>-3</sup> )	
	2010/2011	2011/2012	2010/2011	2011/2012	2010/2011	2011/2012
T 1	6997,6	5905,3	106,96	103,33	15,28	17,50
T 2	6113,1	5323,0	97,37	99,17	15,93	18,63
T 3	5228,5	4740,8	90,46	79,17	17,30	16,69

En la primera temporada cuando se consideran los promedios de los aportes de agua al suelo tanto por la precipitación pluvial efectiva así como por el riego, en T1 se tiene el mayor volumen de agua con 6997,6 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, siguiéndole T2 con 6113,1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y finalmente el T3 con el menor volumen de agua 5228,5 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Los índices de eficiencia de uso del agua promedio no siguen esa tendencia, siendo que en T3 se obtuvo el valor promedio más alto con 17,30 kg de tomate por m<sup>3</sup> de agua, en T2 se alcanzó 15,93 kg de tomate por m<sup>3</sup> de agua, prácticamente igual en que en T1 donde se obtuvo 15,28 kg de tomate por m<sup>3</sup> de agua.

Para la gestión 2011 – 2012, en T1 el volumen de agua aplicado fue 5905,3 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, siguiéndole T2 con 5323,0 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y el menor valor se obtuvo en T3 con 4740,8 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Respecto a los índices de eficiencia de uso del agua promedio, cabe indicar que al igual que la primera gestión, no siguieron esa tendencia, obteniéndose en T2 el valor promedio más alto con 18,63 kg de tomate por m<sup>3</sup> de agua, en T1 se alcanzó 17,50 kg de tomate por m<sup>3</sup> de agua y en T3 se obtuvo 16,69 kg de tomate por m<sup>3</sup> de agua.

En la Figura 3 se muestra la función producción, aplicación total de agua y rendimiento de frutos frescos de tomate. Se puede advertir que el coeficiente de determinación englobando a las dos gestiones agrícolas es aceptable, en tanto que cuando se analiza separadamente por gestión este parámetro es alto.



**Figura 3.** Función producción del cultivo de tomate para las gestiones agrícolas 2010 – 2011 y 2011 – 2012.

La razón por la que los rendimientos fueron superiores en la primera gestión agrícola puede atribuirse al hecho de que las cantidades totales de agua aplicadas fueron superiores en esta gestión, siendo que la planta respondió positivamente a este estímulo y no se registraron síntomas de exceso de agua en la planta ni en el suelo.

### 3.2.3. Cultivo de vid

En la gestión 2010 -2011, se empezó a regar las parcelas en el mes de noviembre, efectuándose 14 eventos de riego hasta el 4 de febrero de 2011, a partir de esa fecha los riegos se suspendieron, debido a que la precipitación efectiva fue mayor que la ETo, o por encontrarse el suelo con contenidos de humedad muy altos. La evapotranspiración de referencia en el periodo alcanzó a los 658,8 mm, la precipitación efectiva a los 383,4 mm, la lámina de riego en T1 fue 309,1 mm, en T2 fue 231,8 mm y para T3 154,5 mm.

En la gestión 2011 - 2012, los riegos se iniciaron la última semana del mes de noviembre de 2011 y concluyeron el 14 de abril, efectuándose 17 eventos de riego. La ETo en el periodo alcanzó a los 591,3 mm (menor que en la gestión 2010 - 2011), la precipitación efectiva a los 385,8 mm (similar a la gestión 2010 - 2011), la lámina de riego en T1 fue 241,9 mm, en T2 fue 158,1 mm y para T3 85,3 mm. Las láminas de riego fueron inferiores a la gestión 2010 - 2011.

El rendimiento promedio de uva de mesa para la gestión agrícola 2010 – 2011 fue de 4,44 kg/m<sup>2</sup>, equivalente a 44,4 Mg/ha, siendo el tratamiento T1 el mejor con un rendimiento de promedio de 5,24 Kg/m<sup>2</sup> y en el T3 se obtuvo el menor rendimiento (3,40 Kg/m<sup>2</sup>). Para la gestión 2011 – 2012 se tiene un rendimiento promedio de 5,28 kg/m<sup>2</sup>, equivalente a 52,8 Mg/ha, donde T1 arrojó el rendimiento promedio más alto (6,10 Kg/m<sup>2</sup>), T2 el más bajo (4,79 kg/m<sup>2</sup>).

El rendimiento de uva de la gestión agrícola 2011 - 2012 fue mayor que en la gestión 2010 - 2011, sin embargo, la calidad de las uvas de la primera gestión fue mejor, porque se obtuvo mayor peso de los racimos, mayor tamaño y peso de las bayas y mayor contenido de sólidos solubles.

Con relación a los valores promedio de volumen de agua aplicado versus rendimiento (productividad del terreno) y rendimiento versus volumen de agua aplicado (productividad del agua), también conocido como Índice de Eficiencia de Uso del Agua, para las gestiones agrícolas 2010 – 2011 y 2011

– 2012, en el Cuadro 5 se muestra dicha información. Cabe aclarar que se adicionó a la lámina total aplicada los 50 mm de agua aplicados al suelo en el “riego inicial”, a todas las unidades experimentales, entre los meses de septiembre a octubre.

**Cuadro 5.** Relación entre volumen de agua y rendimiento de uva e Índice de Eficiencia de Uso del Agua o Productividad del agua, gestión agrícola 2010 -2011 y 2011 - 2012.

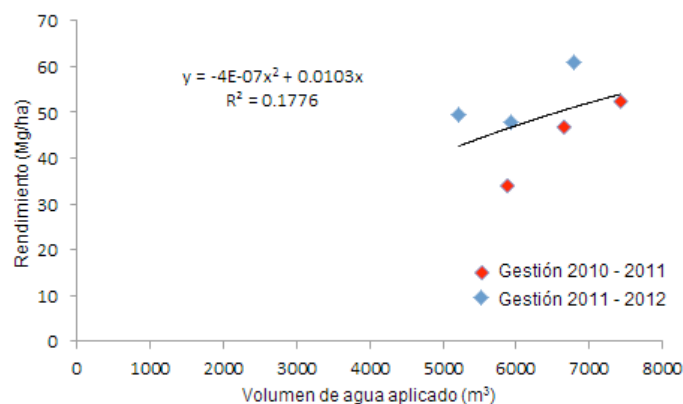
Tratamiento	Agua aplicada (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )		Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> )		Productividad del agua (kg m <sup>-3</sup> )	
	2010/2011	2011/2012	2010/2011	2011/2012	2010/2011	2011/2012
T 1	7.425	6.778	52,40	60,9	7,06	8,98
T 2	6.652	5.939	46,80	47,9	7,04	8,06
T 3	5.879	5.211	34,00	49,4	5,80	9,48

En la temporada 2010 - 2011, al considerar los promedios de los aportes de agua al suelo tanto por la precipitación pluvial efectiva así como por el riego, en T1 se tiene el mayor volumen de agua con 7425 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, siguiéndole T2 con 6652 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y finalmente T3 con el menor volumen de agua 5879 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Los índices de eficiencia de agua promedio siguen esa tendencia, siendo que en T1 se obtuvo el valor promedio más alto con 7,06 kg de uva por m<sup>3</sup> de agua, en T2 se alcanzó 7,04 kg de uva por m<sup>3</sup> de agua, prácticamente igual en que en T1, y en T3 se obtuvo 5,8 kg de uva por m<sup>3</sup> de agua.

Para la gestión 2011 - 2012, en T1 el volumen de agua aplicado fue 6778 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, siguiéndole T2 con 5939 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> y el menor valor se obtuvo en T3 con 5211 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Respecto a los índices de eficiencia de agua promedio, cabe indicar que no siguieron esa tendencia, obteniéndose en T3 el valor promedio más alto con 9,48 kg de uva por m<sup>3</sup> de agua, en T1 se alcanzó 8,98 kg de uva por m<sup>3</sup> de agua y en T2 se obtuvo 8,06 kg de uva por m<sup>3</sup> de agua.

Conforme los resultados alcanzados los mayores valores de eficiencia de uso del agua se obtuvieron para la gestión agrícola 2011 – 2012, y dentro de esta se alcanzó el valor más alto en T3, donde la lámina de agua fue equivalente al 50% de la ETo.

En la Figura 4 se muestra la función producción, aplicación total de agua y rendimiento de bayas frescas de uva. Se puede observar que el coeficiente de determinación englobando a las dos gestiones agrícolas es bajo, no obstante, cuando se analiza separadamente por gestión este parámetro es alto.



**Figura 4.** Función producción del cultivo de vid para las gestiones agrícolas 2010 - 2011 y 2011 - 2012.

En la segunda gestión agrícola los rendimientos y la eficiencia de uso de agua fueron superiores que en la primera gestión, lo que puede atribuirse al hecho de que en la primera gestión el riego fue paralizado en fecha 4 de febrero de 2011, en tanto que en la segunda esto ocurrió recién en fecha 14 de abril de 2012, es decir, que en esta última las plantas seguían recibiendo agua de riego, lo que retrasó la cosecha, haciendo que algunas bayas sean ya afectadas por las bajas temperaturas de otoño.

### 3.3. Conclusiones

En los tres cultivos papa, tomate y vid y en las tres zonas donde se implementaron los ensayos, el riego es imprescindible en el establecimiento de los cultivos.

Los cultivos de papa, tomate y vid respondieron positivamente a la aplicación adicional de agua, sin embargo, en el cultivo de la papa, el exceso de humedad en el suelo causó severos daños a los tubérculos.

El cultivo de tomate, fue el que mejor respondió a la aplicación adicional de agua. En la primera gestión en T1 se obtuvo la mayor productividad del terreno, en tanto que la segunda gestión en T2 se obtuvo la mayor productividad del agua.

En el cultivo de vid en la segunda gestión agrícola se obtuvieron los mayores valores para la productividad del terreno (en T1) y productividad del agua (en T3), sin embargo, la mayor calidad de bayas se alcanzó en la primera gestión debido a la paralización del riego semanas antes de la cosecha. En este cultivo, para una mayor productividad del agua y para una mejor calidad de los frutos, en años normales los riegos podrían suspenderse la primera semana de febrero, en función a la distribución de las lluvias.

## 4. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DISPONIBILIDAD DE AGUA

### 4.1. Selección del modelo hidrológico

Se optó por usar el modelo SWAT (“Soil and Water Assessment Tool”) en las dos cuencas, por la gran capacidad que tiene este modelo en simular varios procesos físicos en función al uso y capacidad de uso de la tierra y su influencia en la erosión y contaminación de la cuenca.

### 4.2. El modelo SWAT

El modelo SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo dentro de una determinada cuenca, en la generación de la cantidad y calidad de aguas superficiales y subterráneas, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con una variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo, en un tiempo prolongado.

#### 4.2.1. Descripción del modelo

El SWAT permite simular varios procesos físicos en una cuenca hidrográfica, para tal efecto la cuenca es subdividida en varias subcuencas. La información de entrada para cada subcuenca es organizada en las siguientes categorías: clima; unidades de respuesta hidrológica (HRUs); estanques/humedales; agua subterránea, canal principal y drenado de la subcuenca. La simulación hidrológica de la cuenca puede ser separada en dos divisiones mayores: la primera división es la Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico, que controla la cantidad de agua, de sedimentos, las cargas de alimento nutritivo y de pesticida al canal principal en cada subcuenca; la segunda división es la Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico, la cual define el movimiento del agua, sedimentos, etc. a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el vertedero.

#### 4.2.2. Requerimiento de información

El SWAT requiere datos climáticos, hidrológicos, geológicos, topográficos, cobertura de suelos y tipos de suelos, principalmente.

### 4.3. Definición de escenarios climáticos:

En Bolivia, anteriormente se generaron escenarios climáticos de acuerdo a los resultados del IPCC, los que son de uso generalizado para evaluación de los impactos en la agricultura, sin embargo, dichos escenarios están a una escala de cálculo de aproximadamente 250 km.

La generación de escenarios consistió en la utilización de series de tiempo de precipitación y temperatura, considerando las tasas de evolución de la media mensual de las variables climatológicas mencionadas, a partir de las cuales se realizaron estimaciones diarias.

Los resultados obtenidos corresponden a un periodo largo de tiempo para las estaciones climáticas de las cuencas del río Keka y del río Porvenir

Con dicha información generado se simuló con el modelo SWAT el caudal de la cuenca, considerando tres escenarios: un año normal, un año optimista (asumiendo que llueve 25% más que en un año normal), y año pesimista (asumiendo que llueve 25% menos que en un año normal). Los resultados alcanzados se muestran en la sección 4.4.3.

## 4.4. Modelación hidrológica de cuencas

### 4.4.1. Información utilizada en el modelamiento

#### a. Cuenca del río Keka

Inicialmente se hizo una caracterización de la zona de estudio en cuanto a fisiografía y topografía, se colectaron datos climáticos. Se recolectó información referida a la geología e hidrología de la zona, a la vegetación y cobertura del suelo. Con la información disponible se elaboró el modelo digital de elevación (DEM), posteriormente para determinar las características físicas del suelo y posterior uso en el SWAT se muestrearon los suelos en varios sitios de la cuenca, para luego efectuar la determinación del grupo hidrológico, determinación del número de curva, uso del programa SPAW para determinar las características físicas del suelo y manejo de la extensión SIG (IDW) para generar el mapa de tipo de suelos (Figura 5). Para el mapa de tipo de cobertura vegetal según tipo de suelo se emplearon métodos estereofotogramétricos de fotografías aéreas.

El área calculada para la cuenca del río Keka en los mapas topográficos es de 1000km<sup>2</sup>, mientras que el área delimitada automáticamente por el SWAT es de 1050,46km<sup>2</sup>. En la elaboración del mapa de suelos con sus respectivos atributos, se tomó como base el mapa del Plan de Manejo Integral de la Cuenca del río Keka, 2008,



Figura 5. Mapa de suelos de la cuenca del río Keka.

## b. Cuenca del río Porvenir

Se procedió de manera similar que en el anterior caso, para elaborar una diversidad de mapas tales como el mapa de uso de suelos (Figura 6).

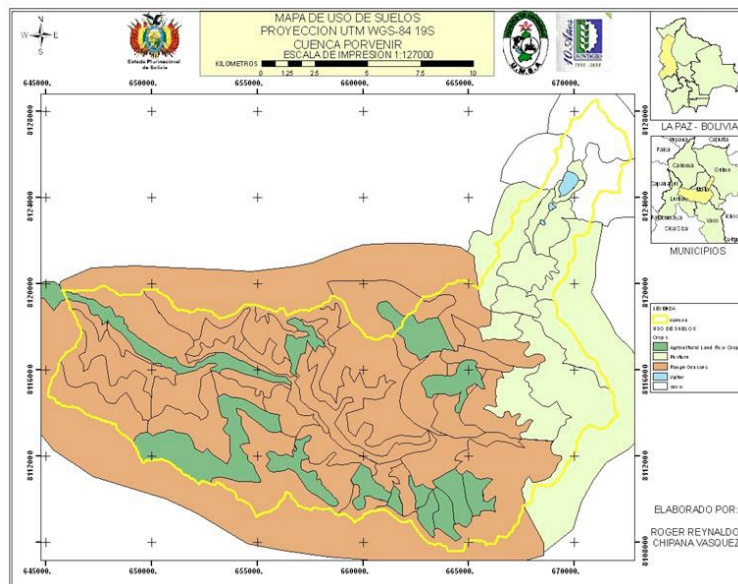


Figura 6. Mapa de uso de suelos cuenca del río Porvenir.

## 4.4.2. Calibración y validación del modelo

### a. Cuenca del río Keka

Realizada la primera simulación con los valores por defecto ingresados en SWAT se obtuvo datos donde existe demasiada diferencia entre el caudal simulado que está muy por debajo del caudal observado. Para mejorar este aspecto se probaron varios valores para el número de curva, contenido de agua disponible en el suelo, conductividad hidráulica del suelo. En el mismo hidrograma también se observa que los caudales descienden a niveles muy bajos en los meses de época seca (junio, julio y agosto). Posteriormente se hizo “correr” nuevamente el modelo, observándose el flujo simulado tiene un ajuste aceptable con los valores observados (Figura 7), lo que demuestra la gran capacidad que tiene el modelo en predecir los valores promedios mensuales de caudal.



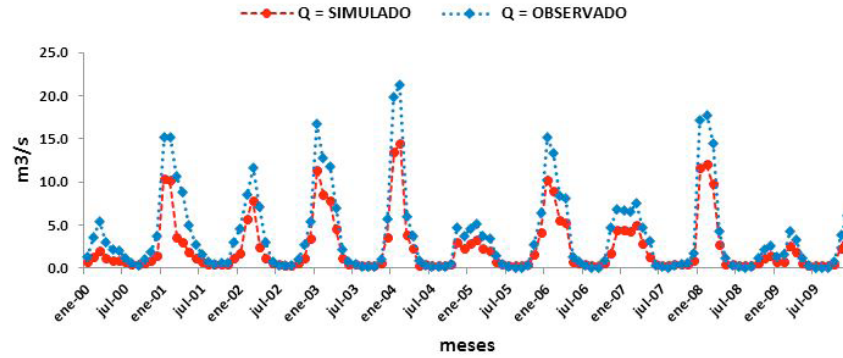


Figura 7. Hidrogramas resultante de la calibración 2002-2012 con el modelo SWAT (caudal simulado versus caudal observado) en la cuenca del río Keka.

### b. Cuenca del río Porvenir

Al “correr” el modelo SWAT se observó que los caudales simulados están muy por encima del caudal observado. Posteriormente se realizó la calibración, para ello se ajustaron los siguientes parámetros: coeficiente de percolación del acuífero; capacidad de agua disponible del suelo; número de curva; factor de compensación de evaporación del suelo; y conductibilidad hidráulica saturada del suelo.

Después de que cada parámetro fue ajustado, los caudales observados y simulados fueron validados empleando fórmulas para la estimación del error, lo que sirvió para la optimización de la función del objetivo. Observándose que el caudal simulado se compara favorablemente con los datos observados (Figura 8), los cuales son considerados como aceptables.

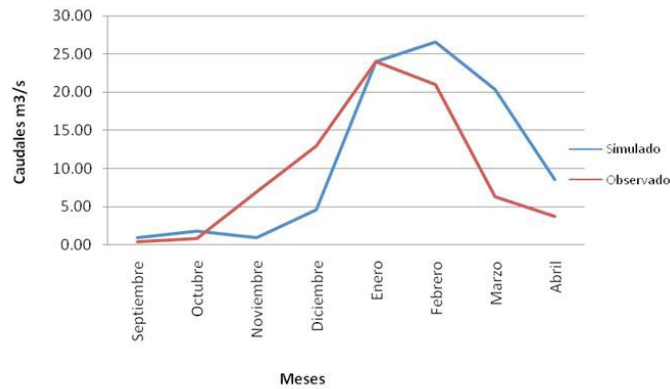


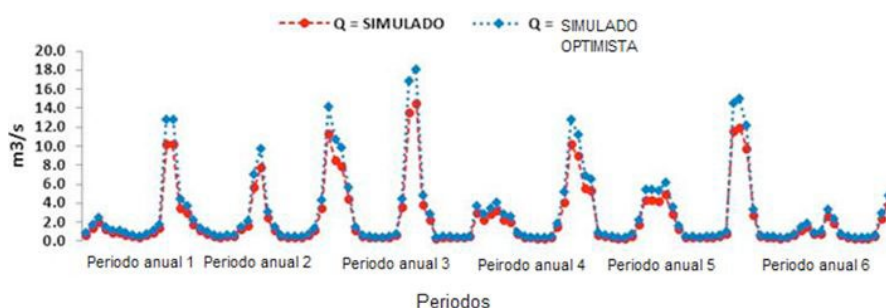
Figura 8. Hidrogramas resultante de la calibración 2002-2012 con el modelo SWAT (caudal simulado versus caudal observado) en la cuenca del río Porvenir.

En cuanto a los sedimentos, los datos simulados y observados de los sedimentos que arrastra el río Porvenir, tienen coeficientes de correlación aceptable.

### 4.4.3. Resultados de modelamiento bajo distintos escenarios climáticos

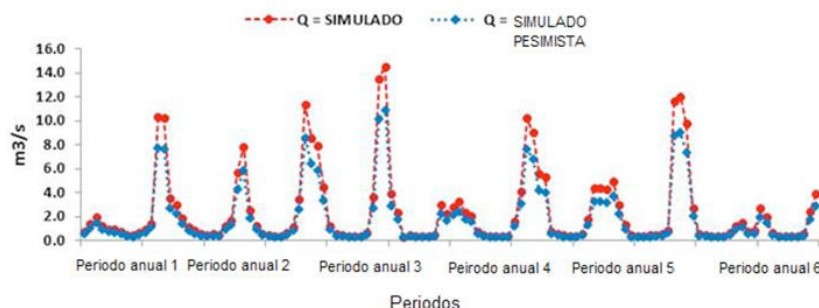
#### a. Cuenca del río Keka

En la Figura 9 se muestra los caudales históricos medios bajo escenario normal y optimista, simulados por el modelo SWAT, con caudal máximo extremo de 18,2 m<sup>3</sup>/s en el mes de febrero y caudal mínimo extremo de 0,4 m<sup>3</sup>/s en los meses de agosto y septiembre.



**Figura 9.** Hidrogramas resultante de caudales bajo un escenario optimista.

En la Figura 10 se muestra los caudales históricos medios bajo escenario normal y pesimista simulados por el modelo SWAT, con caudal máximo extremo de 10,9 m<sup>3</sup>/s en el mes de enero y caudal mínimo extremo de 0,3 m<sup>3</sup>/s en los meses de septiembre y octubre.



**Figura 10.** Hidrogramas resultante de caudales bajo un escenario pesimista.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el escenario optimista los caudales dentro la cuenca del río Keka no alcanzan grandes picos, debido a la forma de la cuenca y consecuentemente al mayor tiempo de concentración. Esto significa que no se esperarían desastres naturales de magnitud por crecidas y desbordes de ríos e inundaciones.

Respecto a la disponibilidad de agua para los cultivos, en el mes de mayor demanda de agua (noviembre), bajo un escenario optimista se tendría un caudal de 1,7 m<sup>3</sup>/s a la salida del vaso de la cuenca. En tal sentido para garantizar un adecuado y oportuno suministro de agua a los cultivos es necesario que el suelo capte y almacene la mayor cantidad de lluvia posible, además debe realizarse riegos iniciales, para ello se debe tener agua almacenada en embalses artificiales.

En el escenario pesimista en el mes de noviembre, se tendría un caudal de 0,3 m<sup>3</sup>/s a la salida del

vaso de la cuenca en la cuenca. Por tanto, en este periodo y la agricultura sería casi totalmente dependiente del riego, por lo que en forma imperativa debe contarse con embalses artificiales de agua.

## b. Cuenca del río Porvenir

Los caudales medios mensuales a la salida de la cuenca del río Porvenir, bajo distintos escenarios se muestran en la Figura 11

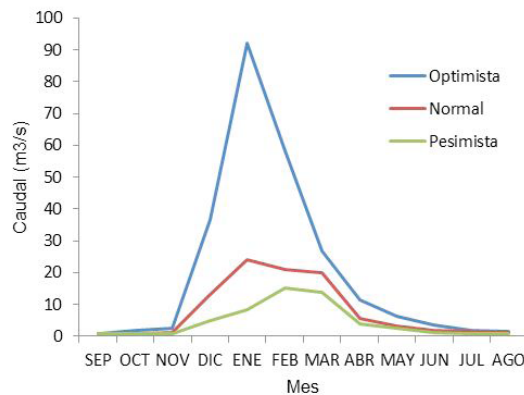


Figura 11. Caudales bajo escenario optimista, normal y pesimista en la cuenca del río Porvenir.

De acuerdo con los resultados obtenidos, bajo un escenario optimista en el mes de enero se tendría el caudal más alto, llegando a  $92,22 \text{ m}^3/\text{s}$ , en tanto que en el escenario pesimista el caudal máximo sería alcanzado en el mes de febrero con  $15,32 \text{ m}^3/\text{s}$ . Los caudales menores bajo los anteriores dos escenarios ocurrirían en el mes de septiembre y serían  $0,95 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $0,70 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. Los caudales alcanzan un pico, especialmente en el escenario optimista, lo que significa riesgos de gravedad para los pobladores de los valles ubicados en las zonas bajas de la cuenca del río Porvenir, puesto que estos elevados caudales causarían inundaciones mazamoras, derrumbes, poniendo incluso en peligro de las personas. Esto sería a causa de la topografía accidentada con fuertes pendientes de la cuenca, por la forma de esta y del menor tiempo de concentración.

En el escenario pesimista, la cantidad de agua disponible sería menor y se tendrían problemas de escasez en los meses de julio a noviembre, principalmente en las comunidades situadas en el sector de los valles, sin embargo, los efectos serían menos severos que en la cuenca del río Keka. Por tanto para proporcionar un adecuado y oportuno suministro de agua a los cultivos es necesario que el suelo capte y almacene la mayor cantidad de lluvia posible, además debe construirse embalses artificiales, fundamentalmente para contar con agua de riego entre los meses de julio a noviembre.

## 4.5. Conclusiones

La simulación del escurrimiento para las cuencas del río Keka y río Porvenir efectuado por el modelo SWAT fue adecuado toda vez que se obtuvo coeficientes de determinación aceptables cuando se



comparó los datos de caudales observados con los caudales simulados.

En el análisis de escenarios optimistas y pesimistas se observó que en la cuenca del río Keka en los años optimistas, existirían algunos periodos cortos con déficit hídrico en los cultivos, en tanto que en los años pesimistas la agricultura sería viable únicamente en caso de contar con embalses artificiales de agua para riego.

En la cuenca del río Porvenir, debido a las características típicas de los valles interandinos, los años optimistas podrían causar serios desastres naturales, tales como mazamoras, inundaciones, deslizamiento de tierras, etc., debiéndose tomar medidas de contingencia. En el año pesimista los efectos serían menos severos que en la cuenca del río Keka, toda vez que los caudales no disminuyen considerablemente, no obstante, también son necesarios embalses artificiales de agua para el periodo julio noviembre.

## 5. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS

### 5.1. Variación de la productividad del agua en los cultivos

En la primera gestión, incrementos en la aplicación de agua en el cultivo de papa tuvieron como correspondencia incrementos ligeramente superiores en el rendimiento debido probablemente a que no se dejó que el suelo se sature o esté próximo a la saturación, en tanto que en la segunda gestión, los incrementos de agua aplicados no tuvieron la misma correspondencia (proporcionalmente hablando) del rendimiento cuando el volumen de agua fue mayor a  $6542 \text{ m}^3$ , siendo que el suelo estaba con un contenido alto de humedad. Los agricultores de la zona optan por obtener la mayor productividad del terreno por dos razones: la primera porque el tamaño de sus parcelas es pequeño, variando entre  $300 \text{ m}^2$  a  $5000 \text{ m}^2$ ; segundo debido a que la papa es la base de la alimentación de los habitantes de esta región tanto para consumo o a través de la elaboración de subproductos como son el chuño y la tunta.

En el cultivo de tomate, en la gestión 2010 – 2011, incrementos en el volumen aplicado de agua tuvieron como efecto incrementos proporcionales casi similares del rendimiento, en tanto que en la gestión 2011 – 2012, incrementos en el volumen de agua aplicado no tuvieron la misma proporción en la correspondencia cuando el volumen de agua estaba por encima de  $5323 \text{ m}^3$ .


En el cultivo de vid, en la primera gestión, incrementos en la aplicación de agua tuvieron como efecto incrementos casi similares (proporcionalmente hablando) en el rendimiento, en tanto que en la segunda gestión, los incrementos de agua aplicados no fueron correspondidos con la misma tendencia, probablemente debido a la elevada humedad del suelo y al retraso del periodo de maduración. Al igual que en el anterior caso, los agricultores de esta región prefieren obtener el mayor rendimiento antes que el ahorro de agua, debido a las parcelas son pequeñas.

### 5.2. Estimación de la productividad del agua a nivel de cuenca

En la parte baja de la cuenca del río Keka el caudal promedio histórico en el mes más crítico (noviembre) es de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que demuestra el uso intenso del agua para riego en la zona alta y media. Si se considera que la superficie bajo riego es de  $3.500 \text{ ha}$ , ese caudal es insuficiente para un suministro adecuado de agua a las plantas. Lo mismo ocurre (déficit hídrico) si se plantea obtener un rendimiento expectable para la región de  $30 \text{ Mg/ha}$ , con una reducción en la aplicación de agua del 40% de lo requerido, con lo que no se solucionaría el problema de escasez de agua en algunas épocas (fundamentalmente en el periodo septiembre a noviembre), pero si habría un incremento en cuanto a productividad del agua en la cuenca, aún a sabiendas además que al agricultor le interesa obtener el máximo rendimiento.

La alternativa más viable es la construcción de embalses artificiales de agua en la parte alta de la cuenca, para regular el caudal del río, toda vez que los caudales promedios más altos se dan en el mes de febrero con  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  (oferta de agua muy superior a la demanda actual), descargando sus aguas el río Keka, al lago Titicaca.

Con relación a la productividad del agua a nivel de la cuenca del río Porvenir, el razonamiento efectuado para la cuenca del río Keka es válido, puesto que el caudal en la parte baja de dicha cuenca en el mes más crítico (septiembre) fue de  $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que significa una intensa actividad del riego aguas arriba.



Si se considera que en la cuenca se riega en torno a 1579 ha, los déficits de agua que existen en la zona en los meses de septiembre a noviembre son preocupantes, por tanto si se opta por una mayor productividad del agua a nivel de cuenca, reduciendo el rendimiento de los cultivos (específicamente los cultivos de tomate y uva), el ahorro de agua si bien sería importante, no sería suficiente para superar el déficit existente en la cuenca en el periodo señalado, y además porque el agricultor tiende a obtener el mayor rendimiento en desmedro del ahorro de agua.

Al igual que en la cuenca del río Keka, la alternativa más viable es la construcción de embalses artificiales de agua, para regular el caudal del río porvenir, puesto que los caudales promedios más altos se dan en el mes de enero con 39,2 m<sup>3</sup>/s (oferta de agua que sobrepasa con creces a la demanda actual), lo que provoca daños como mazamorras, inundaciones y deslizamientos de terrenos.

### **5.3. Estrategias para el manejo del agua bajo escenarios climáticos probables.**

Las estrategias para el riego deficitario controlado para las dos cuencas, con sus particularidades son: Incremento del intervalo entre riegos; uso de cobertura muerta en el suelo; labranza mínima; riego en horarios de menor demanda hídrica; uso de barreras rompe-vientos; disminución de la lámina de riego por periodos fenológicos; riego parcial de la zona radicular; quiebra de la dormancia del cultivo de vid

### **5.4. Conclusiones**

Los cambios en la productividad del agua, fueron diferentes por cultivos y por épocas, puesto incrementos en el volumen de agua aplicado se reflejaban en incrementos proporcionales del rendimiento, no obstante, principalmente cuando el suelo estaba con una elevada humedad, incrementos en agua aplicada tendían a un decremento del rendimiento (en términos proporcionales) o incidían en la calidad del fruto, tal es el caso de la papa y uva.

Los agricultores de las zonas en estudio, por poseer pequeñas superficies de terreno optan por obtener la mayor productividad del terreno en lugar del agua.

A nivel de cuenca, si se opta por regar los cultivos en base a la mayor productividad del agua, existiría un incremento en la productividad del agua a nivel de cuenca, pero no se solucionaría el problema de escasez de agua en algunas épocas, por lo que la alternativa más viable es la construcción de embalses artificiales de agua.

Bajo un escenario optimista en la cuenca del río Keka se tendría un incremento de los rendimientos de los cultivos, pero sin prescindirse del riego en los meses de septiembre a noviembre. En cambio en la cuenca del río Porvenir, bajo un escenario optimista, los excesivos caudales representarían un peligro para los habitantes de los valles por las mazamorras, desbordes e inundaciones

Bajo un escenario pesimista, en ambas cuencas el suceso o fracaso de la actividad agrícola estaría supeditada a la práctica del riego durante toda la gestión agrícola.

## 6. PROGRAMAS DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO EN BOLIVIA.

### 6.1. Presentación en Congresos, Seminarios, Talleres, Charlas Técnicas, Cursos y Días de Campo

Fueron varias las actividades, programas de difusión y eventos de presentación de resultados del Proyecto, entre los que podemos mencionar:

- Curso sobre “Metodologías de Investigación en Riego” realizada por el Dr. Henoque Ribeiro da Silva, en fecha 31 de marzo del 2010; en la ciudad de Buenos Aires, Argentina entre el 7 al 14 de marzo de 2010 se llevó a cabo un curso sobre “Modelo Hidrológico Arc SWAT”
- Primer Congreso Boliviano de Riego “Regar y Producir Más con Menos Agua”, evento celebrado en la ciudad de La Paz, Bolivia del 12 al 14 de julio de 2010
- Curso sobre necesidades de agua a los cultivos, a cargo del Dr. Luis Santos Pereira
- Seminario en Buenos Aires, Argentina en fechas 3 al 5 de abril del 2011, tema “Modelación Hidrológica en las Cuencas Estudiadas en cada País”
- Reunión del Proyecto FONTAGRO en Santiago de Chile del 24 al 26 de mayo del 2011
- Seminario en Chillan, Chile del 25 al 29 de julio del 2011, tema “Modelación Hidrológica y Escenarios Climáticos”
- Reunión del Proyecto del 28 de septiembre al 1 de octubre del 2011, en Montevideo, Uruguay
- Curso realizado por el Dr. Theib Oweis (ICARDA) para miembros del equipo del Proyecto FONTAGRO, con el tema de productividad del agua, los días 30, 1 y 2 de julio del año 2012, en La Paz, Bolivia
- Reunión del Proyecto del 16 al 17 de mayo del 2013, en Santiago de Chile
- Congreso Boliviano de Riego “Uso Eficiente del Agua como Respuesta al Cambio Climático”, Realizado en Tarija, Bolivia, el año 2011.
- Taller de socialización de resultados en las comunidades de El Porvenir, Villa San Juan – municipio de Luribay y Barco Belén del municipio de Achacachi del departamento de La Paz, realizado en periodos comprendidos entre el 1 de octubre de 2012 al 30 de noviembre de 2012.

En dichos eventos también se hizo la presentación y entrega de cartillas sobre manejo del riego en los cultivos de papa, vid y tomate.

## 6.2. Participación en Seminario Internacional de cierre en Salto Grande, Uruguay

El Coordinador del Proyecto en Bolivia, participó en el Seminario Final del Proyecto FONTAGRO, realizado en la ciudad de Salto, Uruguay entre los días 6 al 10 de noviembre de 2012.

## 6.3. Manual de estrategias del manejo del agua de riego para los cultivos seleccionados.

Documento en elaboración, en cuyo contenido se consideran estrategias de riego para cada cultivo estudiado en el proyecto, en Bolivia y otros países; y cuya edición se efectuará dentro del presente año.

## 6.4. Publicaciones científicas.

Mediante el Proyecto FONTAGRO se apoyó varias investigaciones de Trabajo de fin de Grado y de Post Grado de la Facultad de Agronomía de la Universidad Mayor de San Andrés, dichos trabajos son:

- “Estimación de los escurrimientos y sedimentos en la cuenca del río El Porvenir, mediante la aplicación del modelo SWAT”; “Aplicación del modelo SWAT en la predicción de caudales mensuales con fines agrícolas en la cuenca del Río Keka”
- “Evaluación del comportamiento del cultivo de papa bajo condiciones de riego deficitario con tres láminas de agua en la comunidad de Barco Belén, Provincia Omasuyos del departamento de La Paz”
- “Evaluación de diferentes tratamientos hídricos, en el cultivo de la Vid (Variedad Moscatel de Alejandría), a través de la programación de riego deficitario controlado, en el municipio de Luribay”; “Evaluación de la productividad del agua en el cultivo de vid en el municipio de Luribay”.

Todas estas investigaciones darán origen a artículos científicos, que serán publicados en revistas científicas en el transcurso de los siguientes meses.

## 6.5. Publicaciones divulgativas.

A nivel de publicaciones divulgativas para los agricultores de las cuencas del río Keka y río Porvenir se tiene: “Cartilla sobre manejo del riego en el cultivo de papa”; “Cartilla sobre el manejo del riego en el cultivo de uva”; y “Cartilla sobre el manejo del riego en el cultivo de tomate”.



## 7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

La simulación del escurrimiento para las cuencas del río Keka y río Porvenir efectuado por el modelo SWAT fue adecuado.

En las cuencas del río Keka y río Porvenir, para el establecimiento adecuado de los cultivos es imprescindible el riego.

En las dos cuencas, los riegos pueden ser paralizados o ser practicados con menor frecuencia en la época de lluvias.

Los rendimientos obtenidos de los cultivos de papa, tomate y vid fueron muy superiores a la media nacional, por tanto existe grandes posibilidades de mejorar la productividad del agua, previa concientización de los regantes.

En el cultivo de vid se debería usar inductores para quebrar la dormancia y adelantar la época de cosecha, para evitar las temperaturas bajas otoñales, y mejorar la calidad de los frutos.

Bajo un escenario optimista en la cuenca del río Keka, existirían algunos periodos cortos con déficit hídrico, en tanto que en el escenario pesimista la agricultura sería viable únicamente en caso de contar con embalses artificiales de agua para riego.

En la cuenca del río Porvenir en el escenario optimista los elevados caudales podrían causar desastres naturales en las zonas bajas. En el escenario pesimista los efectos serían menos severos que en la cuenca del río Keka, toda vez que los caudales no disminuyen considerablemente, no obstante, también son necesarios embalses artificiales de agua.

Los cambios en la productividad del agua, fueron diferentes por cultivos y por épocas, situación afectada negativamente cuando el suelo estaba con un alto contenido de humedad.

Los agricultores de las zonas en estudio, al poseer pequeñas superficies de terreno, optan por obtener la mayor productividad del terreno en desmedro del ahorro de agua.

A nivel de cuenca, si se opta por regar los cultivos en base a la mayor productividad del agua, existiría un incremento en este indicador, sin embargo, no se solucionaría el problema de escasez de agua.





## Resumen Extendido Chile

“Evaluación de los cambios en la productividad del agua, frente a diferentes escenarios climáticos, en distintas regiones del Cono Sur”

Código: FTG-8042/08



## EQUIPO DE TRABAJO

1. INTRODUCCIÓN
2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS: LÍNEA BASE
  - 2.1. Situación actual de los sistemas productivos (de todas las cuencas)
    - 2.1.1. Cuenca del Limarí
    - 2.1.2. Cuenca del Aconcagua.
    - 2.1.3. Cuenca del Cachapoal.
  - 2.2. Situación actual de la dotación y demanda de agua en las cuencas seleccionadas.
    - 2.2.1. Cuenca del Limarí
    - 2.2.2. Cuenca del Aconcagua.
    - 2.2.3. Cuenca del Cachapoal.
  - 2.3. Caracterización de la infraestructura de riego existe en las cuencas.
    - 2.3.1. Cuenca del Limarí
    - 2.3.2. Cuenca del Aconcagua.
    - 2.3.3. Cuenca del Cachapoal.
3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESTRATEGIAS DE RIEGO (ENSAYOS DE CAMPO)
  - 3.1. Metodología experimental
  - 3.2. Resultados y discusión (Funciones de producción)
  - 3.3. Conclusiones
4. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DISPONIBILIDAD DE AGUA
  - 4.1. Selección del modelo hidrológico
  - 4.2. El Modelo SWAT
    - 4.2.1. Descripción del modelo
    - 4.2.2. Requerimientos de información
  - 4.3. Definición de escenarios climáticos.
    - 4.3.1. Metodología general
    - 4.3.2. Generadores climáticos
    - 4.3.3. Resultados (Resumen de los escenarios por cuenca)
  - 4.4. Modelación hidrológica de cuencas
    - 4.4.1. Cuenca del Limarí
      - 4.4.1.1. Información utilizada en el modelamiento
      - 4.4.1.2. Calibración y validación del modelo
      - 4.4.1.3. Resultados del modelamiento bajos distintos escenarios climáticos
    - 4.4.2. Cuenca del Cachapoal
      - 4.4.2.1. Información utilizada en el modelamiento
      - 4.4.2.2. Calibración y validación del modelo
      - 4.4.2.3. Resultados del modelamiento bajos distintos escenarios climáticos
  - 4.5. Conclusiones
5. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS
  - 5.1. Variación de la productividad del agua en los cultivos
  - 5.2. Estimación de la variación de la productividad del agua a nivel de cuenca
  - 5.3. Estrategias para el manejo del agua bajo escenarios climáticos probables
  - 5.4. Conclusiones



6. PROGRAMAS DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO
  - 6.1. Lanzamiento y difusión inicial del proyecto (tríptico)
  - 6.2. Desarrollo y mantenimiento de sitio Web
  - 6.3. Presentación en Congresos, Seminarios, Talleres, Charlas Técnicas y Días de Campo
  - 6.4. Planificación y desarrollo de Seminario Internacional
  - 6.5. Manual de estrategias del manejo del agua
  - 6.6. Publicaciones científicas.
  - 6.7. Publicaciones divulgativas
  - 6.8. Talleres de Seguimiento Técnico de proyectos FONTAGRO
  
7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

## EQUIPO DE TRABAJO

### Investigadores

- Alfonso Osorio Ulloa, Ingeniero Agrónomo, M. Sc.
- Gabriel Selles van Shouwen, Ingeniero Agrónomo, Dr.
- Raúl Ferreyra Espada, Ingeniero Agrónomo, M. Sc.
- Alejandro Antúnez Barría, Ingeniero Agrónomo, Ph. D.
- Sofía Felmer Echeverría, Ingeniero Agrónomo.
- Hamil Uribe Cifuentes, Ingeniero Civil Agrícola, Dr.
- Pilar Gil Montenegro, Ingeniero Agrónomo.
- Marcela Burgos Robles, Ingeniero Agrónomo.
- Felipe Riquelme Merino, Ingeniero Civil Agrícola.
- Karina Sturla Laso, Ingeniero en Recursos Naturales Reenovables.
- Jorge Espinosa Marín, Ingeniero Agrónomo, Tesista para Magister.
- Rodrigo Avilés Rodríguez, Ingeniero Civil Industrial.
- Luis Morales Salinas, Dr. en Ciencias Ambientales.

### Asesores internacionales

- Theib Oweis, Dr. ICARDA Siria
- Luciano Mateos, Dr. IAS-CSIC, España

### Apoyo Técnico

- Alex Ortiz Núñez
- Edson León Hurtado
- Ives Durocher Rojas
- Beatriz Fuentes Orellana

### Alumnos Tesistas y Practicantes

- Gerson Vega Gálvez, Tesista de la Universidad Viña del Mar
- Maximiliano Martínez Gallegos, Técnico Agrícola de Nivel Superior, Instituto Santo Tomás.
- Rodrigo Cortés Ramírez, Técnico Agrícola de Nivel Superior, Instituto Santo Tomás.
- Camila Cisterna Araya, Técnico Agrícola de Nivel Superior, Instituto Santo Tomás.
- Luis Araya González, Técnico Agrícola de Nivel Superior, Instituto Santo Tomás.
- Daniel Cerda Araya, Técnico Agrícola, Liceo Agrícola Tadeo Perry Barnes, Ovalle.
- Franco Peralta Alburquerque, Técnico Agrícola, Liceo Agrícola Tadeo Perry Barnes, Ovalle.
- Raúl Barraza Villalón, Ingeniería Agronómica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Josefina Santana Toro, Ingeniería Agronómica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.



## 1. INTRODUCCIÓN

Chile es un país que presenta una gran variedad de condiciones climáticas. En el norte, existe una situación de extrema aridez o desértica, donde las precipitaciones son muy escasas o prácticamente no ocurren; en contraste con la zona sur o austral donde las precipitaciones son abundantes y cercanas a los 4.000 milímetros anuales; generándose en la zona intermedia una variedad de condiciones climáticas que permiten el desarrollo de una gran diversidad de cultivos, con demandas diferentes en cuanto a requerimientos de riego. Desarrollándose la agricultura, principalmente en las riberas de cursos de agua, los cuales han conformado en el tiempo cuencas hidrográficas de características especiales de vegetación, topografía, pendiente y asentamientos humanos.

Independientemente de esta diversidad climática que presenta el país, en el último tiempo se han producido variaciones importantes del clima en todas las regiones de Chile; que en general se ha manifestado en una tendencia a la disminución de precipitaciones, lo cual se ha hecho más crítico en la zona árida y semiárida. Por otro lado, en cada temporada el comportamiento de las temperaturas se ha manifestado muy variable, generando problemas fenológicos en las especies cultivadas.

Con el desarrollo de este proyecto, se efectuó un estudio detallado de tres cuencas hidrográficas del país: **Limarí, Aconcagua y Cachapoal**; las cuales presentan condiciones diferentes de escurrimiento de agua y de condiciones climáticas; generándose información sobre la vulnerabilidad que presenta cada una de ellas respecto a situaciones de escasez de agua y su impacto sobre las actividades productivas, especialmente la agricultura de riego.

Durante la ejecución se obtuvo gran cantidad de información sobre ellas, respecto a: estadística de caudales, caracterización climática, estructura de cultivos y métodos de riego, embalses, canales, inversión en riego, organización de regantes, calidad de agua, y otros; todo lo cual fue necesario en la implementación del modelo de simulación adoptado. Además se establecieron ensayos experimentales, en campo de agricultores, con la finalidad de evaluar el comportamiento de los cultivos ante diferentes condiciones de aporte de agua o de condiciones de estrés, determinándose funciones agua/rendimiento o funciones de producción para los distintos cultivos ensayados: vides pisqueras y de mesa, paltos y cerezos. Los resultados permitieron definir umbrales posibles de restricción de agua, con un cierto efecto sobre rendimiento y calidad de la fruta.

Por último se desea agradecer a todas las instituciones y agricultores que colaboraron en la realización del proyecto, ya sea aportando información o facilitando sus predios para la realización de los ensayos de campo.



## 2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS: LÍNEA BASE

En el caso de Chile se determinó trabajar entre las regiones de Coquimbo y B. O'Higgins, área que concentra aproximadamente el 80% de la fruticultura de exportación. Específicamente se seleccionaron las cuencas de los ríos Limarí, Aconcagua y Cachapoal, por presentar condiciones distintas desde el punto de vista hidrológico, climático, territorial y productivo, quedando reflejado con ello la diversidad de ambientes que se deseaba estudiar y cuyos resultados pudiesen extrapolarse a otras cuencas similares (ver Figura 1).

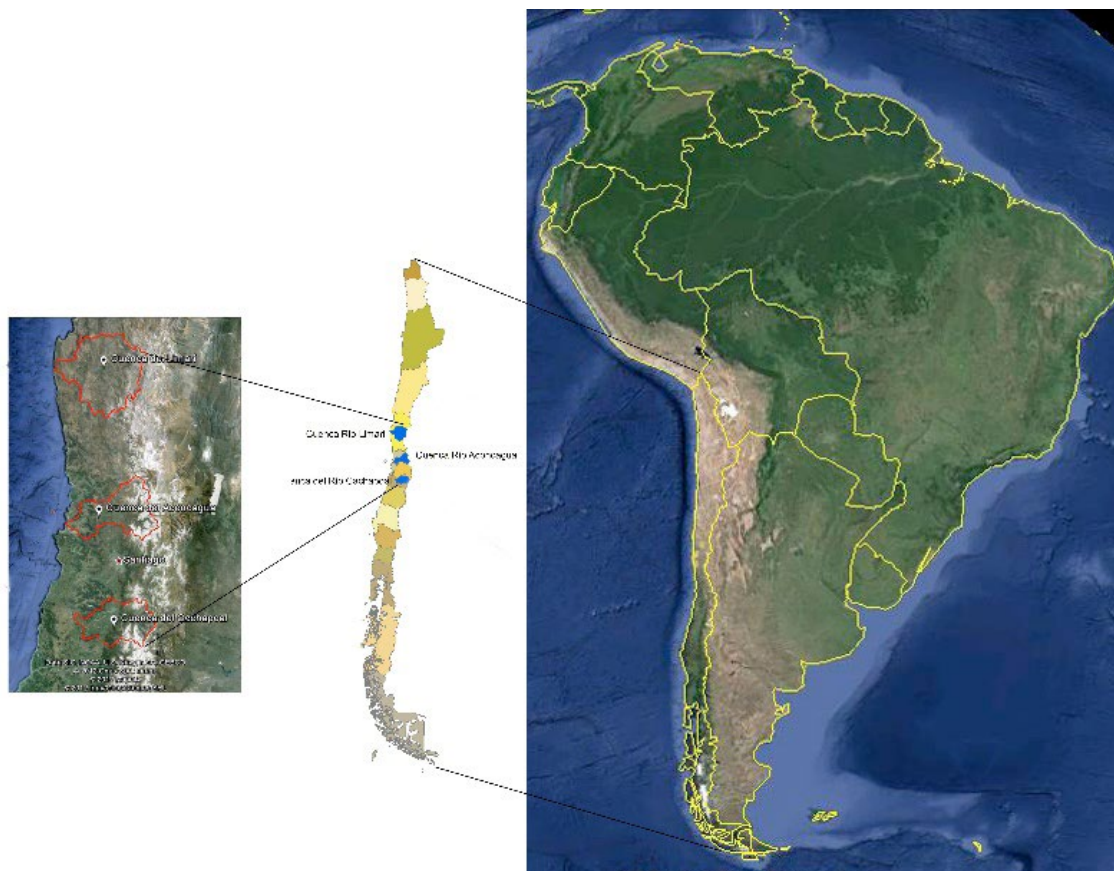



Figura 1. Localización geográfica de las cuencas seleccionadas en Chile

En cada cuenca se plantearon trabajos en Riego Deficitario Controlado (RDC), orientados fundamentalmente a las siguientes especies: vides pisqueras (Limarí), vides de mesa (Limarí y Aconcagua), paltos (Aconcagua) y cerezos (Cachapoal); las que constituyen el pilar de la fruticultura de exportación de las áreas seleccionadas

### 2.1. Situación actual de los sistemas productivos.

#### 2.1.1. Cuenca del Limarí.

Esta cuenca se encuentra situada entre las coordenadas UTM Norte: 6.520.611 a 6.657.107 y las coordenadas UTM Este: 240.012 a 386.331. Respecto a sus límites naturales, se encuentra limitada



por el norte por la línea divisoria de aguas que la separa de la cuenca del río Elqui y de la cuenca costera Elqui-Limarí, por el sur por la línea divisoria de aguas que la separa de la cuenca del río Choapa y de la cuenca costera Limarí-Choapa. Al este, se encuentra limitada por la Cordillera de Los Andes y al oeste con el Océano Pacífico. La cuenca tiene una extensión estimada de 11.707,93 km<sup>2</sup>.

Presenta tres tipos de climas, el Semiárido con nublados abundantes, Semiárido templado con lluvias invernales y Semiárido Frío con lluvias invernales. En general, esta cuenca se encuentra bajo la influencia de un bioclima con escasez de precipitaciones y durante nueve meses del año presenta déficit hídrico.

Con respecto al suelo, el 20,89% de la superficie total, posee información de suelo. La serie de suelo más importante es Tuquí (TQU), suelo sedimentario, ligeramente profundo, de textura franco arcillosa limosa, que alcanza el 36,17% de la superficie total ubicándose principalmente en la comuna de Ovalle. Con respecto a la capacidad de uso, el 84,21% de la superficie corresponde a la clase VI.

En la misma línea que la capacidad de uso, la aptitud de regadío con mayor representatividad es la 6 correspondiente a suelos no aptos para regadío, y se ubican en la misma zona poniente.

Las principales actividades económicas según el informe elaborado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) sobre el aporte en miles de US\$, a través de exportaciones, de los distintos sectores productivos a nivel de región, son la minería y la agricultura.

En la zona de riego, la principal actividad es la fruticultura, seguido por viñas y parrones y en tercer lugar se encuentra el rubro hortícola. El cultivo de frutales, se concentra en la comuna de Ovalle y Monte Patria, seguidos por Combarbalá.

En la cuenca, existe una vasta zona de secano, cuyos principales cultivos son forrajeras.

## 2.1.2. Cuenca del Aconcagua

Esta cuenca se encuentra situada entre las coordenadas UTM Norte: 6.327.481 a 6.430.757 y las coordenadas UTM Este: 260.776 a 407.606. Respecto a sus límites naturales, se encuentra limitada por el norte de este a oeste por la línea divisoria de aguas que la separa de la cuenca del río Choapa, río Ligua y de la cuenca costera Ligua-Aconcagua; por el sur por la línea divisoria de aguas que la separa de la cuenca del río Maipo y de la cuenca costera Aconcagua-Maipo; al este, se encuentra limitada por la Cordillera de Los Andes, y al oeste, con el Océano Pacífico. La cuenca tiene una extensión estimada de 7333,81 km<sup>2</sup>.

Los climas que se distinguen en la cuenca del Río Aconcagua corresponden a los climas: Templado de tipo Mediterráneo con estación seca prolongada y Frío de altura en la Cordillera de los Andes.

El 13,4% de la información de suelos de la cuenca está disponible, sin embargo se sabe que el área oriente de la cuenca no posee mayor información debido a su relieve. El suelo más importante es Lo Vázquez (LD), suelo evolucionado, moderadamente profundo a profundo, de textura franco arcillosa arenosa que corresponde al 31,6% de la superficie, seguida por la serie Pocuro (PCR), suelo de textura franco arcillosa, que corresponde al 17% de la superficie.

Con respecto a la capacidad de uso, los suelos de tipo VII, correspondiente al 32% de la superficie y se ubican principalmente en el área Sur-Poniente. Sin embargo, las capacidades de suelo que la siguen son los del tipo III con un 24%, la capacidad I con un 17% y la capacidad II con un 13%. En

la misma línea que la capacidad de uso, los suelos con mejor aptitud de regadío se ubican en el centro de la cuenca, sin embargo la aptitud más representativa es la 5 con un 37%, suelos que bajo condiciones especiales son aptos.

Las principales actividades económicas según el informe elaborado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) sobre el aporte en pesos, a través de exportaciones, de los distintos sectores productivos a nivel de región, son la minería, la agricultura y la industria.

Los principales cultivos son frutales y hortalizas, que juntos suman el 69,6% de la superficie cultivada en el año 1997 y el 75% de dicha superficie en el año 2007.

### 2.1.3. Cuenca del Cachapoal.

Esta cuenca se encuentra situada entre las coordenadas UTM Norte: 6.159.816 a 6.236.352 y las coordenadas UTM Este: 275.508 a 407.142. Respecto a sus límites naturales, se inserta en la cuenca del río Rapel y es la suma de la subcuenca del río Cachapoal Bajo y Cachapoal Alto, está limitada por el norte de este a oeste por la línea divisoria de aguas que la separa de la cuenca del río Maipo y la subcuenca estero Alhué, por el sur por la línea divisoria de aguas que la separa de la subcuenca del río Tinguiririca Alto y de la subcuenca Tinguiririca Bajo. Al este, se encuentra limitada con la Cordillera de Los Andes y al oeste con la subcuenca del río Rapel. La cuenca tiene una extensión estimada de 6.361,93 km<sup>2</sup>

Su clima predominante corresponde al Clima Templado Mediterráneo, el cual presenta variaciones por efecto de la topografía local. En la costa se presenta nuboso, mientras que hacia el interior debido a la sequedad experimenta fuertes contrastes térmicos. Las precipitaciones son mayores en la costa y en la Cordillera de Los Andes, debido al relieve que no deja entrada a los vientos húmedos Oceánicos.

En la cuenca sólo el 31,89% posee información de suelos, debido al relieve. Por lo que la información que se posee de la cuenca corresponde a planicies.

Del total de suelos la capacidad de uso II corresponden al 32,42% de la superficie y se ubican principalmente en el área centro-poniente y centro-sur. Seguidos por suelos de capacidad de uso III y I, con un 18,5% y 16,9% de la superficie disponible de suelos.


En la misma línea que la capacidad de uso, la aptitud de regadío 1 y 2 corresponden al 29,83% y 20,6 % cubriendo aproximadamente el 50% de la superficie disponible. Sin embargo, la aptitud de regadío 6 cubre el 22,67% de la superficie disponible.

Las principales actividades económicas según el informe elaborado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) sobre el aporte en pesos, a través de exportaciones, de los distintos sectores productivos a nivel de región, son la minería, la agricultura y la industria. En la agricultura, se destacan cultivos de frutales, cereales y viñas y parronales viníferos.

## 2.2. Situación actual de la dotación y demanda de agua en la cuenca.

### 2.2.1. Cuenca del Limarí

“El régimen hidrológico del río Limarí es nivo – pluvial. En sus afluentes de cabecera se aprecia un



claro régimen nival, el cual se observa en la mayoría de sus afluentes y subafluentes de importancia, como los ríos Hurtado, Los Molles, Grande, Mostazal, Tascadero, Cogotí, Combarbalá y Pama. Por otro lado, en la parte baja de algunos ríos la influencia pluvial se hace importante, hasta el punto que el último afluente de importancia del Limarí antes de su desembocadura, el estero Punitaqui, presenta un claro régimen pluvial. El régimen nivo – pluvial se observa en la parte baja del río Grande, del Cogotí y del Limarí. Se aprecia un régimen mixto en la parte baja del río Huatulame” (Consultora CADE-IDEPE, 2004a, p.20).

Los caudales de los ríos Hurtado, Cogotí y Grande están regulados por los embalses Recoleta, Cogotí y Paloma, con capacidades de 100, 150 y 750 millones de m<sup>3</sup>, respectivamente. Estos embalses interconectados entre sí más una vasta red de canales conforman el denominado Sistema Paloma.

### **2.2.2. Cuenca del Aconcagua.**

El régimen del río Aconcagua es nivo - pluvial, ya que en la parte alta de su cuenca, donde están sus ríos tributarios de alta cordillera: Colorado, Juncal y Blanco, presenta un régimen nival; en cambio en la parte baja de la cuenca comienza a tomar importancia la influencia pluvial.

### **2.2.3. Cuenca del Cachapoal.**

“El río Cachapoal, tiene sus cabeceras a los pies de las cumbres englaciadas Pico del Barroco y Nevado de Los Piuquenes donde lo alimenta una larga lengua de ventisquero. En el ámbito cordillerano se le unen varios tributarios de importancia, de los cuales los principales son los ríos Las Leñas, Cortaderal, Los Cipreses y, el más importante, el río Pangal. Cerca del pueblo minero de Coya recibe al río homónimo y más abajo, cerca del valle central, al Claro (Cachapoal). Próximo a esta última confluencia se encuentra la Central Hidroeléctrica Sauzal, de 76.000 KW de potencia, que fue una de las primeras construidas en el país. En una pronunciada curva hacia el norte, en plena depresión Intermedia, se encuentra la ciudad de Rancagua en su margen norte. Luego el Cachapoal vuelve al SW, siguiendo el pie oriental de la cordillera de la Costa recibe el aporte del estero La Cadena y cerca de la localidad de Peumo se le une el río Claro (Tinguiririca), que se origina en la laguna de Los Cristales, la que ha sido peraltada para formar el pequeño embalse de ese nombre. De Peumo al embalse el río Cachapoal tiene un recorrido de 34 km, en el cual recibe algunos esteros que drenan el Valle Central, como el Antivero o Zamorano” (Consultora CADE-IDEPE, 2004c, p.7).

## **2.3. Caracterización de la infraestructura de riego existente en la cuencas.**

### **2.3.1. Cuenca del Limarí**

La infraestructura de riego en la cuenca posee tres embalses mayores y numerosos embalses pequeños y canales. Para asociar los cultivos al tipo de riego se observarán los cambios entre los años 1997 y 2007, en base al censo agropecuario, se puede decir que la distribución del tipo de riego ha variado. Anteriormente el riego en su mayoría gravitacional con un 63,8 %, pero ahora es mayoritariamente microriego con un 53,9% de la superficie bajo esa infraestructura. A su vez, el riego mecánico mayor pasó de un 0,5% al 1,1%.

Si se observan las técnicas de riego por grupo en el año 2007, la que posee mayor aceptación es goteo y cinta con un 52,78%, seguida por tendido 26,4% y surco con un 17,71%.

### **2.3.2. Cuenca del Aconcagua.**

La infraestructura de riego en la cuenca está constituida por numerosos embalses pequeños y canales.

Si se observan las técnicas de riego por grupo en el año 2007, la que posee mayor aceptación es goteo y cinta con un 36,17%, seguida por surco con un 27,97%, tendido con un 20,22% y microaspersión y microjet con un 12,63%.

### **2.3.3. Cuenca del Cachapoal.**

La infraestructura de riego en la cuenca está constituido por numerosos embalses pequeños y canales, ubicados en la zona baja y media de la cuenca principalmente. Para asociar los cultivos al tipo de riego se observarán los cambios entre los años 1997 y 2007, en base al censo agropecuario. Se puede decir que la distribución del tipo de riego ha variado. Anteriormente el riego era casi completamente gravitacional con un 95,2% de la superficie total con infraestructura de riego, pero ahora el microriego se ha incorporado ocupando un 24,6% de dicha superficie. A su vez, el riego mecánico mayor disminuyó de un 1,4% al 0,5% de la superficie total.

Si se observan las técnicas de riego por grupo, en el año 2007 la que posee mayor superficie es surco con un 53%, seguida por goteo y cinta 21,6% y tendido con un 20,1%.

### 3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESTRATEGIAS DE RIEGO (ENSAYOS DE CAMPO)

El objetivo principal del proyecto estuvo orientado a determinar los cambios que se producen en la productividad del agua de los cultivos seleccionados, bajo diferentes escenarios de disponibilidad del recurso. En función de ello, un aspecto importante considerado al inicio del proyecto fue la definición de los cultivos a evaluar en cada una de las cuencas seleccionadas. Para ello se recurrió a estadísticas oficiales con información de la superficie ocupada por los diferentes cultivos y registros de producción y exportaciones en cada caso. Con esa perspectiva la selección de cultivos en las cuencas fue la siguiente: Vid pisquera (Cuenca del río Limarí), Vid de mesa (Cuenca del río Limarí y Cuenca del río Aconcagua), Paltos (Cuenca del río Aconcagua), Cerezos (Cuenca del río Cachapoal).

#### 3.1. Cuenca del Limarí

##### 3.1.1. Antecedentes para el establecimiento de ensayos y metodología experimental

En la cuenca del Limarí se realizaron 4 ensayos, 2 de ellos ubicados en la zona alta del valle y otros dos en la zona baja. En ambos casos se consideró la evaluación de una variedad de uva de mesa y otra variedad de uva para la elaboración de pisco chileno. Además se consideró la elección de 2 ambientes climáticos diferentes y ubicados a distinta distancia del mar; el cual tiene una fuerte influencia sobre las condiciones ambientales. Ello con el objetivo de contrastar el efecto del clima en la productividad del agua en los cultivos ensayados. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar, con 4 repeticiones. Los tratamientos fueron: volumen de agua aplicada por el productor, equivalente al 100% (T1), volumen de agua equivalente al 75% del agua aplicada por el productor (T2) y volumen de agua equivalente al 50% del agua aplicada por el productor.

Durante el manejo y seguimiento de los ensayos se efectuaron mediciones en las plantas, en el suelo y en el sistema de riego, además del registro de algunos parámetros climáticos obtenidos de la estación meteorológica existente en el predio.

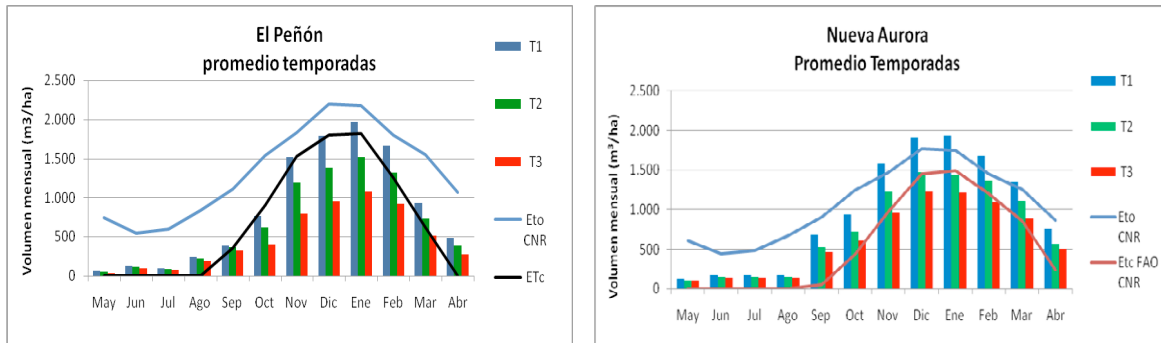
##### 3.1.2. Resultados y discusión.

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante las tres temporadas de evaluación de los ensayos (2009-2012), en uva de mesa y en uva pisquera. En cada caso, se presentaron los resultados de los ensayos y posteriormente, se efectúa un análisis conjunto de la productividad del agua de ambos cultivos en los ambientes en los cuales fueron establecidos.

###### 3.1.2.1. Vid de Mesa (variedad Crimson, sector alto (El Peñón) y sector bajo (Nueva Aurora))

La Figura 2 muestra los volúmenes mensuales promedios que se aplicaron en los tratamientos en El Peñón y Nueva Aurora. Se observa que en el primer caso, dichos volúmenes se ajustan a la demanda del cultivo (ETc), aunque T1 supera en la mayoría a dicha demanda, en baja proporción. Los valores de ETc, fueron obtenidos con los datos de Evapotranspiración de Referencia (ETo) entregados por la Comisión Nacional de Riego (CIREN-CNR, 1997) y los Coeficientes de Cultivo (kc), repor-

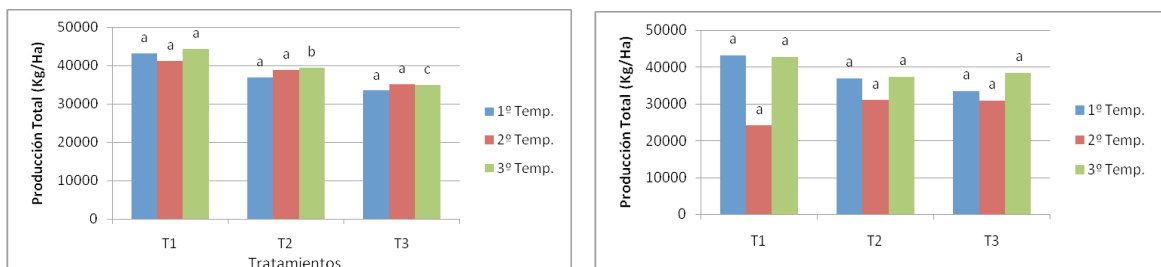
tados por FAO (Allen et al, 2006). En el segundo caso (Nueva Aurora), dichos volúmenes superan la demanda atmosférica en a lo menos 4 meses, aunque T3 se ajusta la mayoría de los meses a la evapotranspiración del cultivo (ETc)



**Figura 2.** Promedios mensuales de las aplicaciones de agua a los tratamientos en estudio, localidad de El Peñón y Nueva Aurora

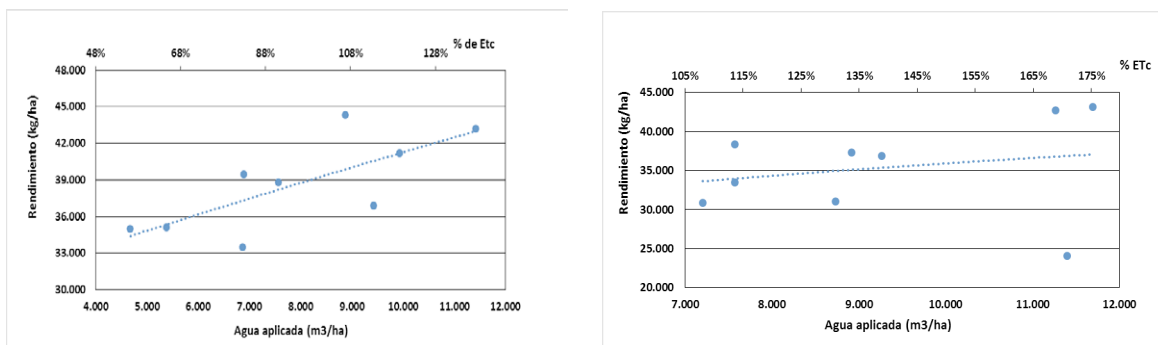
En cuanto a la producción, en el caso de El Peñón, T1 fue quien presento los mayores rendimientos en las 3 temporadas en estudio. En Nueva Aurora, T1 presento los mayores resultados solo en la primera y tercera temporada, esto es incluyendo la fruta con destino de exportación y la que se cosecha para otros fines como mercado interno o exportaciones a mercados distintos a los tradicionales por ser de inferior calidad y la agroindustria.

En la Figura 3 se presentan los resultados de producción total. En el ensayo de El Peñón se observa que sólo en la última temporada se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos en producción total, siendo cada tratamiento distinto al otro. En Nueva Aurora, en ninguna de las temporadas evaluadas se presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos en producción total, tampoco en la exportable, probablemente debido a la alta variabilidad de los resultados por unidad experimental, sin embargo, en promedio existe una tendencia a aumentar el rendimiento con un mayor volumen de agua aplicada.



**Figura 3.** Producción total obtenida durante las tres temporadas evaluadas, a) sector El Peñón, b) sector Nueva Aurora.

La Figura 4 muestra las funciones de producción obtenidas en ambos ensayos, y que reflejan la relación entre el volumen de agua aplicado (m<sup>3</sup>/ha) y el rendimiento obtenido por hectarea (kg/ha), en vid de mesa variedad Crimson. Es posible observar que existe una relación prácticamente directa entre el volumen de agua aplicado y el rendimiento obtenido, relación que se mantiene al relacionar el rendimiento con el % de ETc aplicado en cada tratamiento (eje superior).



**Figura 4.** Funciones de producción en los ensayos vid de mesa var. Crimson. a) El Peñon y b) Nueva Aurora.

- **Productividad experimental del agua.**

En el Cuadro 1 se presentan los resultados de los indicadores de Productividad del Agua (PA) expresada en  $\text{kg}/\text{m}^3$ , promedio de las tres temporadas. Además se indica la cantidad de agua promedio que fue aplicada en el cultivo para producir un Kg de uva (AUP) para los ensayos de uva de mesa.

Al analizar el cuadro, se puede apreciar que el tratamiento con mayor restricción de agua (T3) presenta una mayor eficiencia en el uso del agua o productividad del agua, tanto en el ensayo de la parte alta como en la parte baja de la cuenca; es decir, en dicho tratamiento se logra producir más fruta por metro cúbico de agua aplicado. Por otra parte, T1 es el tratamiento que genera un mayor rendimiento por unidad de superficie, pero produce menos fruta por unidad de agua aplicada; siendo en definitiva menos eficiente que T3, respecto del uso del agua.

**Cuadro 1.** Productividad del Agua (PA) y Agua utilizada por unidad de producto (AUP), en uva de mesa.

Variables	Ensayos					
	El Peñón (sector alto)			Nueva Aurora (sector bajo)		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
<b>Agua Aplicada (m3/ha)</b>	10.075	7.968	5.651	11.454	8.974	7.455
<b>% de ETC</b>	122%	96%	68%	171%	134%	112%
<b>Rendimiento (kg/ha)</b>	42.891	38.362	34.502	36.666	35.033	34.225
<b>Productividad del agua (kg/m3)</b>	4,31	4,92	6,28	3,20	3,90	4,59
<b>Agua Aplicada por unidad de producto (L/kg)</b>	235,29	208,69	164,38	336,17	257,60	219,22

### 3.1.2.2. Vid Pisquera (variedad Moscatel Rosada, sector alto (Chilecito) y sector bajo (La Chimba))

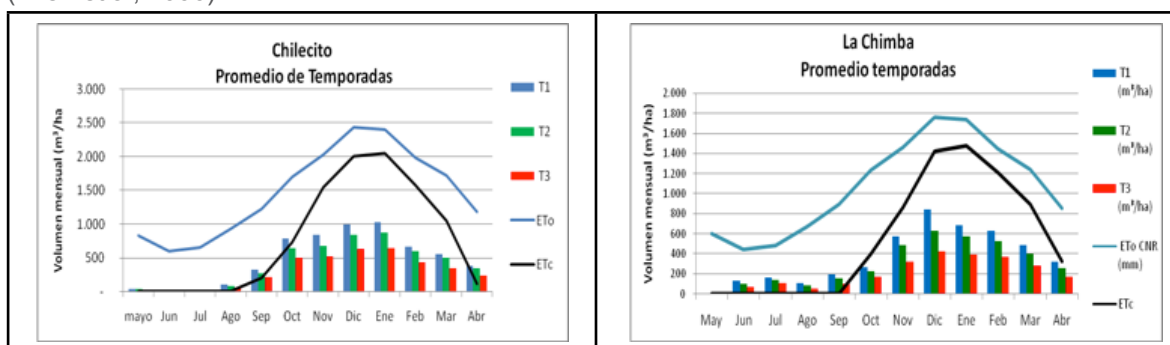
Las evaluaciones periódicas de los caudales permitieron calcular los volúmenes de agua aplicada a cada tratamiento. Es posible observar que los volúmenes aplicados por el agricultor (T1) en Chilecito se mantienen cerca de los  $5900 \text{ m}^3$  anuales, las dos primeras temporadas, mientras que en la tercera este volumen disminuyó alcanzando los  $5.136 \text{ m}^3/\text{ha}$ . En el caso de La Chimba, volúmenes aplicados por el agricultor (T1) se mantienen cerca de los  $4.000 \text{ m}^3$  anuales.



La Figura 5 muestra los valores mensuales promedios que se aplicaron en los tratamientos de Chilecito y La Chimba respectivamente, en ellas se observa que dichos valores no se ajustan a la demanda atmosférica, aunque los mayores volúmenes son aplicados en los meses de mayor demanda.

**Figura 5.** Promedios mensuales de las aplicaciones de agua a los tratamientos en estudio, sector Chilecito y La Chimba.

Durante los meses de actividad del cultivo los volúmenes aplicados se encuentran muy por debajo de la demanda mensual calculada. Dicha demanda fue obtenida con los datos de Evapotranspiración de Referencia (ET<sub>o</sub>) entregados por la Comisión Nacional de Riego (CIREN-CNR, 1997) y los Coeficientes de Cultivo, reportados por FAO para uva de mesa, debido a sus sistema de conducción (Allen et al, 2006).



**Figura 6.** Función de Producción de vid pisquera var. Moscatel Rosada en los ensayos de Chilecito y la Chimba.

La Figura 6, obtenida con la información de todas las temporadas, muestra la relación entre el volumen de agua aplicado y el rendimiento obtenido por hectárea, reflejando la relación entre agua y rendimiento, equivalente a lo que se conoce como Función de Producción. Se observa que existe una relación directa entre estas dos variables.

- **Productividad experimental del agua.**

En el Cuadro 2 se presentan los resultados de los Indicadores: Rendimiento por unidad de superficie o Productividad de la Tierra en kg/ha; Productividad del Agua o Eficiencia del Uso del Agua expresada en kg/m<sup>3</sup> y Agua Aplicada por Unidad de Producto expresada como L/kg, como valores promedio de las tres temporadas de evaluación.

Al analizar el Cuadro 2 se puede apreciar que los tratamientos restrictivos son más eficientes en el uso del agua (T2 y T3); siendo esto más notorio en el ensayo de la zona baja. En ambos casos el tratamiento 2 presenta la mayor productividad del agua y los menores valores de agua aplicada por unidad de producto; Ocupando posiciones intermedias en cuanto a productividad de la tierra (kg/ha). En términos de productividad industrial, expresada como Litros de alcohol por m<sup>3</sup>, se obtienen mayores valores en el sector alto (Chilecito); sin embargo, no existen diferencias significativas entre tratamientos en ambos sectores.

**Cuadro 2:** Eficiencia del Uso del Agua (EUA) y Agua utilizada por unidad de producto (AUP), en Chilecito y La Chimba.

Variables	Ensayos					
	Chilecito			La Chimba		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
<b>Agua Aplicada (m3/ha)</b>	5.679	4.843	3.567	4.408	3.601	2.474
<b>% de ETc</b>	61%	52%	39%	67%	55%	38%
<b>Rendimiento (kg/ha)</b>	25.409	23.608	15.980	28.911	28.109	18.948
<b>Productividad del agua (kg/m3)</b>	4,47	4,88	4,48	6,56	7,81	7,66
<b>Agua Aplicada por unidad de producto (L/kg)</b>	237,84	233,50	234,33	163,39	138,62	144,55
<b>Productividad económica (\$/m3)</b>	776,64	931,78	916,63	546,77	605,4	545,21
<b>Productividad Industrial (L Alcohol/m3)</b>	1,45	1,74	1,72	1,02	1,13	1,02

### 3.1.3. Conclusiones

- En función de los trabajos realizados en la cuenca del río Limarí, Chile, es posible plantear las siguientes conclusiones, para ambos cultivos: vid pisquera y vid de mesa:
- En los ensayos en vid de mesa en el sector alto, los volúmenes de agua aplicados fueron, en general, menores a los utilizados en el sector bajo; no existiendo diferencias significativas entre los rendimientos. Ello no guarda relación con la mayor ETc del sector alto, existiendo una influencia importante de las condiciones de manejo del cultivo.
- En el caso de vid pisquera se aprecia una mejor relación entre volúmenes aplicados y la ETc de ambos sectores: Chilecito y La Chimba. Una mayor ETc del sector alto, se manifiesta en mayores volúmenes de agua aplicada.
- En términos de rendimiento, la vid de mesa ubicada en el sector alto presenta valores superiores al sector bajo, solamente en los tratamientos T1 y T2, lográndose el valor más alto en T1 (42.891 kg/ha); siendo prácticamente similares en el tratamiento T3. En vid pisquera, por condiciones climáticas y de mejor adaptación, se obtienen mayores rendimientos en el sector bajo, en todos los tratamientos, obteniéndose sobre 28.000 kg/ha en los tratamientos T1 y T2.
- Respecto de Productividad del Agua (PA), los valores en vid de mesa son superiores en el sector alto (El Peñón), en los tres tratamientos, reflejando una mejor relación entre rendimiento y agua aplicada para este sector, obteniéndose una PA de 6,28 kg/m<sup>3</sup> en T3. En vid pisquera, por el contrario, es el sector bajo (La Chimba) donde se logran los mayores valores de PA, llegando a un valor de 7,66 kg/m<sup>3</sup>, también en T3.
- Finalmente, es necesario destacar que en el cultivo de vid pisquera, por las condiciones de manejo del ensayo, en todos los tratamientos en ambos sectores, no se alcanzaron a suplir las demandas de agua del cultivo, llegando a aplicar, en el mejor de los casos, un 67% de los requerimientos del cultivo. Situación distinta es la ocurrida en vid de mesa, en ambos sectores, donde se lograron relaciones entre ETc y Agua aplicada superiores a 1; con valores máximos de 1,22 y 1,71 para los tratamientos T1 en los sectores alto y bajo, respectivamente.

## 3.2. Cuenca del Aconcagua.

### 3.2.1. Antecedentes para el establecimiento de los ensayos y metodología experimental

El valle de Aconcagua es una de las zonas más antiguas de Chile en la producción de fruta de exportación, principalmente uva de mesa. En los últimos años también ha aumentado en forma importante la superficie plantada con paltos, particularmente en laderas de cerros, sobre cota de canal. Dentro del Valle, la mayor superficie plantada con uva de mesa se ubica en las provincias de Los Andes y la parte alta de la provincia de San Felipe. Las plantaciones de Palto se ubican en la parte baja de la provincia de San Felipe y en la provincia de Quillota, más hacia la costa. Dado lo anterior, los trabajos experimentales de campo, que se describen en este capítulo, se llevaron a cabo en la provincia de San Felipe.

#### 3.2.1.1. Uva de mesa en Aconcagua

En el caso de la uva de mesa, dentro del proyecto Fontagro, se abarcaron dos líneas de trabajo: 1.- requerimientos hídricos de la uva de mesa, y 2.- requerimiento de riego, entendiendo por esto último las restricciones máximas de agua que no provocan disminución ni calidad comercial de los rendimientos.

Para determinar los coeficientes de cultivo en uva de mesa, y así poder determinar un balance hídrico. Para ello se utilizaron dos metodologías: uso de lisímetros de balance hídrico y uso del método de los flujos turbulentos, utilizando un sistema “Eddy covarianza”



Figura 7. Arriba: uva de mesa en sistema de espaldera (California); abajo sistema de parronal español.

### 3.2.1.2. Paltos en Aconcagua

En el caso de los paltos en Aconcagua, se tomaron 4 líneas de trabajo:

- 1) Estimación de la función de producción
- 2) Efecto de las cantidades de agua aplicada en la post cosecha del palto
- 3) Agotamiento del agua disponible total del suelo (ADT) y su efecto en el palto
- 4) Estimación de la eficiencia en el manejo del agua de riego en huertos de paltos de los valles de la región de Valparaíso.

### 3.2.2. Resultados y discusión con énfasis en productividad del agua.

#### 3.2.2.1. Uva de mesa en el valle de Aconcagua

En las experiencias realizadas se demostró que la demanda de agua (ETc) durante la temporada (septiembre a marzo), alcanza a un valor cercano a los 8.000 m<sup>3</sup>/ha, más el aporte de las precipitaciones invernales, que pueden significar un aporte de unos 500 m<sup>3</sup>/ha adicionales. Dada la distribución de las precipitaciones el total de ETc debe aplicarse mediante riego.

Aportes de agua inferiores a 80% de la ETc durante toda la temporada afectan el calibre de bayas y la producción en la variedad Thompson Seedless, Sin embargo en Flame Seedless el calibre de bayas no se vio afectado con aplicaciones de hasta 60% de la ETc, dependiendo del número de bayas por racimo. Sin embargo aplicaciones deficitarias de agua tienden a disminuir el peso de poda de las plantas, lo que indica una pérdida de vigor. Por otra parte en ambas variedades, aplicaciones de agua por sobre 120% de la ETc no provocan aumentos de rendimientos.

#### • Productividad experimental del agua

En los ensayos realizados en el Valle de Aconcagua en los cultivares Thompson Seedless y, Flame Seedless, se pudo observar que la cantidad de agua aplicada tuvo efectos sobre la producción, particularmente en la primera variedad. Por ejemplo, se pudo ver que aplicaciones de agua del orden del 60% de la evapotranspiración del cultivo ETc (en Thompson Sedles y Flame Seedless)), provocaron una disminución de rendimiento. Sin embargo, aplicaciones de agua por sobre el 100% de la ETc, no implicaron aumentos significativos de rendimiento, incluso existe una tendencia a una reducción de los mismos (ver Cuadro 3).

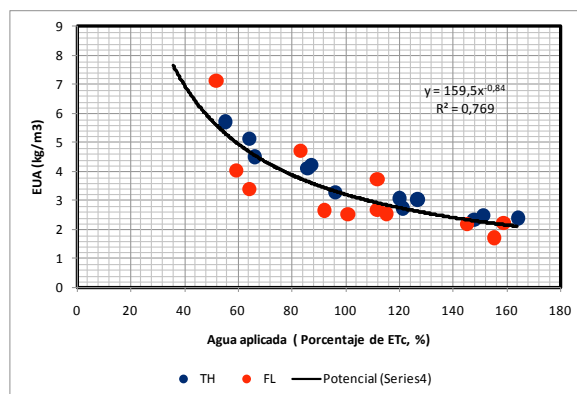
A partir de la producción exportable (kg/ha) y los volúmenes de agua de riego aplicados (m<sup>3</sup>/ha) en los ensayos realizados en Aconcagua en las variedades Thompson Seedless y Flame Seedless, se procedió a calcular la EUA. Dichos resultados se presentan en Cuadro 3

**Cuadro 3:** Eficiencia del Uso del Agua (EUA), en la cuenca del Aconcagua en Flame y Thompson Seedless.

Variables	Ensayos							
	Flame Seedless				Thompson Seedless			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Agua Aplicada (m3/ha)	4.284	6.747	8.373	11.320	4.049	5.837	8.307	10.522
% de ETc	57%	90%	112%	152%	57%	81%	116%	148%
Rendimiento (kg/ha)	22.010	22.880	26.070	23.520	21.390	23.934	25.476	26.002
Productividad del agua (kg/m3)	5,14	3,39	3,11	2,08	5,28	4,10	3,07	2,47

En la Figura 8 se presenta la relación entre la EUA (kg/m3) y la cantidad de agua aplicada, la cual es expresada como porcentaje de la evapotranspiración (% ETc). La EUA aumenta desde 2 kg/m3 cuando se aplica 150% de la ETc durante toda la temporada hasta cerca de 6 kg/m3, con aplicaciones cercanas al 50% de la ETc, durante todo este mismo período.

Aumentos de EUA con aplicaciones reducidas de agua en la variedad Thompson Seedless han sido reportadas por Williams et al. (2010b), alcanzando un máximo con aplicaciones de agua equivalentes a 60% de la ETc, Sin embargo, con aplicaciones menores a 60% de la ETc, la productividad del agua disminuye (menos kg/m3), porque es estrés hídrico severo afecta procesos básicos de la productividad de las parras, tales como la inducción floral y el proceso de fructificación.

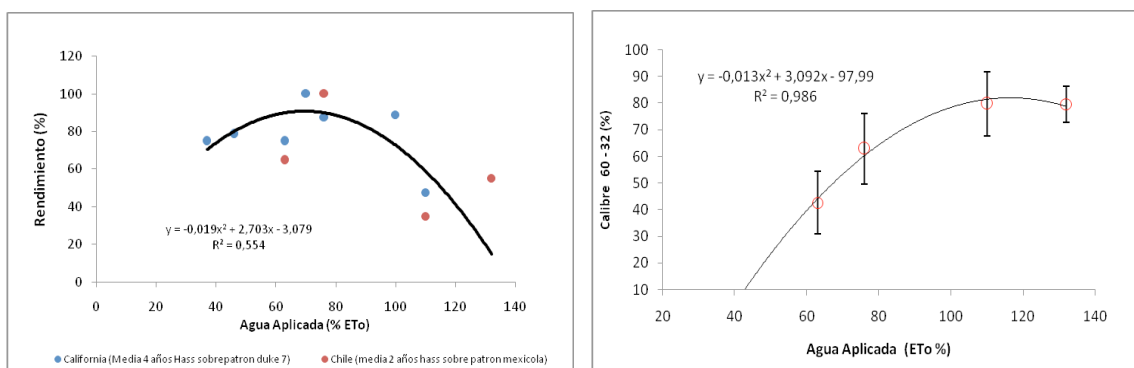


**Figura 8.** Productividad del agua (EUA) expresada como kg de fruta exportable por m3 de agua utilizado (kg/m3) en relación al porcentaje de la ETc aplicado en las diferentes temporadas de ensayos en las variedades Thompson Seedless (TH) y , Flame Seedless (FL). Valle de Aconcagua

Aplicaciones de agua bajo el 80% de la ETc aumentan considerablemente la EUA. Sin embargo, en la variedad Thompson Seedless, al menos, disminuye el calibre de bayas al disminuir los aportes de agua. Por otra parte, aplicaciones restringidas de agua disminuyen el porcentaje de sombreado del parrón a valores inferiores a 80%, lo que aumenta la proporción de fruta con el golpe de sol y la fruta se amarilla (Sellés et al., 2010) en esta misma variedad.

### 3.2.2.2. Paltos en el valle de Aconcagua

El palto presenta los máximos rendimientos cuando se aplican volúmenes de agua durante la temporada entre el 70 al 75% de la ETo ( $K_c = 0,7$ ). Por el contrario, en los tratamientos donde se aplicaron cantidades de agua mayores, equivalentes al 110% de la ETo ( $K_c=1,1$ ), los rendimientos disminuyen en aproximadamente un 50% debido a un exceso de vigor o problemas de aireación en el suelo. Cuando se aplica al cultivo una cantidad de agua inferior a 70% de la demanda, se afecta en demasía el rendimiento, el cual decae en aproximadamente un 20%. Con aplicaciones superiores al 70% de ETo, los rendimientos del cultivo disminuyen drásticamente, al igual que la productividad del agua, la que llega a menos de  $0,5 \text{ l/m}^3$ , cuando se aplica un 150% de ETo



**Figura 9.** Efecto del agua aplicada sobre el rendimiento del palto y calibre de la fruta var Hass (Datos proyecto FONTAGRO y Faber et al 1995))

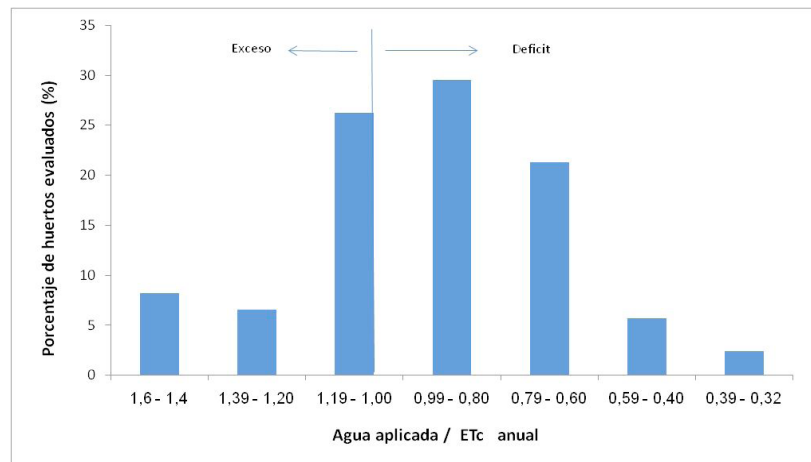
Un ensayo realizado en un suelo franco arenoso permitió concluir que disminuciones de 60% de la humedad aprovechable antes de volver a regar no afectan el estado hídrico, rendimiento y calibre de la fruta. Las plantas que se regaban con un umbral de riego del 60% (riego en verano cada 5 o 6 días) presentaron a medio día, en verano, potenciales hídricos xilemáticos entre  $-0,53$  a  $-0,68 \text{ MPa}$ .

En resumen, se puede indicar que los paltos en suelos de textura fina, con problema de aireación, pueden ser regados con baja frecuencia de riego, utilizando una fracción de agotamiento ( $p$ ) entre un  $0,6$  a  $0,4$  lo que corresponde a agotar un  $40$  a  $60\%$  del ADT, favoreciendo con esto la aireación en terrenos de baja capacidad de aire.

Los requerimientos hídricos totales del paltos (demanda bruta, DB), en los valles de la región de Valparaíso, varían entre  $6.979$  y  $19.350 \text{ m}^3/\text{ha}$ , al considera un coeficiente de cultivo ( $k_c$ ) de  $0,75$  durante la temporada y una eficiencia de aplicación del agua del  $85\%$  (un  $15\%$  del agua se pierde por percolación profunda). También se pueden ver aumentados, los volúmenes de agua aplicado, si las pérdidas por percolación profunda son superiores a un  $15\%$  (eficiencia de aplicación del agua del  $85\%$ ), valor que corresponde a la eficiencia máxima posible de lograr con riego por microaspersión. Las pérdidas por percolación profunda pueden ser mayores que un  $15\%$ , cuando se cometen errores en la estimación de los tiempos de riego y en las demandas hídricas del cultivo.

En la Figura 10 se observa la relación entre la evapotranspiración estimada en 126 huertos encuestados durante tres temporadas y el agua aplicada. En los huertos encuestados algunos agricultores

aplican volúmenes superiores a los requeridos y otros aplican menos agua que lo que las plantas necesitan.

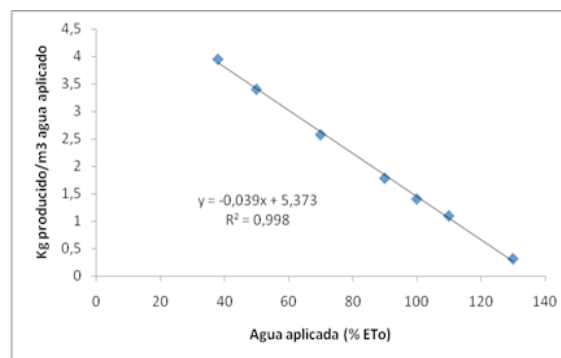


**Figura 10** Relación entre la evapotranspiración aplicada en los 126 huertos encuestados durante tres temporadas y el agua aplicada (datos obtenidos en el marco proyecto FONTAGRO)

Alrededor del 40 % de los campos aplican un volumen mayor al requerido y un 28% una cantidad inferior. En general los que aplican menos agua a la requerida están ubicados en los valles del río Petorca y La Ligua.

## • Productividad experimental del agua

Cuando se aplica al cultivo una cantidad de agua inferior a 70% se afecta en demasía el rendimiento, el cual decae en aproximadamente un 20% (Figura 8), esto implica una productividad del agua 2,6 Kg/m<sup>3</sup> (Figura 11). Sin embargo se disminuyen el calibre sobre 200 g por frutos en un 60%.



**Figura 11.** Productividad del agua a partir de datos reportados FONTAGRO y Faber et al 1995.

### 3.2.3. Conclusiones

- Aplicaciones de entre 80 a 120% de la ETc del cultivo permiten obtener las mayores producciones de uva de exportación, con una EUA de entre 3 y 4 Kg/m<sup>3</sup> de fruta exportable. Aplicaciones de agua por sobre 120% de la ETc no provocan aumentos de rendimientos, disminuyendo la EUA a valores de cercanos a 2 kg/m<sup>3</sup> de fruta exportable.
- Por otra parte, aplicaciones de agua inferiores a 80% de la ETc durante toda la temporada provocan disminución de rendimientos: disminuciones de agua desde un 80% de ETc a 20% de ETc, implican disminuciones de rendimiento de 100 a 60%. Sin embargo no solo la producción total disminuye, sino también la calidad comercial del producto exportable, como son el color y el calibre de las bayas.
- El palto es muy sensible a la falta de oxígeno en el suelo, por lo cual sus rendimientos se ven limitados en suelos de baja macroporosidad o cuando el manejo del riego agudiza la falta de oxígeno en el suelo.
- Los mayores rendimientos en paltos se obtienen cuando se repone un 75% de la evapotranspiración potencial. Sin embargo los mayores calibres se podrían obtener con reposiciones mayores.
- El palto cierra estomas y deja de transpirar cuando el contenido de aire en el suelo está bajo el 20% y cuando se ha agotado más del 60% del agua disponible total (ADT). Por el patrón de desarrollo del palto no existen periodos donde pueda aplicarse déficit hídrico controlado sin afectar los rendimientos.
- El déficit hídrico en paltos en primavera, afecta la asimilación de calcio y por lo tanto la vida en post cosecha de esta fruta.
- Aproximadamente un 40% de los huertos de paltos en los valles de la región de Valparaíso aplican volúmenes mayores a los requeridos por el cultivo.

## 3.3. Cuenca del Cachapoal.

### 3.3.1. Antecedentes para el establecimiento de los ensayos y metodología experimental

Se realizaron ensayos de riego con déficit controlado, en dos predios ubicados en la Región de O'Higgins; el primero (Arcahue) se ubica en la localidad de La Compañía y el segundo predio (La Ponderosa) se ubica en la localidad El Abra. Los ensayos se realizaron en huertos de cerezo con variedades Bing y Van. El diseño del ensayo corresponde a bloques, donde se aplicaron tres tratamientos distribuidos completamente al azar con cuatro repeticiones cada uno. Se consideró cinco y seis árboles por hilera para el predio Arcahue y el predio La Ponderosa respectivamente. Los tratamientos consistieron en la aplicación de diferentes volúmenes de agua respecto de la evapotranspiración del cultivo: T1: 100% de ETc, T2: 75% de ETc y T3: 50% de ETc.

Para determinar los requerimientos hídricos, se estimó la evapotranspiración de referencia (ETo) mediante el método del evaporímetro de bandeja (evaporación de bandeja, Eb), cuya lectura fue corregida por un coeficiente  $k_p$  de 0,7. Para obtener la evapotranspiración del cultivo ETc, estos



valores fueron corregidos por el coeficiente de cultivo ( $k_c$ ) del Cerezo.

Se realizaron evaluaciones de riego, del estado hídrico de las plantas y de la producción de fruta y la postcosecha.

### 3.3.2. Resultados y discusión con énfasis en productividad del agua

El contenido volumétrico de agua en el suelo, varía entre un 20 y un 35% siendo los mayores valores en T1 y los menores en T3 en el sector de Las Compañías. En el caso del Abra, los valores varían en un rango entre 37% y un 43%, al igual que en la Compañía los menores valores se tienen en T3 y mayores en T1.

El mejor rendimiento promedio en el sector de las compañías, se logra claramente con el tratamiento de riego del 100%, llegando a obtener 3,34 toneladas por hectárea. Este valor es significativamente superior al rendimiento obtenido con los otros tratamientos (75% y 50%). Entre estos dos últimos tratamientos no se produjeron diferencias significativas.

En el caso de El Abra, no hay un efecto significativo entre nivel de aporte hídrico y los rendimientos estimados por hectárea, ya que la mejor producción de cerezas se obtiene con el 75% de riego llegando a 6,19 toneladas, mientras que con riego del 100% se llega a solo 5,22 toneladas, siendo el peor rendimiento de los tres tratamientos.

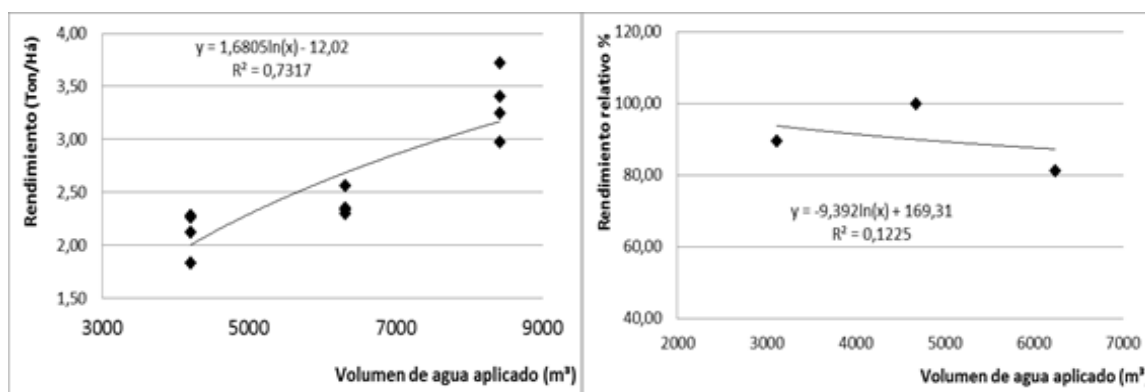


Figura 12. Funciones de producción de Cerezos: Izquierda, sector La Compañía; derecha, Sector el Abra

#### • Productividad experimental del agua

En el Cuadro 4 se presentan los resultados de los Indicadores: Rendimiento por unidad de superficie o Productividad de la Tierra en kg/ha; Productividad del Agua o Eficiencia del Uso del Agua expresada en  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

**Cuadro 4:** Eficiencia del Uso del Agua (EUA), para Cerezo en la cuenca del Cachapoal.

Variables	Ensayos					
	La Compañía (sector alto)			El Abra (sector bajo)		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
Agua Aplicada (m3/ha)	8.411	6.308	4.206	6.236	4.677	3.118
% de ETc	114%	86%	57%	97%	73%	49%
Rendimiento (kg/ha)	3.344	2.390	2.130	5.220	6.190	5.760
Productividad del agua (kg/m3)	0,4	0,38	0,51	0,84	1,32	1,85

### 3.3.3. Conclusiones

- En Predio Arcahue (sector Las Compañías) se observa un efecto en el rendimiento por unidad de superficie (ton/ha) y en el peso del fruto. En este predio los árboles presentaron una mejor respuesta a la reposición del 100% del agua evapotranspirada. Aunque para los tratamientos de 75% y 50% de riego estas diferencias desaparecen lo que también conlleva a que si un agricultor le faltase al agua podría reponer con el riego hasta un 50% de la ETc y obtener resultados como si hubiese regado reponiendo un 75%.
- La producción y calidad de la fruta en el predio La Ponderosa (sector El Abra) no se ve afectada por la cantidad de agua aplicada. Esto quiere decir que se podría fomentar una estrategia de reponer una menor cantidad de agua evapotranspirada por los cerezos, sin afectar significativamente la producción. Lo que conlleva a un ahorro de agua que podría bordear al 50% de la demanda del árbol
- Para el manejo del riego de los árboles de Cerezo dulce, se requiere un control periódico del estado hídrico de la planta, para evitar estrés fisiológico. Por tal motivo, el potencial xilemático es un buen indicador para el control del riego.

## **4. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DISPONIBILIDAD DE AGUA**

### **4.1. Selección del modelo hidrológico**

Los modelos hidrológicos han sido desarrollados y aplicados de manera creciente durante las últimas cuatro décadas. Este incremento sostenido se debe principalmente a dos motivos. Uno de ellos se basa en que los modelos han sido mejorados a partir de nuevas metodologías que surgieron del proceso de investigación. El otro motivo radica en la demanda de nuevas herramientas mejoradas y el interés creciente de trabajar con los recursos hídricos.

Existe una gran variedad de modelos hidrológicos, con distintos enfoques. Los puramente empíricos predicen caudales a largo plazo para aguas superficiales, como por ejemplo el modelo MONERIS (Behrendt and Opitz, 2000). Asimismo existen modelos híbridos de dinámica tridimensional que trabajan sobre una plataforma SIG (Sistema de información Geográfico), como es el caso de MIKE SHE (Boggild et al., 1999) y SWAT (Rosenthal et al., 1995).

### **4.2. El Modelo SWAT**

SWAT es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas (Arnolt et al, 1990). Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes.

#### **4.2.1. Descripción del modelo**

El modelo combina ecuaciones de base física y empírica y utiliza datos de entrada que se encuentren rápidamente disponibles. Asimismo, permite a los usuarios estudiar los impactos a largo plazo. SWAT está definido por 8 componentes principales: hidrología, clima, erosión y sedimentación, temperatura de suelo, fenología vegetal, nutrientes, pesticidas y manejo del suelo.

#### **4.2.2. Requerimientos de información**

La información requerida para correr el modelo SWAT se puede resumir en climática, altimétrica, tipo de suelos, uso de suelo y caudales observados para la calibración.

### **4.3. Definición de escenarios climáticos**

Los escenarios climáticos que Chile posee son básicamente dos. El primero corresponde a los resultados del IPCC, los que son de uso generalizado para evaluación de los impactos en agricultura. Los escenarios están a una escala de cálculo de aproximadamente 250 km.

El segundo corresponde a un cálculo de bajada de resolución o downscaling (50 km) que se realizó con el modelo PRECIS y fue financiado por la CONAMA en su momento. El trabajo realizado con el modelo PRECIS corresponde a un downscaling de los datos calculados por el Hadley Center (Reino Unido).

### 4.3.1. Metodología general

En relación a la información que Chile posee, se desarrolló un método simple para generar escenarios utilizando las series de tiempo de precipitación y temperatura. El método se basa en las tasas de evolución media mensual de las variables climatológicas consideradas y a partir de ellas se realizaron estimaciones diarias.

### 4.3.2. Resultados (escenarios por cuenca)

Los resultados corresponden a series de tiempo diarias de 999 años para las estaciones climáticas de las cuencas de Limarí y Cachapoal, ubicadas en la región de Coquimbo y O'Higgins, respectivamente. Se debe notar que el generador GenPP permitió tener series de tiempo de lluvias diarias simuladas de varias estaciones en forma simultánea. Esto último es importante dado que en la realidad ocurre que las lluvias de estaciones climáticas cercanas están correlacionadas.

Las series de tiempo diarias de precipitación de 999 años fueron procesadas para llegar a tener tres series diarias de 100 años correspondientes a escenarios seco, medio y húmedo, que fueron los inputs para el modelo SWAT en ambas cuencas.

## 4.4. Modelación hidrológica de cuencas

### 4.4.1. Cuenca del Limarí

En capítulos previos ha sido descrita las características hidrográficas de la cuenca del río Limarí. Aquí se describe la información referente a la modelación hidrológica con SWAT.

#### 4.4.1.1. Capas de información: tipo y uso del suelos, clima, fluvio-metría, otros

Las capas de información utilizadas fueron las siguientes:

- Información climática, obtenida de red de estaciones de distintas fuentes (DGA, DMC e INIA).
- Información Altimétrica, obtenida del modelo digital de elevación (DEM) con ello se generaron mapas de pendientes requeridos por SWAT.
- Tipo de suelos, información obtenida de los Estudio Agrológicos del CIREN, los cuales fueron adaptados a los requerimientos de modelo SWAT. En zonas altas, donde no existe información del CIREN se solicitó el apoyo de expertos para lograr la caracterización de suelos exigida por el modelo.
- Uso de suelo, obtenido de la información del CIREN, CONAF y se completaron las capas de uso agrícola usando como fuente el Censo Nacional Agropecuario de 2007.
- Caudales observados, esta información fue obtenida de la red de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA).

#### 4.4.1.2. Calibración y validación

La calibración y validación de la modelación con SWAT fue realizada para las sub cuencas 1, 3 y 12. En la sub cuenca 1 solo se calibró por tener pocos años de datos. La Figura 13 presenta los resultados.

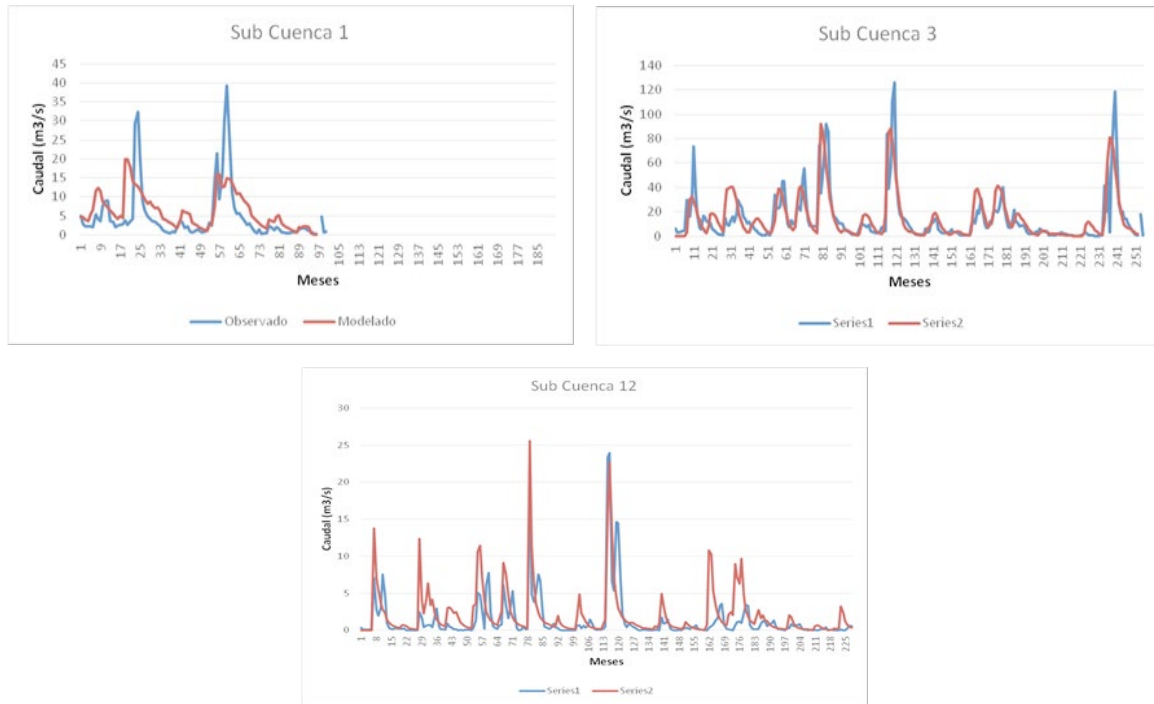


Figura 13. Comparación de los caudales observados y modelados para las sub cuencas 1; 3 y 12.

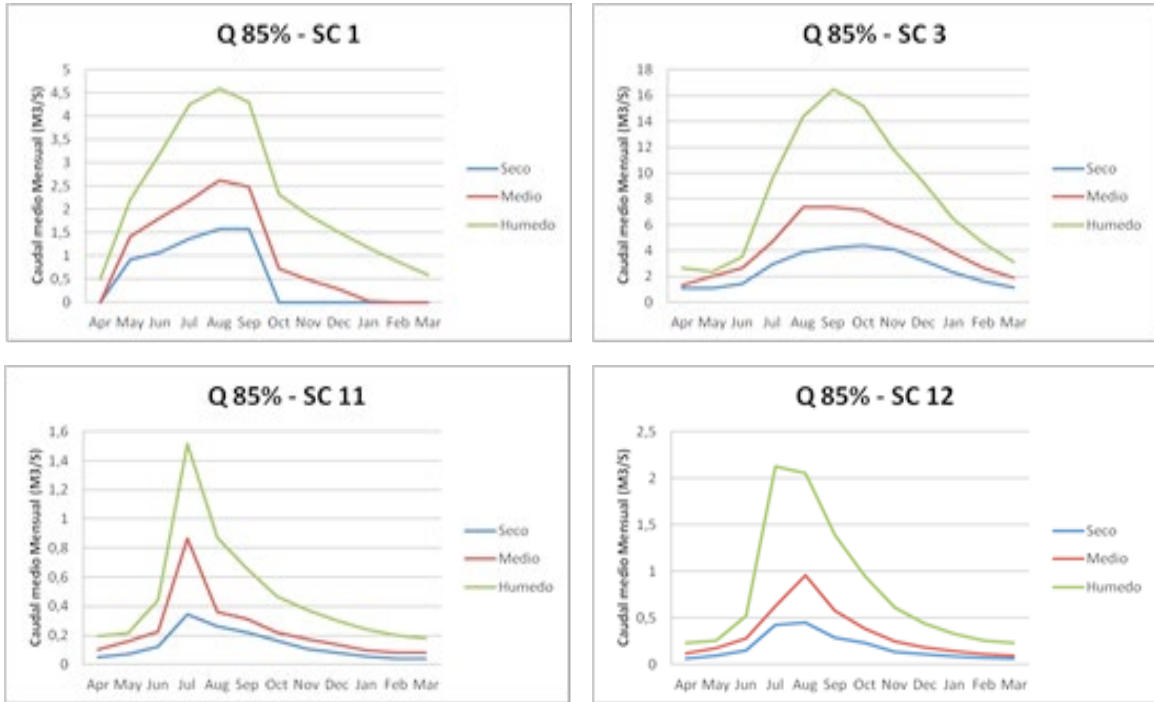
#### 4.4.1.3. Resultados del modelamiento bajos distintos escenarios climáticos

En este estudio se simuló y comparó la disponibilidad de agua de los ríos del sistema Paloma para regar 43.894 ha distribuidas entre los tres embalses. Se modelaron las subcuencas 1 que tributa al embalse recoleta; subcuenca 3 tributaria del embalse paloma y subcuenca 11 y 12, la cuales tributan al embalse Cogotí.

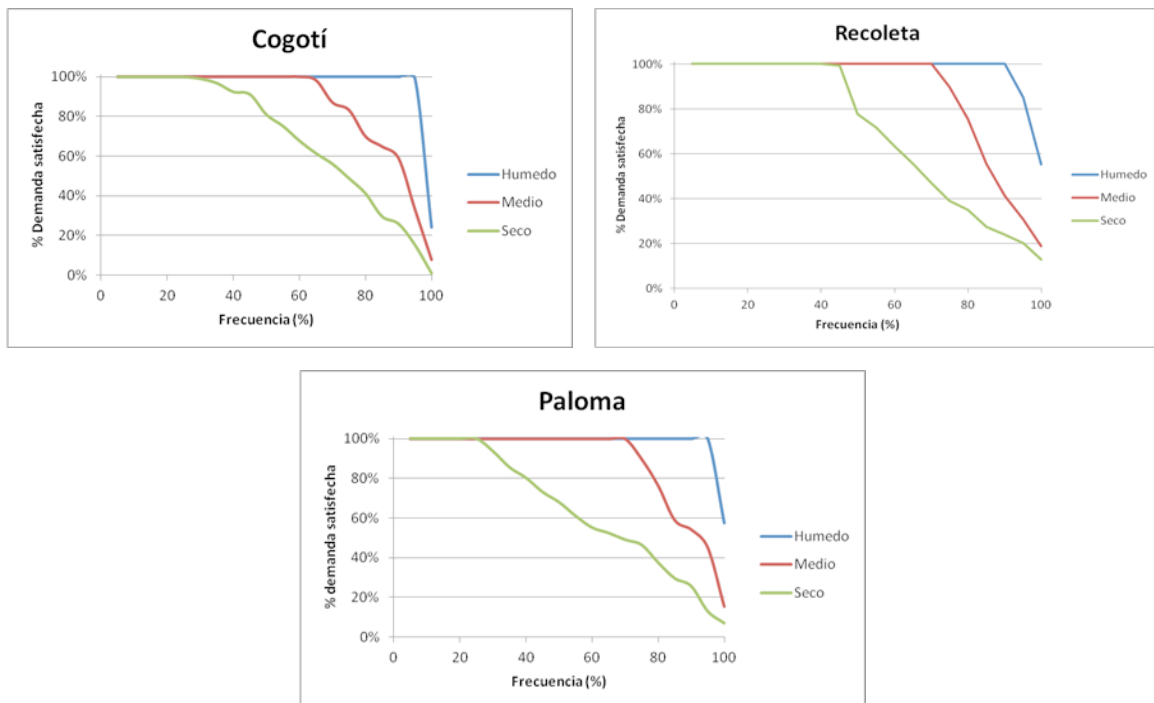
Para cada una de las cuencas relevantes (1; 3; 11 y 12) se realizaron análisis de frecuencia mensuales para cada escenario climático. La Figura 14 presenta los gráficos comparativos para todas las sub cuencas y los escenarios seco, medio y húmedo.

Para el análisis de los resultados se comparó qué fracción de la demanda hídrica fue satisfecha por cada uno de los embalses cada año. La información se evaluó anualmente dado que en años secos es posible programar la distribución del agua de los embalses en los meses de riego.

Los resultados de los balances mensuales por 100 años bajo los tres escenarios climáticos arrojaron como resultado que algunos años la demanda de riego fue satisfecha completamente, mientras en otros años fue satisfecha parcialmente. Esto fue variable para cada embalse y para cada escenario climático (Figura 15).



**Figura 14.** Comparación de caudal con 85% de probabilidad para los tres escenarios en cada subcuenca modelada.



**Figura 15.** Frecuencia de fracción de demanda de riego satisfecha bajo distintos escenarios climáticos.

Se puede observar que bajo el escenario húmedo casi el 100% de los años se cubre completamente la demanda de riego para el área considerada. Para el escenario medio, en general el agua fue suficiente para abastecer el 100% de la demanda hídrica en el 70% de los años, para luego bajar el porcentaje de demanda satisfecha llegando a menos del 20% en el 1 ó 2% de los años. Finalmente, bajo el escenario seco los resultados son dramáticos ya que solo entre el 20% y 40% de los años se podría cubrir el 100% la demanda de riego, mientras el 60% restante de los años los resultados fueron variables hasta alcanzar menos de 20% de la demanda hídrica en 1 ó 2% de los años.

#### **4.4.2. Cuenca del Cachapoal**

En capítulos previos ha sido descrita las características hidrográficas de la cuenca del río Limarí. Aquí se describe la información referente a la modelación hidrológica con SWAT.

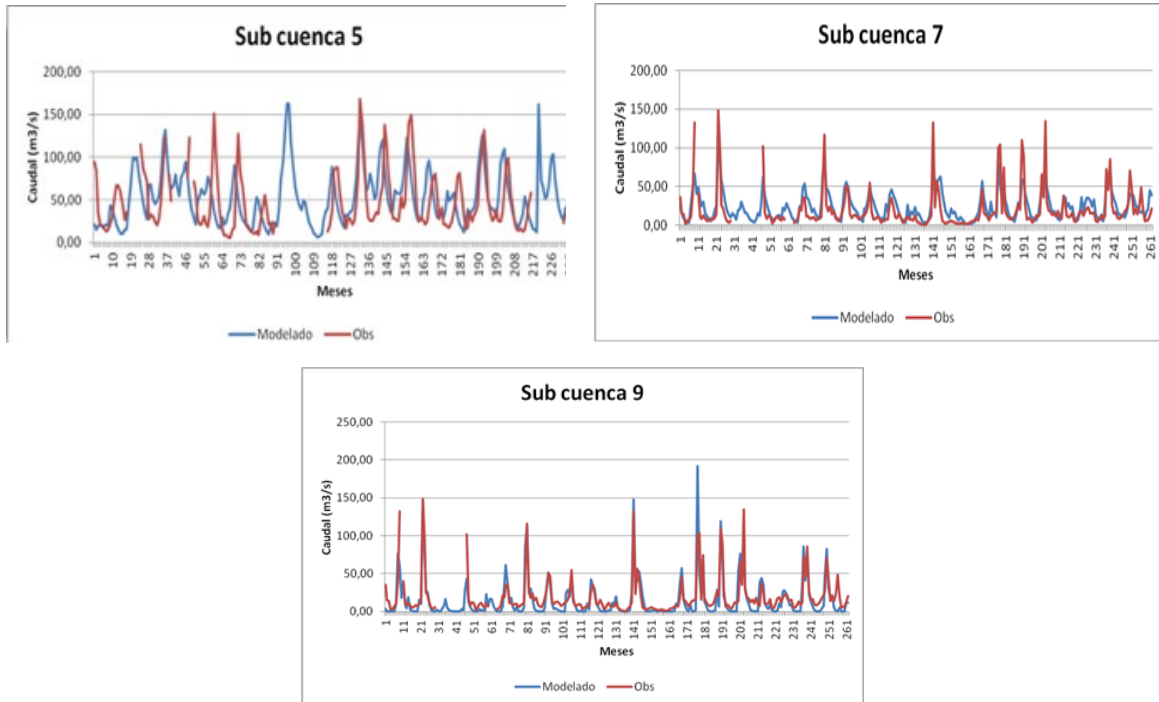
##### **4.4.2.1. Capas de información: tipo y uso del suelos, clima, fluvio-metría, otros**

Las capas de información utilizadas fueron las siguientes:

- Información climática, obtenida de red de estaciones de distintas fuentes (DGA, DMC e INIA).
- Información Altimétrica, obtenida del modelo digital de elevación (DEM) con ello se generaron mapas de pendientes requeridos por SWAT.
- Tipo de suelos, información obtenida de los Estudio Agrológicos del CIREN, los cuales fueron adaptados a los requerimientos de modelo SWAT. En zonas altas, donde no existe información del CIREN se solicitó el apoyo de expertos para lograr la caracterización de suelos exigida por el modelo.
- Uso de suelo, obtenido de la información del CIREN, CONAF y se completaron las capas de uso agrícola usando como fuente el Censo Nacional Agropecuario de 2007.
- Caudales observados, esta información fue obtenida de la red de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA).

##### **4.4.2.2. Calibración y validación**

La calibración del modelo fue realizada en 3 sub cuencas que contaron con datos fluviométricos. Las sub cuencas fueron la 5; 7 y 9. La Figura 16 muestra los gráficos comparando los caudales observados y modelados.



**Figura 16.** Comparación de caudales modelados y observados en sub cuencas del río Cachapoal.

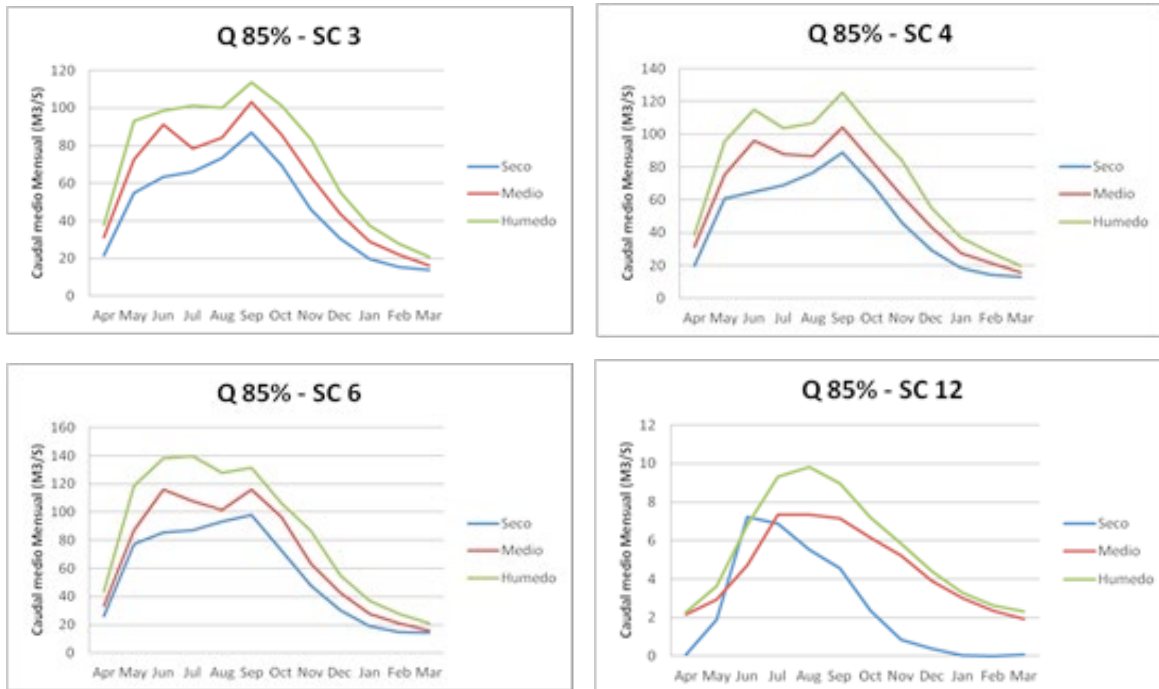
#### 4.4.2.3. Resultados del modelamiento bajo distintos escenarios climáticos

El análisis realizado consistió en correr el modelo SWAT calibrado para la cuenca del río Cachapoal bajo los tres escenarios climáticos generados: seco, medio y húmedo. Para cada escenario se generaron series de tiempo mensuales de 100 años, las cuales fueron comparadas estadísticamente calculando las probabilidades de excedencia mensuales, para luego comparar el comportamiento de las sub cuencas, en cuanto al riego con 85% de seguridad, bajo los tres escenarios.

De acuerdo al análisis de la información de la zona, se determinó que la sub cuenca 3 y 4 aportan agua a la primera sección de riego del río Cachapoal (norte y sur del río, respectivamente), mientras la sub cuenca 6 hace lo propio con la 3° sección del mismo río. Además se analizó el efecto de los escenarios de precipitación en la sub cuenca 12, que representa el río Claro, en el punto donde se extrae agua para la 1° del mismo.

La Figura 17 presenta gráficamente el efecto de los diferentes escenarios de precipitación sobre los caudales de los ríos a la salida de cada sub cuenca.






**Figura 17. Distribución mensual del caudal con 85% de probabilidad para cuatro cuencas modeladas.**

Se puede apreciar que existe un efecto del cambio en las condiciones de las precipitaciones sobre el agua superficial disponible en los ríos. La sub cuenca 3, que corresponde a la 1° sección del río Cachapoal, en la parte norte del mismo, presentó una reducción de caudal promedio anual de 24%, respecto al escenario medio, que a nivel de promedio mensual varió entre 32% y 13%, siendo crítico el periodo de diciembre a febrero, con valores sobre el 30% de reducción de la disponibilidad de agua. Por otro lado el escenario húmedo dio como resultado un aumento del promedio anual de caudal en el río de 18%, con variaciones de promedios mensuales máximo y mínimo de 24% y 7% respectivamente. Los mayores cambios, sobre 20%, fueron entre noviembre y marzo.

La sub cuenca 4, que corresponde a la 1° sección del río Cachapoal, en la parte sur del mismo, presentó una reducción de caudal promedio anual de 25%, respecto al escenario medio, que a nivel de promedio mensual varió entre 37% y 11%, siendo crítico el periodo de diciembre a febrero, con valores sobre el 30% de reducción de la disponibilidad de agua, al igual que abril. Por otro lado el escenario húmedo dio como resultado un aumento del promedio anual de caudal en el río de 20%, con variaciones de promedios mensuales máximo y mínimo de 26% y 15% respectivamente. Los mayores cambios, sobre 20%, fueron entre noviembre y marzo, además de mayo.

La sub cuenca 6, que corresponde a la 3° sección del río Cachapoal, presentó una reducción de caudal promedio anual de 21%, respecto al escenario medio, que a nivel de promedio mensual varió entre 32% y 8%, siendo crítico el periodo de enero y febrero, con valores sobre el 30% de reducción de la disponibilidad de agua. Por otro lado el escenario húmedo dio como resultado un aumento del promedio anual de caudal en el río de 21%, con variaciones de promedios mensuales máximo y mínimo de 27% y 9% respectivamente. Los mayores cambios, sobre 25%, fueron entre noviembre, enero y marzo.



La sub cuenca 12, que corresponde a la 1° sección del río Claro, presentó una reducción de caudal promedio anual de 67%, respecto al escenario medio, que a nivel de promedio mensual varió entre 100% y 6%, siendo crítico el periodo de diciembre a marzo, con valores sobre el 90% de reducción de la disponibilidad de agua, al igual que abril. Por otro lado el escenario húmedo dio como resultado un aumento del promedio anual de caudal en el río de 16%, con variaciones de promedios mensuales máximo y mínimo de 31% y 6% respectivamente. Los mayores cambios, sobre 20%, fueron entre mayo y septiembre.

## 4.5. Conclusiones

Los cambios en las precipitaciones se ven reflejados en la disponibilidad de agua en los ríos, y por lo tanto tienen un efecto sobre la agricultura regada. Estos efectos en la cuenca del río Cachapoal resultaron variables a nivel mensual y anual, dependiendo de la ubicación de cada sub cuenca.

Con escenarios de precipitaciones reducidas, consideradas como lluvias de 60%; 30% y 10% de probabilidad baja, media y alta respectivamente, en todas las sub cuencas se apreciaron reducciones de caudal promedios anuales mayores al 20%, siendo los meses de verano los más críticos. Los efectos más graves, donde los caudales incluso podrían desaparecer durante el verano, se presentan en ríos que cuentan principalmente con aportes pluviales, como es el caso de las sub cuenca 1; 12 y 10. En sub cuencas más altas, que son de tipo nivo pluvial o nival el efecto de escenarios secos podría conducir a reducciones de disponibilidad de agua de 30% durante el verano, como ocurre en las sub cuencas 3 y 4, que representan la 1° sección de Cachapoal.

Por otra parte, con escenarios de precipitaciones altas, consideradas como lluvias de 60%; 30% y 10% de probabilidad alta, media y baja respectivamente, en todas las sub cuencas se apreciaron aumentos de caudales promedios anuales cercanos al 20%, siendo máximo el aumento entre noviembre y marzo en las cuencas de influencia nivo pluvial. Por otra parte, en las cuencas bajas, cuya escorrentía es de origen pluvial el aumento más marcado se apreció durante los meses de invierno.

En sub cuencas más altas, que son de tipo nivo pluvial o nival el efecto de escenarios secos podría conducir a reducciones de disponibilidad de agua de 30% durante el verano, como ocurre en las sub cuencas 3 y 4, que representan la 1° sección de Cachapoal.

Por otro lado en zonas áridas como la cuenca de río Limarí las precipitaciones reducidas, consideradas como lluvias de 60%; 30% y 10% de probabilidad baja, media y alta respectivamente provocan reducciones importantes en la seguridad de riego ya que sólo en 60% de los años no se podría cubrir el 100% de la demanda hídrica. El escenario medio, que representa aproximadamente la situación actual en el 40% de los años no se cubre el 100% de la demanda de riego. Bajo el escenario húmedo los embalses permiten regar el 100% de la demanda de los cultivos casi la totalidad de los años. Si las condiciones climáticas futuras tienden a una reducción de las precipitaciones habrá que pensar en reducir la superficie regada de lo contrario en un alta proporción de los años se podría perder la cosecha por falta de agua.

## 5. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS

### 5.1. Variación de la productividad del agua en los cultivos

En vid de mesa cv. Crimson Seedles, en la zona alta del valle del Limarí, la productividad del agua se incrementa, al aplicar un 68% de los requerimientos del cultivo. Ello se debe a que el agua aplicada disminuye en una mayor proporción a la disminución del rendimiento del cultivo. Tal situación se produciría en un escenario climático de baja disponibilidad de agua. En el caso de la zona baja, si bien es cierto el rendimiento del cultivo es similar a la zona alta, los volúmenes de agua aplicada fueron mayores, en los tres tratamientos, al requerimiento del cultivo, generando valores menores de productividad del agua que la zona alta.

La vid Pisquera, var. Moscatel Rosada presenta los mayores valores de productividad del agua en la zona baja del valle, con valores cercanos a  $7,66 \text{ kg/m}^3$ , esto asociado principalmente a que en la zona baja del valle, los volúmenes aplicados son considerablemente menores a los requerimientos del cultivo, llegando a cubrir solo un 67% de dichos requerimientos. También se puede apreciar que aplicando hasta un 55% de los requerimientos del cultivo, este presenta rendimientos similares a que si se aplicara un 67%. A partir de ello se podría inferir que en un escenario con baja disponibilidad de recursos hídricos sería posible obtener buenos rendimientos y buenos niveles de productividad del agua.

En el caso de la zona alta del valle, en vid pisquera, la productividad del agua no supera los  $5 \text{ kg/m}^3$ , debido principalmente a un menor rendimiento, comparado con la zona baja, así como a mayores volúmenes aplicados. Cabe mencionar que en ninguno de los tratamientos se logró suplir la demanda del cultivo. En este caso, con aplicaciones cercanas a un 50%, los rendimientos no se ven afectados en gran medida.

En el caso de vid de mesa en la cuenca del Aconcagua, la variedad Flame Seedless presentó valores de productividad entre  $5,14$  y  $2,08 \text{ kg/m}^3$  en los tratamientos con mayor y menor restricción hídrica, respectivamente. Por otra parte, la variedad Thompson Seedless presentó valores un poco más altos: entre  $5,28$  y  $2,47 \text{ kg/m}^3$  para una mayor y menor restricción hídrica. Al comparar ambas variedades, es Thomson Seedless quien presenta los mayores valores de productividad del agua, sin embargo las diferencias existentes son mínimas.

El cerezo fue quien presentó los menores valores de productividad del agua de los cultivos en estudio, lográndose un valor máximo de  $1,85 \text{ kg/m}^3$ , para el caso del ensayo en el sector bajo de la cuenca del Cachapoal y aplicando sólo un 49% de la ETc. A mayores valores de agua aplicada (mayor % ETc), la productividad del agua fue menor; no existiendo grandes diferencias en rendimientos.

### 5.2. Estimación de la variación de la productividad del agua a nivel de cuenca

#### 5.2.1. Cuenca del Limarí

En la cuenca del Limarí, la actividad agrícola más importante es la fruticultura, seguida por la producción de forraje, la viticultura, producción de hortalizas y cultivos. A pesar de estar situados en una zona árida, es importante destacar la gran presencia de frutales de hojas persistentes, los cuales

tienen una demanda hídrica durante toda la temporada agrícola.

La demanda de agua en la cuenca del Limarí es mayor a la oferta hídrica, esto con datos obtenidos de informes de la Dirección General de Aguas. Por otra parte, se puede observar que la actividad más demandante es la agricultura, con un 87,7% del total de las demandas.

### 5.2.2. Cuenca del Aconcagua

En esta cuenca gran parte de la superficie es utilizada por frutales, tanto caducos como persistentes, le siguen las hortalizas y cultivos y luego las forrajeras.

Al igual que en la cuenca del Limarí, la demanda de agua de esta cuenca, está marcada por la agricultura, sin embargo en este caso, el porcentaje demandado del total, alcanza valores cercanos a un 70%, cabe destacar la importancia de la industria en la demanda, con un 11,2% del total.

### 5.2.3. Cuenca del Cachapoal.

En esta cuenca, los frutales de hoja persistente han disminuido su participación, no así los de hojas caducas, los cuales poseen cerca del 50% de la superficie plantada. En Cachapoal, toman importancia los cereales, los cuales se ubican en el segundo lugar de participación, seguido por hortalizas y cultivos y los viñedos con un 10 y 11% respectivamente.

Al analizar la oferta y demanda de la cuenca del río Cachapoal, se aprecia, al igual que en las otras cuencas, que la actividad con mayor consumo de agua es la agricultura, con un 67% aproximadamente del total demandado de la cuenca, le sigue el sector minero con un 11,3% del total. Esta cuenca presenta un superávit de 12,45m<sup>3</sup>/s.

## 5.3. Estrategias para el manejo del agua bajo escenarios climáticos probables

En el caso de Chile la situación climática y de disponibilidad de agua es bastante variada; existiendo una gran diversidad de condiciones climáticas a lo largo y ancho de nuestro país. Sin embargo, desde la zona central del país hacia la zona norte se dispone de recursos hídricos más limitados y es precisamente donde las condiciones climáticas son muy favorables para producir fruta de exportación; generándose un incremento de la superficie cultivada, que son muy vulnerables a períodos de sequía o de baja disponibilidad de agua.

En vista de ello y, considerando la legislación vigente, es posible plantear algunas estrategias que permitan enfrentar en el futuro escenarios climáticos poco favorables. Ellas se podrían orientar fundamentalmente a dos ámbitos de gestión: a nivel de cuenca hidrográfica y a nivel predial.

A nivel de cuenca hidrográfica es fundamental avanzar en estrategias orientadas a lograr una mayor regulación y control de los caudales naturales, a través de la construcción de embalses; permitiendo regular y distribuir el agua en función de los requerimientos de los diferentes sectores productivos, y tomando en cuenta las variaciones climáticas y de disponibilidad de agua en el tiempo. Al respecto, es importante sugerir la implementación del concepto de Tasas de Riego Referenciales, por zona climática y cultivo, con la finalidad de lograr mayores niveles de aproximación a la hora de establecer las demandas del sector agrícola, en una cuenca determinada. Ello permite realizar balances de agua más certeros, a nivel de cuenca, entre disponibilidad y demanda de agua.

En esta misma línea, las acciones deben estar orientadas a la impermeabilización (revestimiento y/o entubamiento) de la amplia red de canales de riego, aguas abajo de estas estructuras, que permitan eliminar o disminuir las pérdidas por conducción; posibilitando una mayor disponibilidad y eficiencia en el manejo del recurso. Tal acción también genera una distribución más equitativa entre los usuarios.

A nivel de usuario, las estrategias a implementar son variadas; sin embargo, dos de ellas aparecen como relevantes: incrementar la inversión en tecnificación del regadío a nivel predial (construcción de tranques de regulación corta, incorporación de métodos de mayor eficiencia) y capacitación de los agricultores y regantes en temas relacionados con el manejo del agua en su predio y en la cuenca hidrográfica. Ambas estrategias apuntan a hacer menos vulnerables a los usuarios frente a escenarios climáticos más adversos.

## 5.4. Conclusiones

En la cuenca del Limarí, en el cultivo de la uva de mesa, la productividad del agua es mayor a medida que el cultivo es sometido a una mayor restricción hídrica (entre 4,59 y 6,28 kg/m<sup>3</sup>), sin embargo la productividad de la tierra tiende a disminuir.

Por otra parte, en el cultivo de la vid pisquera, la mayor productividad del agua (7,81 kg/m<sup>3</sup>) se logra con una restricción intermedia del recurso hídrico (55% de ETc, en sector bajo); sin embargo las diferencias no son tan significativas entre los tratamientos aplicados, debido principalmente a que los volúmenes de agua aplicados, están por debajo de los requerimientos hídricos del cultivo.

En el caso de la cuenca del Aconcagua, en vid de mesa (Flame y Thompson Seedless), restricciones equivalentes a un 57% de la demanda del cultivo, generaron una mayor productividad del agua, equivalentes a 5,14 y 5,28 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

En la cuenca del Cachapoal, la productividad del agua del cerezo alcanzó un valor máximo de 1,85 kg/m<sup>3</sup>, en el tratamiento con mayor restricción hídrica, ubicado en la zona baja de la cuenca (sector El Abra).

Dadas las características climáticas del país y la localización de las cuencas estudiadas (zonas norte y central de Chile); es importante avanzar en la regulación y control de los cauces naturales de las cuencas, como una forma de lograr una mayor regulación y balance entre disponibilidad de agua y demanda del sector agrícola, permitiendo enfrentar con mayor éxito períodos de escasez del recurso agua. Paralelamente se debe avanzar en la impermeabilización de la red de canales y en propiciar una mayor inversión en tecnología de riego a nivel predial, conjuntamente con la implementación de programas de capacitación de usuarios en manejo del agua.

## 6. PROGRAMAS DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO EN CHILE.

### 6.1. Lanzamiento y difusión inicial del proyecto (tríptico)

El Seminario de Lanzamiento se efectuó en el contexto del VI Simposio Internacional de Riego en Frutas y Hortalizas, en Viña del Mar, Chile, el 2 de Noviembre del 2009, donde se contó con la asistencia de aproximadamente 50 investigadores de varias nacionalidades; entre ellos los coordinadores de los otros países participantes del proyecto: Argentina, Bolivia y Uruguay, En dicho lanzamiento se entregó un tríptico como material divulgativo con información del proyecto.

### 6.2. Desarrollo y mantenimiento de sitio Web

Dentro del proyecto, se confeccionó una página web, en la cual se entregan masivamente los antecedentes del proyecto. Dicha página web está disponible en el sitio web [www.riegoconosur.cl](http://www.riegoconosur.cl).

### 6.3. Presentación en Congresos, Seminarios, Talleres, Charlas Técnicas, Cursos y Días de Campo

Dentro del proyecto se han realizada reuniones, talleres y charlas técnicas; las cuales se enumeran a continuación:

- Recepción y Charla de difusión del proyecto para alumnos en gira de estudio de la Universidad Austral de Chile, la actividad se realizó en la ciudad de Ovalle e incluyó la visita a uno de los ensayos. Asistieron 36 alumnos, realizada el 2 de marzo del año 2010.
- Reunión técnica, esta actividad fue realizada el día 28 de Octubre de 2010, en el Auditorium de la Asociación de Agricultores Santa Rosa de Los Andes, región de Valparaíso. A esta actividad asistieron 70 personas y se trataron los siguientes temas:
  - Efecto del contenido de aire del suelo sobre relaciones hídricas y crecimiento vegetativo de uva de mesa cv Thompson Seedless.
  - Evaluación de ocho porta injertos en el cv Thompson Seedless bajo dos regímenes de riego.
  - Manejo de suelos en uva de mesa.
  - Evaluación nutricional de porta injertos en la variedad Thompson Seedless.
- Día de Campo realizado en el valle de Limarí, región de Coquimbo en el predio El Peñón, de propiedad de Rafael Prohens, el día 30 de noviembre de 2010. Este se denominó “Aplicación de diferentes tasas de riego en vides de mesa variedad Crimson” y asistieron 14 personas. En esta oportunidad se dio a conocer el proyecto a la comunidad y los primeros resultados obtenidos en el mismo predio.
- Día de Campo realizado en Aconcagua, región de Valparaíso, en el predio El Guindal de propiedad de Agrícola Brown con fecha 16 de Diciembre del 2010, esta actividad se denominó “Requerimiento hídricos de uva de mesa: Estudios de evapotranspiración”, y asistieron 44 personas.

- Reunión – Taller en el Centro experimental de INIA La Platina, ubicado en Santiago. En esta actividad se presentaron los resultados obtenidos hasta esa fecha en cada uno de los países participantes. Asistieron 24 profesionales de Argentina, Uruguay, Bolivia y Chile, realizada el 24 de mayo de 2011
- Reunión Técnica: “Uso del agua en vid pisquera en la Región de Coquimbo”, realizada en dependencias de la Cooperativa Control Pisquero, en la ciudad de Ovalle, 63 agricultores presentes, realizada el 10 de agosto de 2011.
- Participación en el 62º Congreso Agronómico de Chile. 3º Congreso Internacional de Agricultura en Zonas Áridas. Realizado en la ciudad de Iquique, Chile, realizado entre el 26 al 28 de octubre de 2011. Los trabajos presentados fueron:
  - Productividad del Agua en vid Pisquera cv. Moscatel Rosada, en dos zonas Agroclimáticas de la Provincia del Limarí, Región de Coquimbo.
  - Productividad del Agua en vid de mesa cv. Crimson, en dos zonas Agroclimáticas de la Provincia del Limarí, Región de Coquimbo.
- Seminario: “Comportamiento de vid pisquera variedad Moscatel Rosada, frente a restricciones de agua de riego”, se realizó en la ciudad de Ovalle, con una asistencia de 60 personas. Se finalizó con un almuerzo de camaradería para los asistentes, realizado el 27 de enero de 2012.
- Participación en el 7th International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops.
- Seminario Mejoramiento de la Productividad en Uva de Mesa de la Región de Coquimbo, expositor: Gabriel Selles.
- Participación en el 63º Congreso Agronómico, en la ciudad de Temuco, Chile, entre el 6 al 9 de noviembre de 2012. El trabajo que se presentó fue:
- Productividad del agua en vid pisquera variedad Moscatel Rosada, con diferentes volúmenes de riego, en la provincia de Limarí.

## 6.4. Planificación y desarrollo de Seminarios Internacionales

- Participación en el 1º Congreso Boliviano de Riego y Drenaje desde el 12 al 14 de julio de 2010. Reunión Anual Red Iberoamericana de Riego (RIAR). Reunión anual Plataforma de Riego (PRO-CISUR), realizada en La Paz, Bolivia. Los trabajos aceptados fueron:
  - *Evaluación del comportamiento de vid “pisquera” variedad Moscatel Rosada, sometida a tres tasa de riego, en dos localidades del valle del río Limarí, Chile. Primera Temporada.*
  - *Evaluación del comportamiento de vid de mesa variedad Crimson, sometida a tres tasa de riego, en dos localidades del valle del río Limarí, Chile. Primera Temporada.*

- Participación en el XVI Congreso Nacional de Irrigación, realizado en Culiacán, Sinaloa, México, realizado entre el 6 al 9 de septiembre de 2011. El trabajo presentado fue:
  - *Evaluación del comportamiento de vid de mesa variedad Moscatel Rosada, con riego diferenciado, en dos localidades del Valle Limarí.*
- Organización y Participación en Seminario Internacional de cierre y presentación de resultados del proyecto, denominado “Productividad del agua y cambio climático”, efectuado conjuntamente con el 2º Seminario Internacional de Riego en cultivos y pasturas, organizado por INIA Uruguay, en la ciudad de Salto, Uruguay, entre el 6 al 8 de noviembre de 2012. Se presentaron resultados finales del proyecto, obtenidos en todos los países participantes.

## 6.5. Manual de estrategias del manejo del agua de riego en los cultivos seleccionados.

Documento en proceso de elaboración coordinado por Uruguay, y donde cada país participante en el proyecto elaborara las estrategias de riego para los cultivos ensayados en sus países.

## 6.6. Publicaciones científicas

Durante el periodo de ejecución del proyecto, se han efectuado las siguientes publicaciones científicas:

- Espinosa, J., Uribe, H., Arumí, J., Rivera, D. y Stehr, A. 2011. Vulnerabilidad del recurso hídrico respecto a actividades Agrícolas en diferentes subcuencas del río Limarí. En Revista Gestión Ambiental N° 22, pp. 9-26
- Villagra, P., Sellés, G., García de Cortazar, V., Ferreyra, R., Aspillaga, C y Ortega, S. (2012) Estimation of Evapotranspiration and Crop Coefficient on Table Grape Trained on an Overhead Trellised System. Acta Horticulturae 922: 163:168.

## 6.7. Publicaciones divulgativas

- Selles, G., Villagra, P., Ferreyra, R., Aspillaga, C. y Zúñiga, C (2011). Requerimientos de agua de los parronales de uva de mesa: Avances de la investigación nacional. Revista Riego y Drenaje 6:38-42.
- Selles, G., Ferreyra, R., Aspillaga, C y Zúñiga, C. (2012). Requerimientos de agua de los parronales de uva de mesa: Área de suelo mojado y umbral de riego. Revista Riego y Drenaje N°7, pp. 10-14
- Boletín INIA Selles, G., Ferreyra, R., Aspillaga, C. y Zúñiga, C. 2012. Requerimientos de Riego en Uva de Mesa: Experiencias en el valle de Aconcagua. 80 p. Boletín INIA N° 242. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile.



## 6.8. Talleres de Seguimiento Técnico de proyectos FONTAGRO

- Participación en IV Taller de Seguimiento Técnico de Proyectos FONTAGRO, realizado en Tegucigalpa, Honduras desde el 24 al 26 de junio de 2009.
- Participación en V Taller de Seguimiento Técnico de Proyectos FONTAGRO, realizado en Cali, Colombia, desde el 2 al 4 de junio de 2010.
- Participación en VI Taller de Seguimiento Técnico de Proyectos FONTAGRO, realizado en Cochabamba, Bolivia, desde el 15 al 17 de junio de 2011. En él se dieron a conocer por parte del Director del proyecto, los avances de 2 años.
- Participación en VII Taller de Seguimiento Técnico de Proyectos FONTAGRO, realizado en Montería, Colombia, desde el 15 al 17 de junio de 2012. En él se dieron a conocer por parte del Director del proyecto, los avances de 3 años.
- Participación en VIII Taller de Seguimiento Técnico de Proyectos FONTAGRO, realizado en Montevideo, Uruguay, desde el 23 al 25 de julio de 2013. En él se dieron a conocer por parte del Director del proyecto, los resultados finales.

## 7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

- Luego de tres años de ejecución del proyecto, en conjunto con investigadores de Argentina, Bolivia y Uruguay, y en función de la experiencia nacional obtenida en la investigación desarrollada, se pueden mencionar las siguientes conclusiones generales y recomendaciones:
- Respecto del estudio de las tres cuencas seleccionadas, Limarí, Aconcagua y Cachapoal, es posible señalar lo diverso de sus características, en cuanto a recursos disponibles, infraestructura y sistema administrativo. Ello implica a futuro un tratamiento distinto respecto a cómo enfrentar períodos críticos de disponibilidad de agua. La situación aparece más compleja en las cuencas de Limarí y Aconcagua, donde los recursos de agua son más escasos, sin embargo, en ellas se ha incrementado fuertemente la explotación de especies frutícolas, como vides de mesa, paltos y cítricos. Debido a ello se hace muy recomendable establecer planes de regulación y contingencia para enfrentar períodos de sequía
- A nivel de ensayos de campo, se pudo obtener las funciones de producción de especies como: vides de mesa, vides pisqueras, paltos y cerezos; las cuales evidenciaron diferentes respuestas a los distintos niveles de estrés, por restricción y exceso de agua aplicada. Queda claro, sin embargo, que para condiciones de restricción hídrica las plantas responden en general con menores rendimientos y en algunos casos con disminución de tamaño de la fruta. Sin embargo, en función de los resultados, es posible establecer estrategias que permitan enfrentar períodos de sequía, de hasta un 50% de restricción, sin pensar en eliminar el cultivo.
- En términos de productividad del agua, expresada en  $\text{kg}/\text{m}^3$ , los resultados indican que los mayores valores se obtienen con menores cantidades de agua aplicada; siempre y cuando no haya una disminución significativa de los rendimientos; y lo cual tiene que hacerse congruente con una mantención de los niveles de calidad de la fruta. Todo indica que debe lograrse un equilibrio entre Productividad de la Tierra ( $\text{kg}/\text{ha}$ ) y Productividad del Agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). En vides de mesa y paltos es posible lograr productividades del agua cercanas a 5-6 y 2,5  $\text{kg}/\text{m}^3$ , respectivamente, con aplicaciones de agua equivalentes al 60% de ETc. En vides pisqueras se obtuvieron productividades del agua entre 5 y 8  $\text{kg}/\text{m}^3$ , con un 50% de ETc y en cerezos se logaron productividades entre 0,51 y 1,85  $\text{kg}/\text{m}^3$ , con valores de 50% de ETc.
- En relación a escenarios climáticos y disponibilidad de agua en las cuencas, sobre la base de la aplicación del modelo hidrológico SWAT; se definieron tres escenarios climáticos posibles de corto plazo (seco, medio y lluvioso) y se determinaron los caudales generados por SWAT, para cada escenario. A partir de ello se definió y graficaron los % de satisfacción de la demanda de agua del sector agrícola en las cuencas extremas, Limarí y Cachapoal. Los resultados evidencian la mayor fragilidad de la cuenca del Limarí, en la cual en condiciones de año seco, dicha demanda, al 100%, es satisfecha sólo entre un 20 y 40% de los años. Ello obliga a implementar estrategias que prevean tal situación y cautelen la economía agrícola del área.
- Respecto a difusión, la actividad desarrollada a través del proyecto, permitió la realización de variadas actividades de transferencia de resultados, como publicaciones científicas, técnicas y divulgativas y participación en eventos científicos y prácticos con agricultores.



FONTAGRO



## Resumen Extendido Uruguay

“Evaluación de los cambios en la productividad del agua, frente a diferentes escenarios climáticos, en distintas regiones del Cono Sur”

Código: FTG-8042/08



## EQUIPO DE TRABAJO

1. INTRODUCCIÓN
2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS: LÍNEA BASE
  - 2.1. Situación actual de los sistemas productivos (de todas las cuencas)
  - 2.2. Situación actual de la dotación y demanda de agua en las cuencas seleccionadas.
  - 2.3. Caracterización de la infraestructura de riego que existe en las cuencas.
3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESTRATEGIAS DE RIEGO (ENSAYOS DE CAMPO)
  - 3.1. Cuenca del río San Juan
    - 3.1.1. Metodología experimental
    - 3.1.2. Resultados y discusión (Función de producción)
    - 3.1.3. Conclusiones (Productividad experimental de los cultivos y estrategias de riego)
  - 3.2. Cuenca del Arroyo Pavón-Cufré
    - 3.2.1. Metodología experimental
    - 3.2.2. Resultados y discusión (Función de producción)
    - 3.2.3. Conclusiones (Productividad experimental de los cultivos y estrategias de riego)
  - 3.3. Cuenca del Arroyo Tala
    - 3.3.1. Metodología experimental
    - 3.3.2. Resultados y discusión (Función de producción)
    - 3.3.3. Conclusiones (Productividad experimental de los cultivos y estrategias de riego)
4. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DISPONIBILIDAD DE AGUA
  - 4.1. Selección del modelo hidrológico
  - 4.2. El Modelo SWAT
    - 4.2.1. Descripción del modelo
    - 4.2.2. Requerimientos de información
  - 4.3. Definición de escenarios climáticos.
    - 4.3.1. Metodología general
    - 4.3.2. Generadores climáticos
    - 4.3.3. Resultados (Resumen de los escenarios por cuenca)
  - 4.4. Modelación hidrológica de cuencas
    - 4.4.1. Cuenca del río Arapey, Salto/Uruguay
      - 4.4.1.1. Información utilizada en el modelamiento
      - 4.4.1.2. Calibración y validación del modelo
      - 4.4.1.3. Resultados del modelamiento bajo distintos escenarios climáticos
    - 4.4.2. Cuenca del río San Juan, Colonia
      - 4.4.2.1. Información utilizada en el modelamiento
      - 4.4.2.2. Calibración y validación del modelo
      - 4.4.2.3. Resultados del modelamiento bajo distintos escenarios climáticos
  - 4.5. Conclusiones
5. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS
  - 5.1. Variación de la productividad del agua en los cultivos
  - 5.2. Estimación de la variación de la productividad del agua a nivel de cuenca
  - 5.3. Estrategias para el manejo del agua bajo escenarios climáticos probables
  - 5.4. Conclusiones
6. PROGRAMAS DE DIFUSIÓN DEL PROYECTO
  - 6.1. Presentación en Congresos, Seminarios, Talleres, Charlas Técnicas, Cursos y Días de Campo
  - 6.2. Planificación y desarrollo de Seminario Internacional
  - 6.3. Manual de estrategias del manejo del agua
  - 6.4. Publicaciones científicas
  - 6.5. Publicaciones divulgativas
7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES



## EQUIPO DE TRABAJO

- Claudio García. Líder del Proyecto Uruguay, Investigador Principal INIA.
- Ana Laura Fernández. Investigador Asistente INIA (2009-2012).
- Andrés Lavecchia. Investigador Principal INIA (2009- 2010)
- Álvaro Roel. Investigador Principal INIA (2009-2011)
- Jorge Sawchik. Investigador Principal INIA.
- José Villamil. Investigador Principal INIA (2009- 2011)
- Guillermina Cantou. Investigador Asistente, INIA (2009-2010).
- Helenesio Cabral. Estudiante posgrado (Brasil, 2011-12).
- Gabrielle Boisrame. Estudiante posgrado (USA, 2012)
- Manuel Moura. Investigador Asistente INIA (2009-2012)
- César Burgos (Capataz de Campo, INIA)
- Sergio Bentancor (Operario Calificado de Campo, INIA)
- Mario Reineri (Auxiliar de Investigación, INIA)
- Mauro Lena (Asistente de Investigación, INIA)
- Vicente Ortiz (Asistente de Investigación, INIA)

## ASESORES INTERNACIONALES

- Walter Baethgen, Ph. D., U. de Columbia, USA
- Theib Oweis, Dr. ICARDA Siria
- Joan Girona, Dr. IRTA España
- Elías Fereres, Dr. IAS-CSIC España



## 1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática y los fenómenos extremos se van sucediendo cada vez con más frecuencia en Uruguay, afectando la economía sobretodo porque los sistemas productivos ligados a la agropecuaria son cada vez más intensivos en cuanto a su producción, lo cual también lo hacen más sensibles ante cualquier desviación de alguno de los factores que integran la función de producción.

Uruguay ha pasado de varios años con excesos hídricos provocando en algunas zonas del país, inundaciones importantes y rápidamente hay ocurrencia de temporadas y/o años secos donde las precipitaciones ocurridas en los meses de mayor demanda evaporativa son escasas o nulas.

Las técnicas de previsión meteorológica podrían ayudar a mejorar la calidad de la información, sin embargo, la falta de equipos modernos de observación, la urgente necesidad de información de calidad, la baja densidad de estaciones meteorológicas, la escasa fiabilidad de sus informes y la falta de vigilancia de las variables climáticas, se suman y hacen que la calidad de las previsiones no sean las deseadas, con adversos efectos en la vía de las políticas públicas y en la confianza en los datos climáticos.

Es de destacar la participación de diferentes grupos de investigadores y técnicos de campo fue conformado tanto por el INIA como por Facultad de Agronomía, además de los consultores previstos tanto de ICARDA (Dr. Oweis), del IRI (Dr. Baethgen) como de estudiantes de tesis de grado y de posgrado, tanto de Uruguay, Brasil como de Estados Unidos.



## 2. DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS: LÍNEA BASE

En la cuenca del A° Tala, en el norte de Uruguay la situación de los sistemas productivos era la que se presenta en el Cuadro 1, si bien es cambiante porque los cultivos se rotan con las pasturas, el esquema se mantiene y no hubo en el correr de los años que duró el proyecto, aumento ni disminución significativo de área en alguno de estos rubros. La superficie total de riego de la zona alcanza a 2.113 ha, existiendo un potencial regable de 5.800 ha.

**Cuadro 1.** Descripción de los sistemas productivos en la cuenca del A° Tala (Salto, Uy)

Rubros	Área total (ha)	Área (%)	Porcentaje del área total bajo riego (%)	Porcentaje del área total con potencial de riego (%)
Arroz	1.000	6	100	100
Feed lot	35	100	0,21	--
Cultivos de verano (sorgo, maíz y soja)	2.500	15	20-25	60%
Pasturas permanentes (semilleros, silo y pastoreo directo)	5.500	34	10	60%
Verdeos (pastoreo)	1.000	6	-	-
Campo natural (pastoreo)	6.520	39	-	-
<b>Total</b>	<b>16.520</b>	<b>100</b>		

La cuenca del Río San Juan se localiza en el departamento de Colonia (Figura 1), al Sur del Uruguay, entre las coordenadas 57° 54' LW, 57° 25' LW 33°53'LS y 34°18' LS, con un área aproximada de 74628.97 ha (746 km<sup>2</sup>). La elevación media es de 65 msnm.


Los usos de suelo principales corresponden a cultivos de secano y pasturas cultivadas.

Los suelos corresponden a Brunosoles Eutricos Típicos y Brunosoles subeutricos.

Esta cuenca tiene una superficie total de 762 km<sup>2</sup>. Se caracteriza por tener diversidad de sistemas de producción, principalmente hay una importante cuenca lechera y agricultura de secano (maíz, soja, sorgo y trigo) y más recientemente se ha incorporado sistemas de producción de olivos tanto para producción de aceite como de aceitunas en fresco.

Las Unidades de Suelos en esta cuenca son principalmente pertenecientes a la Unidad San Gabriel-Guaycurú y de la Unidad La Carolina (se presentan en la siguiente figura).

La cuenca del A° Pavón-Cufré se localiza en el departamento de San José, al Sur del Uruguay, entre las coordenadas 57° 54' LW, 57° 25' LW 33°53'LS y 34°18' LS, con un área aproximada de 74628.97 has (746 km<sup>2</sup>). La elevación media es de 65 msnm.



Los usos de suelo principales corresponden a cultivos de secano y pasturas cultivadas.

Los suelos corresponden a Brunosoles Eutricos Típicos y Brunosoles subeutricos.

En esta cuenca en particular si bien existen producción agrícola y lechera, interesaba para este estudio el efecto del agua sobre el cultivo de olivo, donde es una producción concentrada en esa cuenca y con alto porcentaje del área plantada con esta especie que está bajo riego por goteo.

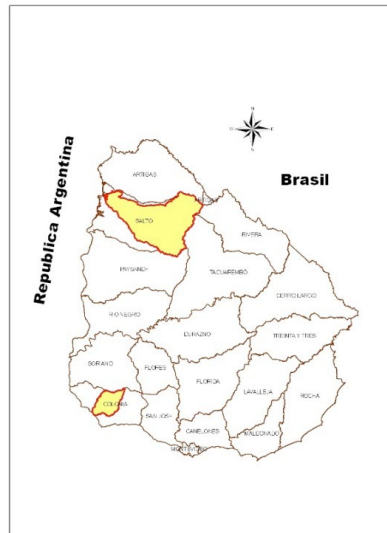
## **2.1. Situación actual de los sistemas productivos.**

En los últimos 10 años los sistemas productivos en el Uruguay han tenido un cambio muy importante en el uso del suelo. El mismo se ha intensificado y en algunos casos se ha dado un proceso de degradación del mismo. Esto ha hecho que sea de suma importancia la inclusión de rotaciones de cultivos y pasturas de manera que el desarrollo sea sostenible. Estas estrategias de adaptación son para mejorar la integración y adaptación al Cambio Climático en el desarrollo de la producción agropecuaria.

La inclusión del riego ha sido de las medidas necesarias para la adaptación al cambio climático y condición necesaria para mejorar la eficiencia de los diferentes usos del agua, además de poder disminuir la vulnerabilidad de los sistemas productivos a los eventos extremos que se producen con mayor frecuencia.

## **2.2. Situación actual de la dotación y demanda de agua en las cuencas seleccionadas.**

En el caso de Uruguay para cumplir con el fin y el propósito del proyecto se trabajó sobre 2 cuencas hidrológicas (una en el norte y otra en el sur del país) con características bien diferentes en cuanto a tamaño y producción dentro de cada cuenca. A medida que se avanzó en el proyecto y vieron las dificultades en la cuenca del sur de la toma y faltante de datos históricos se decidió sustituir esa cuenca (del río Santa Lucía) por otra cuenca en el sur con producción también intensiva como la otra pero con datos históricos (incompletos) de aforo de la cuenca. Esta otra cuenca fue la cuenca del río San Juan en el departamento de Colonia al oeste de Uruguay.



**Figura 1.** Mapa con las cuencas estudiadas (SWAT) en Uruguay.

Se delimitaron las cuencas. Se recogió la información censal del Censo Nacional Agropecuario del 2008-09.

Se recopiló información sobre:

- Ubicación y serie de información disponible en estaciones agrometeorológica e hidrológica
- Información histórica de la oferta de agua (superficial) de las cuencas.
- Información de los suelos de las cuencas, historia de chacras y riegos aplicados a los diferentes cultivos.
- Se comenzaron a confeccionar las distintas capas temáticas en un sistema de información geográfico

En el caso de la cuenca del norte (A° Tala, Salto), la estación agrometeorológica (automática desde 1995), con mayor cantidad de datos históricos es la que pertenece a INIA Salto Grande, a una distancia de 35 km en línea recta, donde se disponen de los datos de las variables más importantes para este estudio (precipitaciones, radiación solar, viento a 2 m de altura, temperatura media, máxima y mínima en forma horaria, humedad relativa horaria, etc.). Existe en la propia cuenca una estación meteorológica automática con registros horarios desde 2005 que también están disponibles no solo para este proyecto sino para todos los usuarios de la región de influencia de la misma.

Los datos de ambas estaciones meteorológicas fueron procesado y analizados de manera tal que se pudiera correr tanto en el modelo de generación de clima artificial como en el modelo SWAT. Estos resultados de la corrida de los modelos son presentados en el capítulo donde se trata de los resultados generales del proyecto.

En el caso de las cuencas del sur (A° Pavón-Cufré y Río San Juan en los departamentos de San José y Colonia, respectivamente), las estaciones agrometeorológicas utilizadas, con mayor cantidad de datos históricos es la que pertenece a INIA La Estanzuela y otra en la zona cercana a Libertad a aproximadamente 20 km del centro de la cuenca del A° Pavón-Cufré, donde se disponen de los

datos de las variables más importantes para este estudio (precipitaciones, radiación solar, viento a 2 m de altura, temperatura media, máxima y mínima en forma horaria, humedad relativa horaria, etc.).

Los datos de ambas estaciones meteorológicas, al igual que las estaciones de la cuenca del norte, fueron procesado y analizados de manera tal que se pudiera correr tanto en el modelo de generación de clima artificial como en el modelo SWAT. Estos resultados de la corrida de los modelos son presentados en el capítulo donde se trata de los resultados generales del proyecto.

### 2.3. Caracterización de la infraestructura de riego existe en las cuencas.

Las cuencas estudiadas tienen diferentes tipos de estructuras de riego. En el caso de la cuenca del A° Tala, en Salto, cuenta con una reserva de agua importante con un espejo de agua de 386 has y un volumen de agua de más de 12 000.000 m<sup>3</sup>, donde el riego se realiza todo por desnivel con dos canales de tierra importantes de distribución del agua que llega a 5500 has, donde se practica la rotación arroz-pasturas. Existen estructuras de hormigón de medición de caudal de agua en el canal y también medidores de hierro de menor porte para medir en los canales secundarios y terciarios de entrada de agua a las chacras.

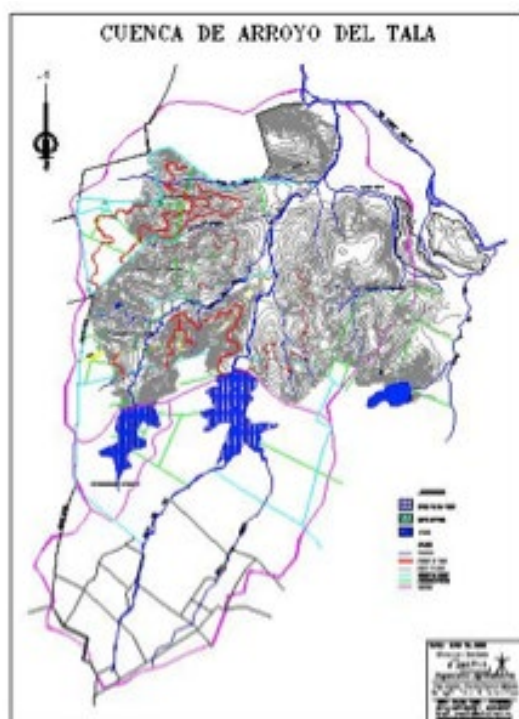


Figura 2. Cuenca del A° Tala (Salto, Uy) con las represas existentes y los canales de distribución del agua de riego.

La cuenca del Río San Juan, se basa principalmente en pozos de bajo caudal (15 a 20 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>) o represas de porte medio o chico. El riego en la mayoría de los casos es por aspersion móvil de bajo caudal o por goteo. El tamaño del área que usan los productores para riego son menores a 100 has.

### 3. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESTRATEGIAS DE RIEGO (ENSAYOS DE CAMPO)

Los ensayos experimentales que se desarrollaron durante los años que duró el proyecto financiado por Fontagro estaban relacionados con los sistemas productivos más importantes que estaban bajo riego en cada una de las cuencas estudiadas. Por esto es que en la cuenca de Salto (A° Tala) se realizaron experimentos de riego en pasturas ya que el sistema productivo predominante en esa cuenca es la rotación arroz-pasturas. En la cuenca del sur (A° Pavón-Cufre) el cultivo bajo riego más importante es la papa y en la cuenca del Río San Juan en el litoral sur de Uruguay el cultivo más importante bajo riego es el olivo.

Se plantearon diversos experimentos en las cuencas donde se quería estudiar el efecto que el riego suplementario provocaba tanto en la producción de forraje en una rotación arroz-pastura como en la producción de aceite en la cuenca del sur y como afectaba el exceso de agua en la producción de papa.

#### 3.1. Cuenca del Río San Juan.

En el caso de la cuenca del Río San Juan los ensayos tuvieron como objetivo: “Cuantificar el efecto que tiene el manejo del riego deficitario sobre la demanda de agua de plantas de olivo, basado en la evapotranspiración máxima del cultivo.” El objetivo general de este experimento fue: evaluar la producción de olivos (*Olea europaea* L.) cultivar “Arbequina” aplicando diferentes láminas de riego.

Los objetivos específicos fueron: a) evaluar la tasa de luminosidad según la posición dentro de la copa del árbol de olivos a lo largo del año. b) estudiar el comportamiento del crecimiento de la circunferencia del tronco de los árboles de olivos según las diferentes láminas de riego aplicadas. c) evaluar la relación entre producción de aceite de oliva y la lámina de riego aplicada.

##### 3.1.1. Metodología Experimental

Este trabajo fue conducido durante la zafra 2010-11, 2011-12 y 2012-13 en dos predios comerciales del departamento de Colonia. (Ver fotos 1 y 2)

Se utilizaron plantas de olivo de la variedad Arbequina a las cuales se le aplicaron diferentes láminas de riego. La fecha de comienzo de los tratamientos fue a partir de noviembre de 2010.

Los tratamientos de riego consistían en la reposición del 50, 100 y 150 % de la evapotranspiración del cultivo (ETc) estimada a partir de la ecuación de Penman-Monteith, más un testigo en secano que recibió solamente el agua de lluvia. Se comenzaban los riegos una vez agotado 25 mm de agua disponible del perfil del suelo. El marco de plantación es 7 m entre filas y 5,5 m entre plantas dentro de la fila. El sistema de riego era por goteo donde se variaba el caudal del emisor para completar los tratamientos, resultando en 4; 8 y 12 litros por hora según los tratamientos correspondientes.

La cosecha se realizó en forma manual y se evaluó cada planta por separado, se tomaron muestras para los análisis de humedad, ácidos grasos, materia seca y producción de aceite por tratamiento. Los resultados fueron sometidos a análisis de la varianza y las medias de los tratamientos comparadas por regresión simple con una probabilidad de error de 5%.



**Foto 1.** Cosecha de olivo en predio comercial, departamento de Colonia, Uruguay. Marzo 2011.



**Foto 2.** Vista del experimento del Sitio 2, San Pedro, 2010-11.

### 3.1.2. Resultados y discusión

De manera de tener una lectura más fácil se presentarán primero todos los resultados para el sitio 1, La Primavera y luego los resultados obtenidos para el sitio 2, San Pedro.

Se presenta en el Cuadro 2, los resultados del análisis químico de suelo y textura para el horizonte más superficial del perfil (0-25 cm de profundidad). Los datos de pH fueron realizados en suspensión suelo: agua relación 1:2.5; la materia orgánica por el método de Walkey-Black, el análisis de fósforo (P) por Bray 1, calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) en acetato de amonio 1 N a pH7 y la textura por el método de Bouyoucos.

Se realizó un seguimiento del análisis foliar de las plantas de olivos en cada sitio y en cada una de las parcelas de manera de mantener un balance nutricional adecuado para el normal desarrollo de las aceitunas y que la nutrición vegetal no fuera una limitante para la respuesta al riego. Los resultados del análisis foliar realizado desde el año 2009 hasta 2012 son presentados en el informe ampliado.

**Cuadro 2.** Análisis químico del suelo del sitio 1 (La Primavera) con el cultivo de olivos, al comienzo de los experimentos (2009).

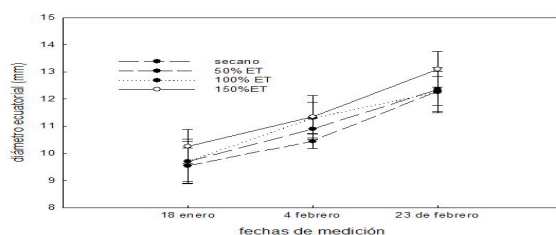
Sitio	Prof (cm)	pH	M.O. (%)	P Ca		K Mg		Ar	Limo %	Arc	Clase Textural
				ppm		meq/100g	suelo				
1	0-20	6,2	3,9	21	8,7	0,7	3,2	17	56	27	Franco-Limoso

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de la zafra 2010-11, de lámina de riego aplicada a cada tratamiento y las precipitaciones ocurridas en el local del experimento. La mayor lámina aplicada durante todo el ciclo del cultivo fue de 375 mm para el tratamiento que recibió el 150% de la ETc, además de los 359 mm de las precipitaciones ocurridas en ese período. La evapotranspiración del cultivo (ETc) estimada por la ecuación Penman-Monteith, para el período de evaluación de este experimento (25-10-2010 al 28-02-2011) fue de 778 mm.

**Cuadro 3.** Lámina de riego total aplicada a los tratamientos y precipitación total durante el desarrollo del ciclo del cultivo de la aceituna. INIA Las Brujas, 2011.

Variable controlada	secano	50%	100%	150%
Riegos pre-tratamientos (mm)	72	72	72	72
Lámina de riego (mm)	0	101	202	303
Lámina total de riego (mm)	0	173	274	375
precipitaciones (mm)	359	359	359	359
Total de agua recibida por tratamiento (mm)	431	532	633	734

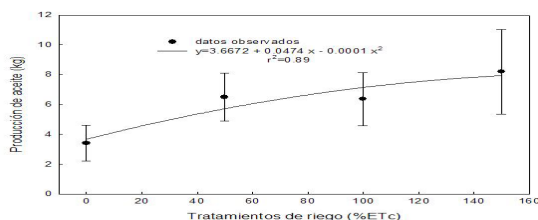
Fueron realizadas medidas de diámetro ecuatorial de la aceituna de manera de observar si el riego tenía efecto en el crecimiento. Se presenta en la Figura 3 el valor del diámetro ecuatorial medido en tres fechas durante el crecimiento del cultivo. Se verificó un efecto en el riego resultando en un mayor diámetro aquellas aceitunas que recibieron mayor cantidad de agua (150% de la ET), no existiendo diferencias significativas entre los otros tratamientos de riego y el testigo.



**Figura 3.** Diámetro ecuatorial de aceituna para los diferentes tratamientos de riego, promedio de 10 aceitunas en cada medida. INIA Las Brujas, 2011.

El seguimiento de la humedad del suelo fue realizado con equipo automático de FDR (Frequency Domain Reflectometry), colocado en todos los tratamientos y a diferentes profundidades. El sensor a 80 cm de profundidad no manifestó en los tratamientos de 50 (datos no mostrados) y 100% de la ET variación en el contenido de humedad, lo cual podría estar indicando que a esa profundidad todavía no han explorado las raíces de los árboles seguramente por ser todavía muy jóvenes o por encontrar nutrientes y humedad suficiente en los horizontes más superficiales o que el agua suplementada vía riego no fue la suficiente para cubrir las necesidades del cultivo. Sin embargo en el tratamiento de riego de 150% de la ET se nota una variación en el contenido de agua en el suelo (datos no presentados en este informe ejecutivo).

A la cosecha se pesaron todas las aceitunas de cada árbol y se realizó una muestra compuesta por tratamiento para evaluar peso total por cada uno de los mismos. La Figura 4 muestra la relación entre la producción de aceite por parcela y los tratamientos de riego aplicados.



**Figura 4.** Rendimiento de aceite promedio de cada parcela, en relación al tratamiento de riego aplicado durante el ciclo de crecimiento 2010-11. Sitio 1, La Primavera, INIA Las Brujas, 2011.

Se puede observar una respuesta al agregado de agua vía riego en la producción de aceite, para este primer año de investigación en riego en plantas de 4 años de edad. El tratamiento testigo, solo con agua de lluvia recibió 431 mm en todo el período. El tratamiento que solo recibió agua de lluvia produjo 245 kilos de aceite por hectárea en el promedio de las cuatro repeticiones, mientras que el tratamiento con mayor cantidad de agua (150% de la ET) produjo 590 kilos de aceite por hectárea (datos no presentados).

Para este primer año de evaluación se observó una respuesta significativa al agregado de agua vía riego, no detectándose diferencias entre el tratamiento del 50 y 100% de la ET en la producción de aceite.



En el Cuadro 4 se presentan los resultados de la zafra 2010-11, en el sitio 2, de lámina de riego aplicada a cada tratamiento y las precipitaciones ocurridas en el local del experimento. La mayor lámina aplicada durante todo el ciclo del cultivo fue de 369 mm para el tratamiento que recibió el 150% de la ET, además de los 359 mm de las precipitaciones ocurridas en ese período. La evapotranspiración estimada por la ecuación Penman-Monteith, para el período de evaluación de este experimento (25-10-2010 al 28-02-2011) fue de 778 mm. El trabajar con déficit hídrico controlado en climas donde ocurren lluvias que recargan el perfil del suelo, tienen la ventaja de poder utilizar el agua disponible que tiene el suelo entre dos lluvias sucesivas y el riego se utiliza solamente como complemento de las mismas.

**Cuadro 4.** Lámina de riego total aplicada a los tratamientos y precipitación total durante el desarrollo del ciclo del cultivo de la aceituna. Sitio 2, San Pedro, 2010-11.

	secano	50%	100%	150%
riegos pre-tratamientos (mm)	52	52	52	52
Lámina de riego (mm)	0	106	211	317
Lámina total de riego (mm)	0	168	263	369
precipitaciones (mm)	359	359	359	359
total de agua recibida por tratam. (mm)	411	527	622	728

### 3.1.3. Conclusiones de la cuenca del río San Juan

Se trabajó en dos sitios de producción comercial de aceite de oliva. Se lograron determinar funciones de respuesta al agua en los tres años ensayados. Existió un incremento de la producción de aceitunas y de producción de aceite a medida que se incrementó el agregado de agua vía riego hasta el tratamiento de 100% de la evapotranspiración. Estos datos obtenidos sumado a las evaluaciones de fisiología de la planta ayudaron a entender mejor la respuesta en plantas jóvenes de olivo al agregado del agua de riego en una situación climática donde las lluvias en general son insuficientes, mal distribuidas y erráticas.

## 3.2. Cuenca del A° Pavón-Cufré

En la cuenca del A° Pavón-Cufré se realizaron los experimentos relacionados con papa aplicando diferentes láminas de riego. (ver fotos 3 y 4)

### 3.2.1. Metodología Experimental.

Los tratamientos aplicados fueron 3 láminas de riego de acuerdo a la evapotranspiración máxima del cultivo de papa, más un testigo en secano, que recibía solamente el aporte del agua de lluvia. Los tratamientos eran la reposición del 50, 100 y 150% de la ETc acumulada. El comienzo de los riegos se realiza cada vez que se agotan 25 mm de agua en el perfil del suelo en la profundidad de las raíces. Fueron instalados sensores FDR en el campo a diferentes profundidades y en los tratamientos más contrastantes de manera de ir monitoreando el consumo de agua en los diferentes perfiles del suelo. El riego fue realizado por goteo, con un caudal de 4.8 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. La lámina se hacía variar por el número de goteros colocados en cada línea, de manera que el tiempo de riego fuera el mismo. La temporada de riego fue desde finales de octubre hasta fin de febrero.



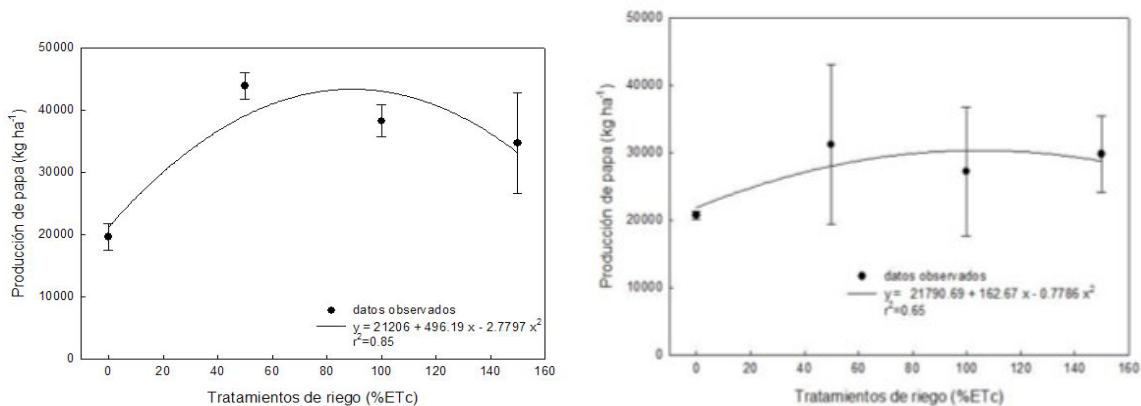
**Foto 3.** Vista del experimento de riego por goteo en papa, con aplicación de diferentes láminas de riego. San José, 2010-11.



**Foto 4.** Vista de la caja que contiene Datalogger con los sensores FDR instalados en los tratamientos con riego y secano en el cultivo de papa.

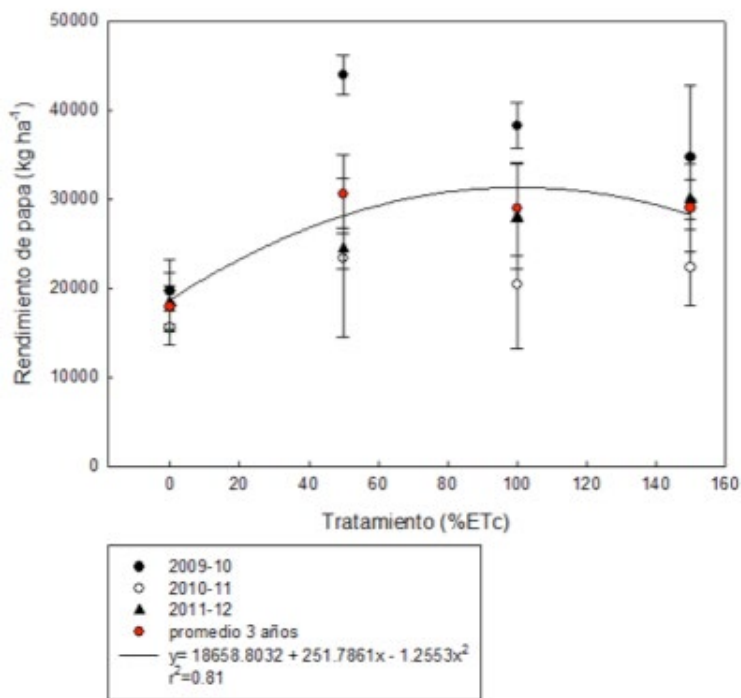
### 3.2.2. Resultados

Los resultados se presentan en las Figuras 5 y 6, correspondientes a la producción de papa obtenida en los diferentes años de evaluación del experimento de la aplicación de diferentes láminas de riego.



**Figura 5.** Respuesta de la producción de papa según las diferentes láminas de riego aplicadas, 2009-10 y 2010-11.

Relación entre rendimiento de papa y lámina de riego aplicada durante las zafas 2009-2012. Departamento de San José, Uruguay.



**Figura 6.** Relación entre el rendimiento de papa y la lámina de riego aplicada, promedio de los 3 años de experimentación.

### 3.2.3. Conclusiones de la cuenca A° Pavón-Cufré

Se trabajó en dos sitios de producción comercial de papa. Se lograron determinar funciones de respuesta al agua en los tres años ensayados. Los ensayos demostraron un incremento de la producción y la calidad de tubérculo hasta el agregado de 50% de la evapotranspiración del cultivo. No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos con mayor agregado de agua de riego

### 3.3. Cuenca del A° Tala (Salto)

En la cuenca del A° Tala (Salto), se estudió la respuesta a la aplicación de diferentes láminas de riego en pasturas. Estas pasturas están dentro de un sistema de rotación de pasturas-arroz, donde el uso del riego es posible por toda la infraestructura disponible para el cultivo de arroz.

Se desarrollaron dos tipos de experimentos de riego durante los años de financiación con Fontagro. Uno de ellos tuvo como objetivo desarrollar tecnologías de riego por melgas (también llamadas bordos) tendiente al aumento de la eficiencia de uso tanto del agua como de la mano de obra y la uniformidad del riego. El otro fue un experimento de respuesta de producción de materia seca al agregado de agua vía riego.

#### 3.3.1. Metodología experimental.

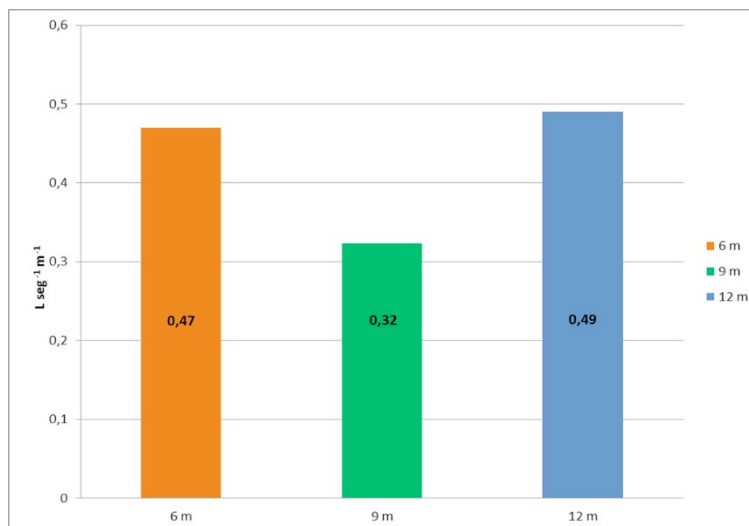
El experimento comenzó en octubre de 2010 y sigue hasta el presente, en la cuenca del A° Tala, dentro del establecimiento “El Junco”, ubicado en la Colonia A. Rubio, departamento de Salto, sobre un vertisol háplico de la Unidad Itapebí - Tres Árboles. Este suelo se caracteriza por un alto contenido de materia orgánica, alto porcentaje de saturación de bases, textura arcillosa, de drenaje moderadamente bueno a bueno. Tiene un horizonte A que alcanza los 80 cm de profundidad. La pastura convencional estaba compuesta por raigrás, lotus y trébol blanco, sembrada en marzo de 2009.

#### 2.3.2. Resultados y discusión

Para el caso de las curvas de avance la diferencia que existió en tiempo de avance, principalmente entre el tratamiento de 9m vs los de 6m y 12m de ancho de melga. Esto se explica por la diferencia de caudales en relación a los anchos de melga; el  $Q$  (L /seg/m de ancho) en el tratamiento de 9m fue un 33 % menor al que se obtuvo en el promedio de los demás tratamientos.

Para el caso de las curvas de receso se observó que la forma de las mismas fue idéntica para los tres tratamientos independientemente del ancho de melga y también del caudal aplicado (datos no presentados).

En la siguiente figura se presentan los caudales utilizados promedio en cada tratamiento de ancho de melga durante la zafra 2010-11.



**Figura 7.** Caudal de entrada de los distintos tratamientos (6, 9 y 12m) “Q”, expresada en L /seg / m de ancho para los tratamientos regados. Cuenca A° Tala, Salto, 2011-12.

**Cuadro 5.** Lámina aplicada (mm) promedio a cada tratamiento, caudal promedio (L /seg) y número de riegos realizados para cada tratamiento durante la zafra 2010-11, Salto 2011.

Registros	Tratamientos		
	6 m	9 m	12 m
Lámina (mm)	523	463	537
Caudal (L /seg)	2,8	2,9	5,8
N° de riegos	9	9	9

Para el total del período del ensayo la lámina aplicada promedio fueron 508 mm, distribuidos en 9 riegos, resultando en una lámina promedio por riego de 56 mm.

Fueron realizados cinco cortes de la pastura durante el ciclo de riego (octubre de 2010 a marzo de 2011).

No existió diferencia significativa entre los diferentes anchos de melga en cuanto a la cantidad de agua aplicada, debido a lo cual anchos mayores (12 m) de melga significan menor número de melgas con un costo de energía de preparación de las melgas menor y menor costo del riego por la utilización de menos compuertas por área de riego.

La producción de forraje aumentó significativamente en las parcelas regadas en relación al testigo que recibió solamente agua de lluvia, durante el período de evaluación (octubre 2010 a marzo 2011)

El otro experimento que se estableció fue la aplicación de diferentes láminas de riego. El diseño experimental fue de parcelas al azar con tres repeticiones donde los tratamientos fueron diferentes láminas de riego que se aplicaban de acuerdo a la demanda estimada por la ecuación de Penman-Monteith, donde se regaba toda vez que la evapotranspiración de referencia alcanzaba los 20, 40 y

60 mm; más un tratamiento en seco que recibió solamente el agua de lluvia. El largo promedio de las melgas fue de 45 m y el ancho de las mismas fue de 9 m. La pendiente promedio de las mismas fue de 1.3%.

**Cuadro 6.** Lámina aplicada (mm) promedio a cada tratamiento y número de riegos realizados para cada tratamiento durante la zafra 2011-12, Salto 2012.

Tratamientos (mm)	Lámina de riego (mm)	Nº de riegos
0	0	0
20	323	10
40	235	4
60	206	3

La producción en el corte del mes de octubre es presentado en la Cuadro 7, donde no fueron observadas diferencias significativas entre los tratamientos, lo cual demuestra por un lado la homogeneidad entre tratamientos y bloques para minimizar las variaciones extra tratamientos y por otra parte la recuperación en el período invernal de la pastura.

**Cuadro 7.** Producción de materia seca (kg ha<sup>-1</sup>) promedio de la aplicación de los tratamientos de riego para el mes de octubre 2011 y marzo 2012, Salto 2012.

Tratamientos	oct-11	mar-12
0	2880 a	897 a
20	2855 a	2615 b
40	2843 a	2564 b
60	2651 a	2519 b

*Letras en columnas seguidas de la misma letra no presentan diferencias significativas con una  $p < 0.05$  según test DMS.*

El efecto del riego desde octubre a marzo provocó un aumento de aproximadamente 1800 kg de materia seca por hectárea, esto significó un aumento de producción de forraje provocado por el riego de casi 3 veces más que en seco.

La eficiencia de aplicación de agua vía riego por superficie fue de más del 70% en el promedio de los tratamientos aplicados. La eficiencia en el uso del agua por parte de la planta fue de 10 a 1 (kg de MS vs mm aplicado) aumentando ese valor cuando solo comparamos el período de riego.

La producción de forraje aumentó significativamente en las parcelas regadas en relación al testigo que recibió solamente agua de lluvia, durante el período de evaluación (octubre 2011 a marzo 2012).

**Cuadro 8.** Riegos aplicados en cada tratamiento de lámina de riego, precipitaciones registradas y totales de agua recibida por cada tratamiento, Cuenca A ° Tala, Salto, 2010-2012.

Lámina de riego	Riegos (mm)		Pp (mm)		Total (mm)	
	2010-11	2011-12	2010-11	2011-12	2010-11	2011-12
0	0	0	295	729	295	729
20	606	323	295	729	901	1052
40	463	235	295	729	758	964
60	378	180	295	729	673	909

El efecto del riego desde octubre a marzo provocó un aumento de más del 50% en la producción total de materia seca durante los dos años de experimento. Si se toma en cuenta solamente el período de riego el aumento de producción de forraje provocado por el riego fue 3 veces más que en seco. La eficiencia de aplicación de agua via riego por superficie fue de más del 65% en el promedio de los dos años. La eficiencia en el uso del agua por parte de la planta fue de 7 a 1 (kg de MS vs mm aplicado) aumentando ese valor cuando solo comparamos el período de riego.

### 3.3.3. Conclusiones de la cueca del A° Tala (Salto)

En el estudio del diseño de anchos de melgas no se observaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, lo cual anchos mayores (12 m) de melga significan menor número de melgas con un costo de energía de preparación de las melgas menor y menor costo del riego por la utilización de menos compuertas por área de riego.

La producción de forraje aumentó significativamente en las parcelas regadas en relación al testigo que recibió solamente agua de lluvia, durante el período de evaluación (octubre 2010 a marzo 2013). Dicho aumento de producción de forraje provocado por el riego fue de 53 % más de materia seca con respecto al tratamiento de seco.

## 4. ESCENARIOS CLIMÁTICOS Y DISPONIBILIDAD DEL AGUA.

### 4.1. Selección del modelo hidrológico.

Los modelos hidrológicos han sido desarrollados y aplicados de manera creciente durante las últimas cuatro décadas. Este incremento sostenido se debe principalmente a dos motivos. Uno de ellos se basa en que los modelos han sido mejorados a partir de nuevas metodologías que surgieron del proceso de investigación. El otro motivo radica en la demanda de nuevas herramientas mejoradas y el interés creciente de trabajar con los recursos hídricos.

Existe una gran variedad de modelos hidrológicos, con distintos enfoques. Los puramente empíricos predicen caudales a largo plazo para aguas superficiales, como por ejemplo el modelo MONERIS (Behrendt and Opitz, 2000). Asimismo existen modelos híbridos de dinámica tridimensional que trabajan sobre una plataforma SIG (Sistema de información Geográfico), como es el caso de MIKE SHE (Boggild et al., 1999) y SWAT (Rosenthal et al., 1995).

## 4.2. El Modelo SWAT.

SWAT es un programa de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas (Arnolt et al, 1990). Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes.

### 4.2.1. Descripción del modelo

El modelo combina ecuaciones de base física y empírica y utiliza datos de entrada que se encuentren rápidamente disponibles. Asimismo, permite a los usuarios estudiar los impactos a largo plazo. SWAT está definido por 8 componentes principales: hidrología, clima, erosión y sedimentación, temperatura de suelo, fenología vegetal, nutrientes, pesticidas y manejo del suelo.

### 4.2.2. Requerimientos de información

La información requerida para correr el modelo SWAT se puede resumir en climática, altimétrica, tipo de suelos, uso de suelo y caudales observados para la calibración.

## 4.3. Definición de escenarios climáticos.

Los escenarios climáticos se generan para este proyecto siguiendo el presente protocolo:

Se prepararon archivos climáticos para ser usados por el software Lars (año, día juliano, temp min, temp max, precipitación y Radiación o Heliofania medida en horas y graba en formato DAT con formato de 5,4,7,7,7,7 en Excel guardar como texto con espacios (\*.PRN) luego convertir a DAT para usarlo en Lars.

Se corre Lars con línea base para 999 años y luego ordenar de mayor a menor el resultado de precipitación total de los meses octubre, noviembre y diciembre (OND) para cada año. Luego se divide en 3 partes de 333 años cada uno (bajo, normal y alto). Obtención de series climáticas:

- 1) Serie normal se toman al azar 33 años de cada grupo
- 2) Serie seca se toman al azar 60 datos de totales más bajos, 30 del medio y 10 de los totales más altos.
- 3) Serie húmeda se toman al azar 60 de los totales más altos, 30 del medio y 10 de los más bajos.

Ordenar de acuerdo al número de año de menor a mayor y correr el modelo SWAT.

A modo de ejemplo en la siguiente figura (Figura 8) se presentan los resultados para la cuenca del Río San Juan, de las corridas de precipitación y caudal de la cuenca para una serie de datos generados (sintéticos) desde 2020 al 2119.



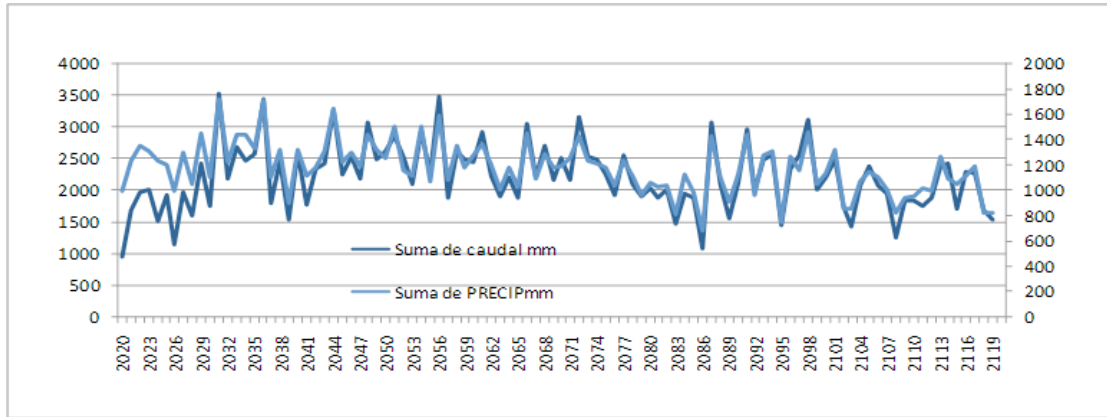


Figura 8. Generación de las precipitaciones y caudales desde 2020 al 2119 para una serie lluviosa (probabilidad del 60% de años con totales de precipitaciones más altos en S-O-N). Cuenca del río San Juan.

El caso opuesto, la generación de un clima con probabilidad de año seco mayor a lo normal es lo que se presenta en la Figura 9. Este escenario al igual que el anterior sirvió para conocer los caudales disponibles en las diferentes cuencas de estudio.

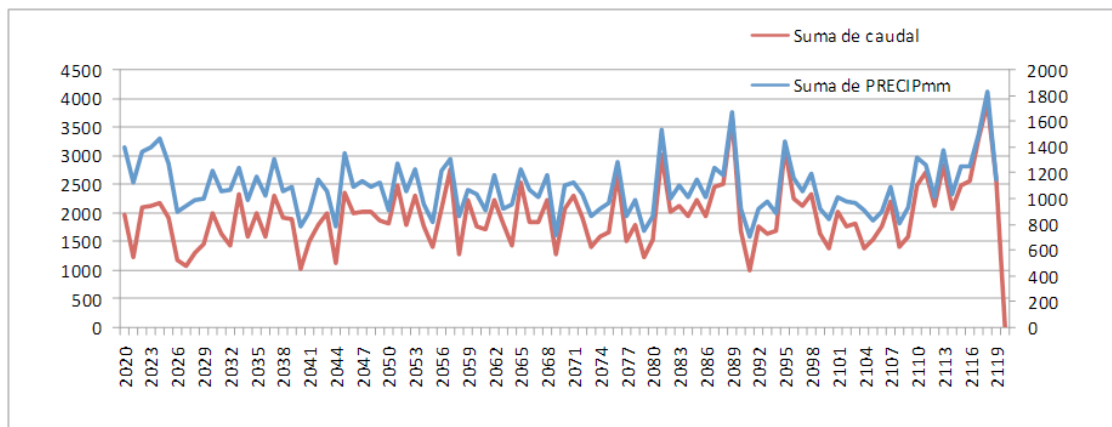


Figura 9. Generación de las precipitaciones y caudales desde 2020 al 2119 para una serie seca (probabilidad del 60% de años con totales de precipitaciones más bajas en S-O-N). Cuenca del río San Juan.

## 4.4. Modelación hidrológica de las Cuencas

### 4.4.1. Cuenca del Río Arapey, SALTO-URUGUAY

La cuenca del Río Arapey Grande se localiza en el departamento de Salto, al norte del Uruguay, entre las coordenadas 57° 06' W, 56° 07' W 30° 54' S y 31° 51' S, con un área aproximada de 6925.86 km<sup>2</sup>. La elevación media es de 120 msnm.

Los suelos corresponden a Litosoles Eutrícos Melánicos, Brunosoles Eutrícos Típicos y Vertisoles Háplicos.

#### 4.4.1.1. Información utilizada en el modelamiento

Fue realizada la recopilación de los siguientes datos que se utilizaron como entrada para realizar la modelación en SWAT. Se utilizó la información cartográfica proyectada en WGS84/UTM zona 21S (EPSG: 32721)

Fue asignado para cada uno de los usos definidos en esta clasificación, que se hallaban en la cuenca, un correspondiente en el CROP que viene cargado en el SWAT pues eran usos comunes y juntamos clases por CROP.

- **PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN:**
  - DEM: para el departamento de colonia *srtm\_salto.img-SRTM 90m NASA*
  - Outlet: *aforo\_arapey\_projet.shp*-punto aforado en el arroyo San Juan por DINAGUA
  - Landuse: usos determinados por la RENARE. *Clasificacion\_litoral\_comple.img*
  - Lookuptable de usos de suelos que contiene los nombres de los CROP correspondientes en la base de usos de suelo que ya trae cargado el SWAT : *lookupsuelos.dbf*
  - Suelos: se utilizó la clasificación de suelos del uruguay.: *soil.img*
  - Lookup table de suelos: *suelos.dbf* fueron cargaos los suelos del país en la base de SWAT
  - Pendientes: se definieron 3 rangos de pendientes 0 a 1% ; 1 a 3%; 3 a 100%
  - Se definieron los umbrales para las HRUs en 4/2/7% para Landuse/Soil/slope, generándose 3 HRU.
  - Fueron utilizado el coeficiente de rugosidad para la ecuación de manning estimado para la cuenca en 0.035 que es el mas común para el país
  - Los datos de clima Desde 1/7/1970 al 1/8/2010 ingresados de la Estación meteorológica utilizada (Salto Grande) son Precipitaciones *PCPSTN.dbf*; *SALTOPCP.dbf*), Radiacion solar (*SLRSTN.dbf*; *SALTOSLR.dbf*), Temperatura (*TMPSTN.dbf*; *SALTOTMP.dbf*) ,Viento (*WNDSTN.dbf*; *SALTOWND.dbf*).
  - Datos observados usados para calibración y validación: Los datos de caudales aforados en el Río Arapey chico en el período 1/9/1987 – 26/08/2010 con un % alto de días sin aforar. (21% de los datos).

Los resultados de los caudales observados mensuales en comparación con los obtenidos en la modelación (sin los años faltantes de medidas de caudal) son presentados en la Figura 10.

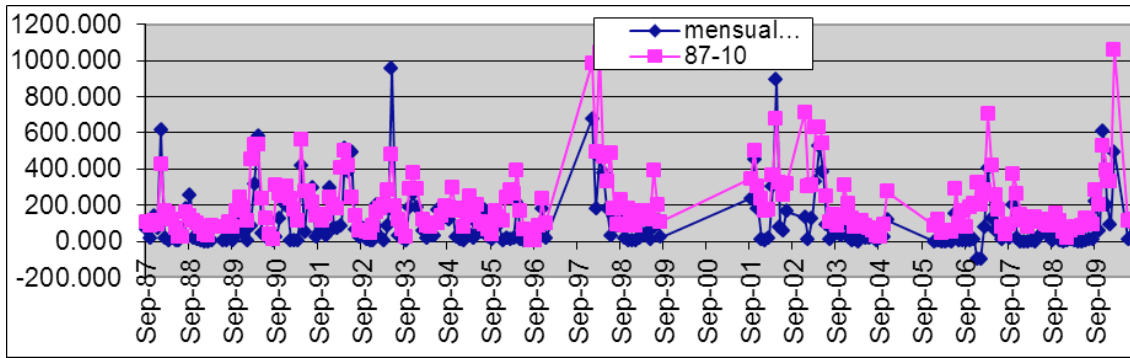


Figura 10 Caudales mensuales observado vs caudales modelados. Cuenca Arapey, Salto, 1987-2010.

#### 4.4.1.2. Calibración y validación del modelo

Para realizar la calibración se hizo una corrida mensual del modelo con los parámetros ya mencionados y se realizó para el período de tiempo de 1980 a 2004, dejando el restante periodo de tiempo del cual se poseen datos para una posterior VALIDACION del Modelo.

Los resultados de este ajuste hecho por la auto calibración para el periodo comprendido entre los años 1987 y 1997 con los parámetros descritos anteriormente son presentados en la figura 11.

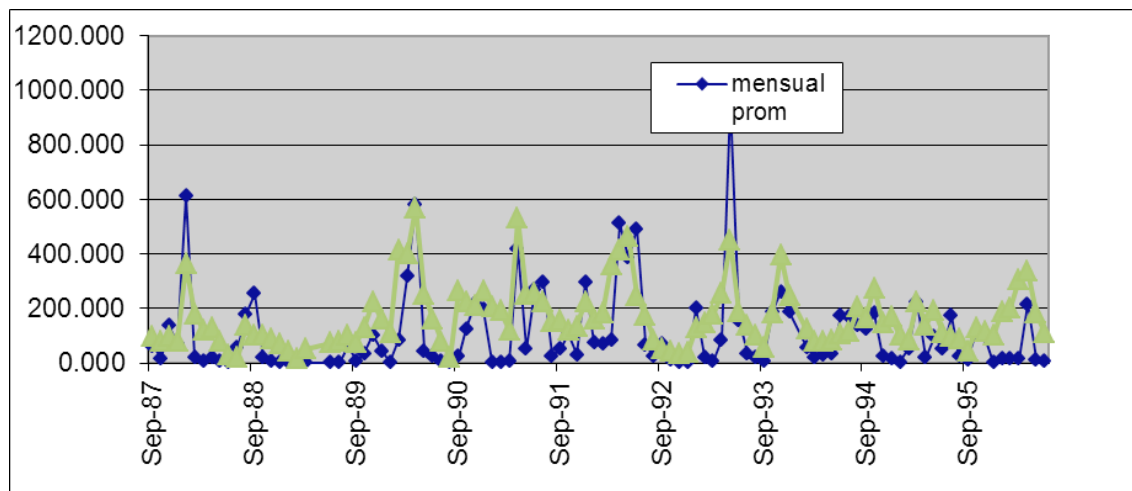


Figura 11. Resultados de la auto calibración (SWAT) con los caudales mensuales durante el período 1987-1997. Cuenca Arapey, Salto.

Para la autocalibración, los datos de aforos tienen años faltantes, que pueden ser representativos del caudal de la cuenca. Por lo cual el ajuste puede no ser el mejor. Se Utilizaron 10 años (1987 a 1997) pues estos tienen menor falta de datos que los usados para validación.

Para realizar la validación se hizo una corrida mensual del modelo autocalibrado y se realizó para el período de tiempo de 1997 a 2010, dejando fuera de la estadística los años faltantes, dando el siguiente resultado al comparar con los datos observados.

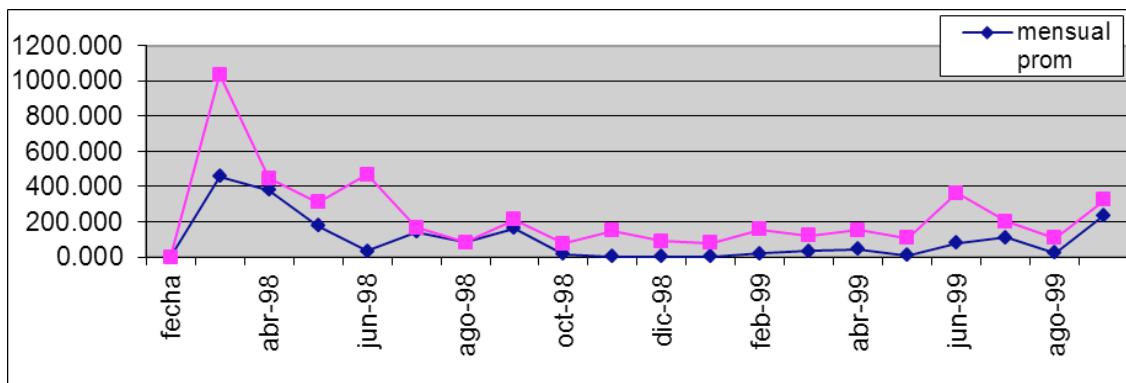


Figura 12. Resultados de la validación del modelo autocalibración (SWAT) con los caudales mensuales durante el período 1997-2010. Cuenca Arapey, Salto, 1987-2010.

Se considera un valor de ajuste del modelo a la realidad de calidad media ya que permite realizar predicciones poco confiables al correr el modelo para diferentes escenarios climáticos.

La relación entre los caudales observados mensuales y los caudales obtenidos en la modelación fue de 0,55. Los datos de caudales calibrados tuvieron un coeficiente de correlación de 0,51, ya para la validación de los datos de caudales fue de 0,66. Se considera un valor de ajuste del modelo a la realidad de calidad media ya que nos permite realizar predicciones poco confiables al correr el modelo para diferentes escenarios climáticos.

#### 4.4.2. Cuenca del Río San Juan, Colonia, URUGUAY

La cuenca del Río San Juan se localiza en el departamento de Colonia, al Sur del Uruguay, entre las coordenadas 57° 54' W, 57° 25'W 33°53'S y 34°18' S, con un área aproximada de 726 km<sup>2</sup>. La elevación media es de 65 msnm.

Los usos de suelo principales corresponden a cultivos de secano y pasturas cultivadas.

Los suelos corresponden a Brunsoles Eutrícos Típicos y Brunsoles subeutrícos.

##### 4.4.2.1. Información utilizada en el modelamiento

**CLIMA:** Fue utilizada la estación meteorológica ubicada en la Estación Experimental La Estanzuela. Se procesaron la serie de datos para obtener los estadísticos que el modelo usa para caracterizar el clima de la cuenca (userwgn). La serie de datos abarca desde el 1/1/1970 hasta el 26/8/2010.

Los resultados de los caudales observados mensuales en comparación con los obtenidos en la modelación son presentados en las siguientes figuras.

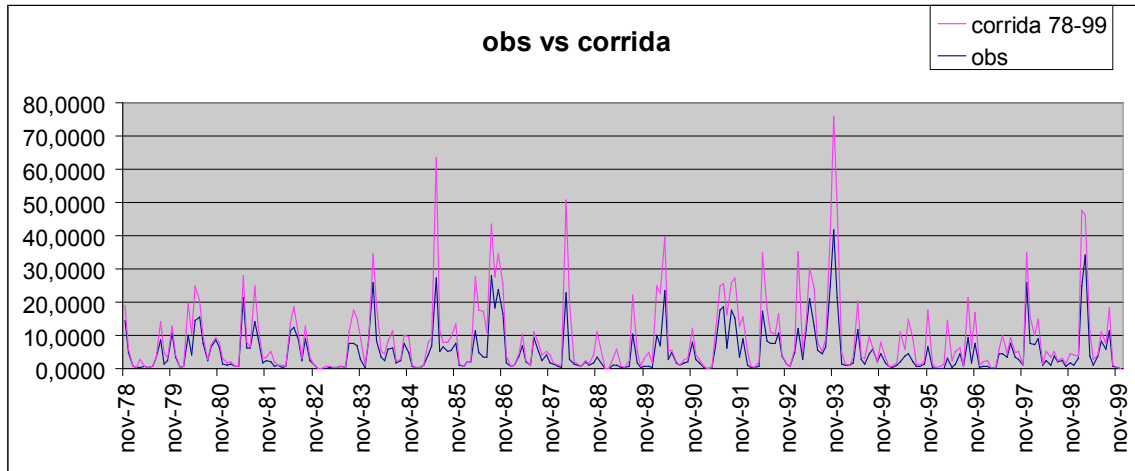


Figura 13. Caudales mensuales observado vs caudales modelados. Cuenca Río san Juan, Colonia, 1978-1999.

#### 4.4.2.2. Calibración y modelamiento

Para realizar la calibración se hizo una corrida mensual del modelo con los parámetros ya mencionados y se realizó para el período de tiempo de 1978 a 1999, dejando el restante periodo de tiempo del cual se poseen datos para una posterior validación del Modelo.

Se utilizó la herramienta de Autocalibración que brinda el software SWAT, pues ingresándole los datos observados e indicándole una cierta cantidad de iteraciones, y los parámetros hidrológicos a ajustar, el mismo realiza un ajuste. Previo a esta autocalibración se realiza un análisis de sensibilidad donde se determinan los parámetros del modelo más influyentes en el resultado de los caudales, pues se le ingresan los datos observados para que realice dicho análisis.

Los resultados de este ajuste hecho por la Autocalibración para el periodo comprendido entre los años 1978 y 1999 con los parámetros descritos anteriormente son presentados en las figuras 14 y 15.

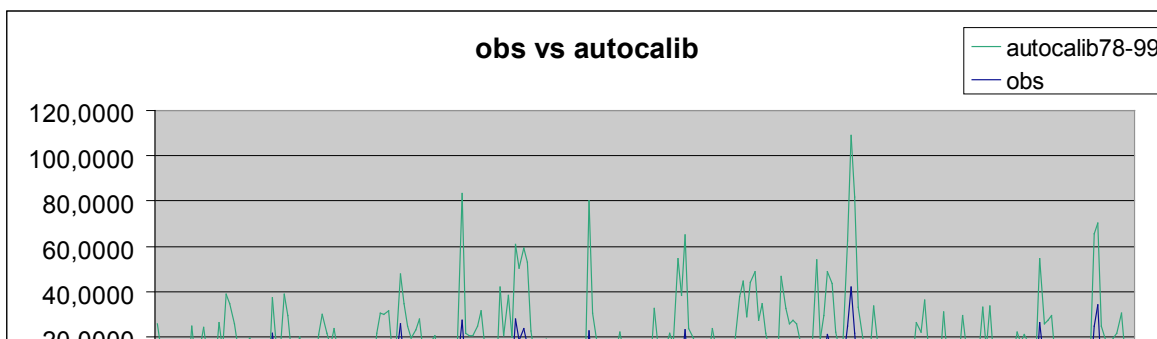


Figura 14. Caudales mensuales observado vs caudales modelados por el método de la autocalibración del SWAT. Cuenca Río San Juan, Colonia, 1978-1999.

Para realizar la validación se hizo una corrida mensual del modelo con los y se realizó para el período de tiempo de 2000 a 2010, dando el siguiente resultado al comparar con los datos observados:

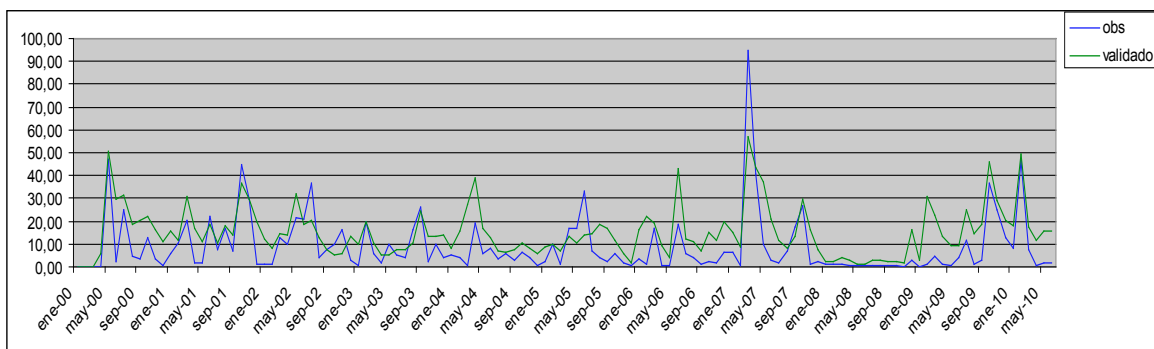


Figura 15. Resultados de la validación del modelo autocalibración (SWAT) con los caudales mensuales durante el período 1997-2010. Cuenca Río San Juan, Colonia.

El coeficiente de regresión ( $R^2$ ) se mantiene en el entorno de los 0.56 tanto para la corrida simple, como para la autocalibración y validación. Se realizaron diversos ajustes con varios análisis de sensibilidad, pero el modelo no mejora, por lo cual se adoptó este valor como el mejor para la cuenca. Se considera un valor de ajuste del modelo a la realidad de buena calidad por tratarse de una cuenca pequeña, con poca variabilidad de suelos y clima.

## 5. PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y ESCENARIOS CLIMATICOS

Si bien con los resultados relativos a la productividad del agua no se pueden hacer conclusiones definitivas, es posible sacar algunas sugerencias o lecciones aprendidas de la aplicación de los escenarios climáticos previstos.

En caso del escenario climático seco, la prioridad deberá darse a la productividad del agua sobre la productividad de la tierra. Ante esa situación, se deberá preferir las estrategias con mayor productividad del agua obtenida en los ensayos. Suponiendo que los escenarios secos se corresponden a años de fuerte demanda atmosférica, las estrategias de riego preferidas en caso de ser posibles, deberían aplicarse la reposición entre el 50 al 75% de la ETC.

Con escenarios neutros y húmedos en las cuencas del A° Tala y Río San Juan, se puede dar prioridad a maximizar la productividad de la tierra, dado que tanto las pasturas perennes como los olivos en general se mantienen con los recursos hídricos suficientes que puede suplir el suelo durante la zafra de mayor crecimiento. Estas situaciones son, sin embargo, todavía muy hipotéticas, ya que en dichas cuencas se cuenta todavía con mucha superficie disponible para aumentar el área irrigada. En el Río San Juan, se entiende que aún en estas condiciones, debieran preferirse estrategias de Riego Deficitario Controlad ya que todavía no sabemos cómo podría afectar la suplementación del agua en los árboles de un año para el otro.

## 6. PROGRAMA DE Difusión DEL PROYECTO EN URUGUAY

### 6.1. Presentación en Congresos, Seminarios, Talleres, Charlas Técnicas, Cursos y Días de Campo.

- Participación en Curso sobre Modelamiento hidrológico en Argentina, en el contexto del proyecto FONTAGRO; organizado por EEA Castelar, INTA, Argentina. Participación del IRI, además de grupo de investigadores involucrados en el proyecto.(2010).
- Participación en Reunión de Investigadores del Proyecto (Santiago de Chile, 24 y 25/5/211).
- Participación en Reunión/Taller de homogenización de metodologías de escenarios climáticos (Montevideo, 29 y 30/9/2011).
- Participación en Taller modelamiento de cuencas hidrográficas y escenarios climáticos (Chillán, 25-29/7/2011).
- Coordinación y participación de Conferencia y videoconferencia en INIA Las Brujas, de la Dra. Lisa Goddard (IRI), en consulta por preparación de base de datos climáticos y posibles escenarios climáticos para correr modelos hidrológicos. (2010).
- Pasantía de 4 meses de Bach. Gabrielle Boisrame (UCDavis) para trabajos de preparación de datos climáticos de Uruguay.(2010).
- Pasantía 6 meses del Técnico Helenesio Cabral (Brasil). Monografía de fin de curso elaborado en base a los experimentos de riego en olivos, 2011.
- Participación de investigador en Taller de capacitación variabilidad climática (Montevideo, Octubre, 2011).
- Reunión en INTA Castelar (2011) con el equipo de investigadores del proyecto para ajuste de las variables climáticas y de suelo para corrida de modelo hidrológico. Realización de 3 jornadas técnicas por año de difusión del proyecto en diferentes zonas del país (Colonia y Salto) y una presentación anual (día de campo anual) sobre los ensayos de riego en pasturas a la Junta Directiva de INIA, (2009-12).

### 6.2. Planificación y desarrollo de Seminario Internacional de Cierre del Proyecto FONTAGRO, Noviembre 2012, Salto, Uruguay.

- El INIA de Uruguay tuvo a su cargo la organización del Seminario Internacional de cierre del proyecto, el cual se realizó en la ciudad de Salto en Noviembre de 2012, con la participación de investigadores de los cuatro países ejecutores del proyecto y de los asesores internacionales. En la oportunidad cada país entregó información y resultados del proyecto.

### 6.3. Manual de estrategias de manejo del agua de riego en los cultivos seleccionados.

- En el caso de Uruguay, participará en la elaboración de las estrategias de riego en cultivos como:



olivos, papa y pasturas; tomando como base la información generada en el proyecto.

## 6.4. Publicaciones científicas.

- Respuesta al riego suplementario en pasturas artificiales en el norte de Uruguay. Autores: M. Corcoll, M. Malvasio, M. García Petillo, C. García, S. Saldanha. Nov. 2012. 2do Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas. Salto, Uruguay. Noviembre de 2012.
- Tecnología de riego por superficie suplementario a pasturas artificiales en el norte de Uruguay. Autores: A. Bourdin, M. Burgos, M. Franco-Fragua, M. García Petillo, C. García, S. Saldanha. Nov. 2012. 2do Seminario Internacional de Riego en Cultivos y Pasturas. Salto, Uruguay. Noviembre de 2012.
- Avances del proyecto FONTAGRO: Evaluación de los cambios en la productividad del agua frente a diferentes escenarios climáticos en distintas regiones del Cono Sur. Autores: A. Osorio Ulloa, D. Prieto, R. Chipana y C. García. Julio 2010. . Reunión Fontagro. Colombia, 2010.
- Physiological parameters variations in olive tree (*Olea europaea* L., cultivar Arbequina) under different irrigation regimes. Autores: C. García, H. Cabral, M. Moura. ISHS, In Prensa, Set. 2012.
- Effect of Different Irrigation Regimes on Olive Tree (*Olea europea* L., cultivar Arbequina) in Uruguay. Autores: C. García, H. Cabral, M. Moura. ISHS, In Prensa, Set. 2012.

## 6.5. Publicaciones Divulgativas

Material de distribución en las jornadas de divulgación para técnicos y productores, editados por INIA:

26 de agosto de 2010. Jornada con productores de papa. Ciudad de Libertad, San José.

10 de octubre de 2012. Presentación de resultados experimentos de riego en papa. San José.

5 de Julio de 2012. Análisis de la calidad ambiental de la Cuenca del Arroyo Tala. Jornada en Colonia Rubio, Cuenca del A° Tala, Salto.

Octubre de 2011 y octubre de 2012. Jornadas de presentación de Olivos en INIA Salto Grande. Manejo del riego deficitario controlado en olivos basado en la evapotranspiración del cultivo

## 7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones generales del proyecto fueron diversas principalmente debido a que se estaba incursionando en un tema innovador para la investigación en el Uruguay. Se suma a esto que se trabajó en el tema del riego, lo cual también fue un tema que fue priorizado por el INIA pero que el país no contaba con muchos antecedentes en esta materia.

Por lo antedicho las conclusiones fueron de orden técnico-científico pero también de capacitación y formación no solamente de investigadores sino también de técnicos de campo y productores.

De forma de enumerar algunas de las conclusiones:

- a. Formación de equipos multidisciplinares de los Institutos de Investigación de la Región, tanto en el tema agroclimático, como de manejo de software (principalmente SWAT) y manejo de base de datos.
- b. Olivos: Función de respuesta al agua. Incremento de la producción de aceitunas y de aceite a medida que se incrementó el agregado de agua vía riego hasta el tratamiento de 100% de la evapotranspiración.
- c. Papa: Los ensayos demostraron un incremento de la producción y la calidad de tubérculo hasta el 50% de la evapotranspiración, no encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos con mayor agregado de agua.
- d. Pasturas: No existió diferencia significativa entre los diferentes anchos de melga en cuanto a la cantidad de agua aplicada, lo cual anchos mayores (12 m) de melga significan menor número de melgas con un costo de energía de preparación de las melgas menor y menor costo del riego por la utilización de menos compuertas por área de riego.
- e. La producción de forraje aumentó significativamente en las parcelas regadas en relación al testigo que recibió solamente agua de lluvia, durante el período de evaluación (octubre 2010 a marzo 2013). Dicho aumento de producción de forraje provocado por el riego fue de 53 % más de materia seca con respecto al tratamiento de secano.
- f. Se consiguió conocer y cuantificar la lámina de agua aplicada en base a las necesidades hídricas de los cultivos estudiados.
- g. Se obtuvieron la caracterización de las cuencas hidrográficas propuestas en los países.
- h. Se establecieron funciones de producción en relación al consumo de agua vía riego.
- i. Se realizaron jornadas de capacitación a productores y difusión entre los usuarios de las cuencas.
- j. Se modelaron las cuencas hidrográficas según los diferentes escenarios climáticos propuestos (año normal, año niño y año niña).

La recomendación que surge más importante de todo este proyecto es poder buscar formas administrativas y de financiación que mantengan trabajando de manera complementaria como se hizo en este proyecto, estos equipos formados y consolidados en su metodología de trabajo y en su compromiso de sacar los productos tecnológicos comprometidos.





**FONTAGRO**



---

“Evaluación de los cambios en la productividad del agua,  
frente a diferentes escenarios climáticos, en distintas  
regiones del Cono Sur”  
Código: FTG-8042/08