

# AVANCES EN PRODUCTIVIDAD SOSTENIBLE MEDIANTE RIEGO PULSANTE: EL SISTEMA DE RIEGO ECOLOGICO AUTONOMO

Rosenfeld, B.<sup>1</sup>; H.Días<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Convenio FAUBA-Ing.Rosenfeld; Pulsing Argentina; Buenos Aires, Argentina. Email: [pulsing@argentina.com](mailto:pulsing@argentina.com)

<sup>2</sup> Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires, Cátedra de Riego y Drenaje; Dir. Resp. Convenio FAUBA-Ing. Rosenfeld. Email: [diashugo@agro.uba.ar](mailto:diashugo@agro.uba.ar)

## RESUMEN

Desde su patentamiento en 1997, el Sistema de Riego Ecológico Autónomo empleando acción gravitatoria controlada como fuerza impulsora fue aplicado experimental y productivamente en diversas regiones y cultivos intensivos de Argentina. Como primera implementación confiable del riego pulsante a caudal impuesto mostró ventajas inéditas en resultados agronómicos, como volumen y precocidad de cosechas así como en sostenibilidad, generando ahorros del 50% en el uso de agua y de 90% en consumo energético respecto al método convencional por goteo. El requerimiento energético mínimo del SREA posibilita la utilización exclusiva de energías renovables para propulsar la irrigación. Un experimento reciente con cebolla en suelos franco arenosos al sur de la Provincia de Buenos Aires arrojó los niveles de ahorro mencionados, junto con productividad y uniformidad de calibres superior a la usual empleando riego por surco. Una teoría del movimiento del agua en el suelo ante una sucesión de descargas localizadas con alto caudal y breve duración explica satisfactoriamente tales resultados y permite concluir que el SREA logra delimitar efectivamente no sólo el área del suelo mojado sino también su profundidad, configurando una capa húmeda aireada preferentemente horizontal y profundidad controlable. Ultimamente, el empleo de modulación directa del caudal pulsante mediante control electrónico de potencia en lazo cerrado ha permitido avanzar a una nueva etapa en el desarrollo de esta tecnología preservando la característica de confiabilidad, conservacionista de energía y ambientalmente protectora inherente a la primera versión, pero acrecentando el área regable y su sectorización en un orden de magnitud.

## INTRODUCCIÓN

Al momento de introducirse la tecnología SREA, el mayor avance en riego aplicado a cultivos intensivos había estado dado por el desarrollo de los así llamados riegos localizados de alta frecuencia<sup>1</sup> entre los cuales el riego por goteo alcanzó la mayor difusión relativa.

Si bien estos nuevos métodos hicieron posible cultivar en condiciones de extrema carencia de agua y/o relieves pronunciados del terreno, no necesariamente significaron un avance en sostenibilidad de la agricultura ya que a su elevado costo de infraestructura agregaron incrementos importantes en gastos operativos en concepto de consumo energético y mantenimiento, entre otros<sup>2</sup>. Estos mayores costos generalmente no devinieron compensados por los resultados en términos de productividad sustentable,

<sup>1</sup> PIZARRO CABELLO F., 1990, Riegos Localizados de Alta Frecuencia; p.p. 142-144

<sup>2</sup> HANSON B. et al: "Drip Irrigation of Row Crops: What is the State of the Art ?" ; [http://www.oznet.ksu.edu/sdi/Abstracts/Drip\\_Irrigation\\_of\\_Row\\_Crops.htm](http://www.oznet.ksu.edu/sdi/Abstracts/Drip_Irrigation_of_Row_Crops.htm)

aunque se lograron superávits relativos en el plano estrictamente económico al aplicarse a cultivos de alto valor.

El ahorro en el uso del recurso agua que estos métodos aportaron es esencialmente común e independiente de las respectivas particularidades, consistiendo en la limitación del área del suelo mojado en relación a la forma tradicional de irrigación por inundación a manto o por surcos. La mejora aportada por los RLAf es, en suma, una mayor eficiencia en cuanto a los aspectos de transporte y aplicación del agua de riego.

Sin embargo, los métodos de aporte continuo como el riego por Goteo no lograron resolver el componente (clave a nuestro juicio) de ineficiencia por aprovechamiento del agua regada que afecta a la irrigación tradicional, dada la fuerte tendencia del primero a producir en el suelo configuraciones húmedas con desarrollo predominantemente vertical, asociadas a pérdidas por percolación.

Este problema se encuentra globalmente documentado en el FAO Water Report 8<sup>3</sup> y ha sido encarado por investigadores e industria desde diversos puntos de vista.

Al introducirse los modernos plásticos en la irrigación, la eficiencia de aprovechamiento quedó a resolver como el aspecto principalmente responsable de la ineficiencia neta del riego en cuanto al uso del recurso agua, pero también muy influyente en aspectos no menos importantes como el cuidado del suelo frente a la degradación salina y el consumo de energía.

En el intento de lograr una dinámica del agua en el suelo con mayor desarrollo horizontal o, en otros términos, con una mayor participación de la difusión por capilaridad, se ha trabajado con modelos matemáticos<sup>4</sup> y experimentado sobre la influencia de factores como el tipo de suelo, la magnitud instantánea del caudal localmente aplicado o el empleo de manejo automatizado mediante sensores de humedad, entre otros. Isbérie et al<sup>5</sup> (CEMAGREF, Francia) por ejemplo, refiere una reducción del 50% (358 a 182 mm) en el riego para la misma productividad en melón merced exclusivamente a mejoras en el manejo controlado de los tiempos.

Los sectores industriales del riego por goteo, por su parte, han intentado conservar la vigencia de su tecnología siguiendo diferentes estrategias, a saber: el riego por Goteo sub-superficial (SDI) y sus parámetros de instalación como profundidad, espaciamiento entre emisores, separación entre laterales; el goteo de ultra bajo caudal (ULDI) que hace tender al mínimo tanto el espaciamiento de los emisores como el caudal emitido, mientras extiende los lapsos de aplicación hasta abarcar en el límite las 24 horas, etc.

Finalmente, otra corriente científica y tecnológica en la cual nos inscribimos, ha realizado búsquedas y desarrollado en torno al principio del riego pulsante.

En los años 70, Bresler<sup>6</sup> describió la correlación entre el desarrollo horizontal del bulbo húmedo y el caudal instantáneo aplicado en un punto. Por su parte, Zur<sup>7, 8</sup> estableció como hipótesis y verificó una teoría general aplicable a la dinámica del riego pulsante al

---

<sup>3</sup> AUGIER P. et al: "The need to improve the on-farm performance of irrigation systems to apply upgraded irrigation scheduling"; FAO Water Report 8; <http://www.fao.org/docrep/W4367E/w4367e0e.htm>

<sup>4</sup> ZAIDEL, J. et al: "Estimation of finite difference interblock conductivities for simulation of infiltration into initially dry soils"; Water Res. research, sep. 1992, p. 2285

<sup>5</sup> ISBÉRIE, C. et al, 1995: "Gestion des apports d'eau et tensiometre". Forum AGROFORA, ATH 1994. *Nouv. Sci. Technol.* 13: 203-209.

<sup>6</sup> BRESLER, 1977, en Pizarro Cabello, Op. cit., p.p. 150

<sup>7</sup> ZUR B., 1976: "The Pulsed Irrigation Principle for Controlled Soil Wetting"; *Soil Sci.* 122; 282-291.

<sup>8</sup> ZUR B. y SAVALDI D., 1977: "Infiltration under a Pulsed Water Application: 1. The Nature of the Flow System"; *Soil Sci.* 124; 127-134.

demostrar la analogía del fenómeno de difusión del agua en el suelo con el de la propagación de una onda de energía en un campo disipativo.

Otras investigaciones<sup>9,10</sup> contribuyeron a presentar como una vía práctica hacia la conformación húmeda deseable la implementación del principio referido.

No obstante estos avances científicos, la concreción del dispositivo material capaz de realizar dicha implementación presenta desafíos complejos a la técnica. A un ritmo de, digamos, un pulso hidráulico cada media hora, se requieren más de 17.500 accionamientos anuales con los consiguientes riesgos de falla por desgaste o fatiga de materiales, además del alto consumo eléctrico involucrado.

Otro desafío práctico inherente al riego pulsante se relaciona con el grado de uniformidad del reparto del volumen de agua derivado en el área servida, debido a la extensión temporal que insumen los transitorios respecto de los lapsos en estado de régimen durante el proceso de distribución.

Spencer<sup>11</sup> fue de los primeros en proponer un dispositivo de riego pulsante consistente en un conjunto distribuído de válvulas pulsadoras mecánico - hidráulicas responsivas a la presión, montadas a intervalos regulares sobre conductos de acero.

Otro antecedente de mecanismo distribuído de irrigación pulsante es el comercialmente denominado "Pulsator" de origen israelí.

Estos y otros mecanismos análogos no lograron aceptación significativa dado su complejidad y alto costo, unido a la propensión a fallar mecánicamente ante las elevadas exigencias operativas del riego pulsante.

Tampoco el problema de la uniformidad recibía solución, al menos en relación con las grandes longitudes de línea cultivada (unos 100 a 300 metros) alcanzables por cada lateral emisor empleando la técnica de goteo altamente presurizado.

Aún menos favorables resultaron estas propuestas desde el punto de vista sustentable.

Es que sin un cambio profundo en las estrategias de impulso y distribución, el intento de resolver los problemas mencionados sólo llevaba a métodos menos confiables y aún más costosos, complejos, pesados y consumidores de energía que aquellos a los que se intentaba mejorar aplicando un buen principio teórico sin un análisis crítico profundo.

En este marco de necesidades irresueltas se desarrolla la versión gravitacional de la tecnología SREA así como los primeros ensayos de laboratorio hidráulicos y agronómicos y diversas pruebas de campo a escala productiva.

Una referencia sucinta a las más importantes de dichas experiencias incluye:

Ensayos hidráulicos<sup>12</sup>: enfocados en la performance de uniformidad en riego pulsante, procurando identificar los factores de mayor influencia en la distribución.

Si se denomina Relación Volumétrica de Emisión del tramo  $i$  al cociente:

---

<sup>9</sup> HUMPHREYS A., 1989: "Surge irrigation: 1. An overview"; *ICID Bulletin* 38(2): 35-48; y "Surge irrigation: 2"; Management. *ICID Bulletin* 38(2): 49-61.

<sup>10</sup> FAO, Reporte cit.

<sup>11</sup> SPENCER; 1974; USPAT 3.797.741; USA

<sup>12</sup> ROSENFELD B. y DIAS H.: "Sistema de Riego Ecológico Autónomo: desarrollo de una alternativa en irrigación localizada"; Avances en el manejo del Suelo y Agua en la Ingeniería Rural Latinoamericana, CLIR '98, ISBN 950-34-0124-0; p.p.406-414, UNLP, La Plata, Argentina.

$$Re_i = V_{ti} / V_{ei}$$

donde

$V_{ti}$  es el volumen transportado

$V_{ei}$  el emitido en el tramo  $i$

Se entiende que la forma general del Gráfico 1 de distribución de caudales emitidos se debe a que los segmentos próximos a la entrada conducen mucho más líquido que el que emiten, haciendo que las pérdidas por frotamiento y los mayores gradientes de presión y de caudal emitido se concentren en el primer tercio del conducto. En efecto; subdividiendo el mismo en, por ejemplo, diez segmentos de 5 m y calculando las relaciones de emisión del segundo y el noveno, resultan ser **Re2=17%** y **Re9=49,7%**.

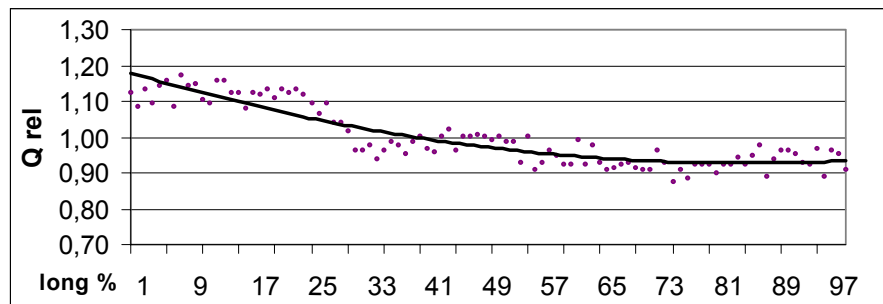
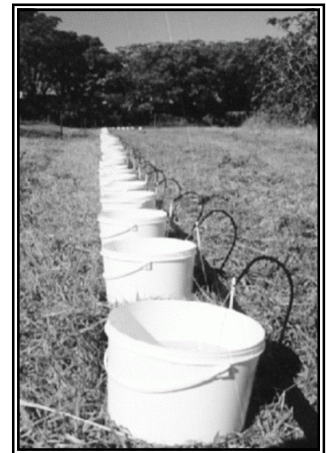


Gráfico 1: aforo normalizado de los caudales emitidos a lo largo de un conducto regularmente perforado



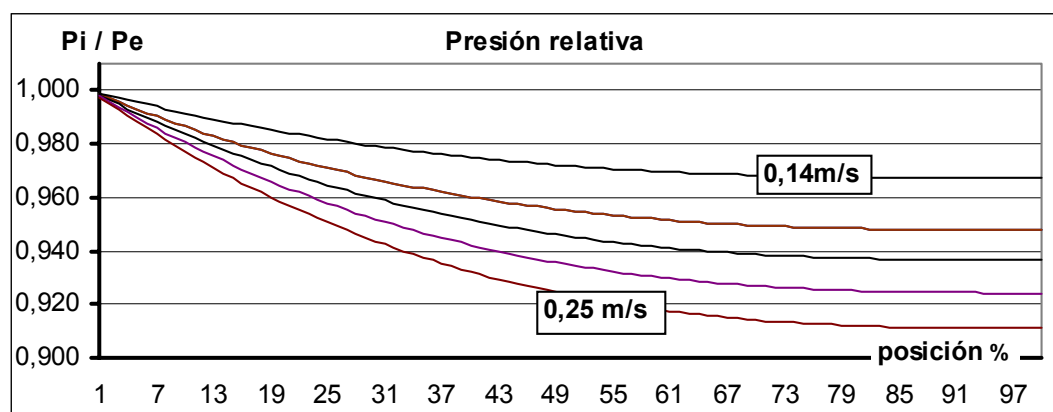
Si las pérdidas de carga en toda la tubería emisora obedecen esencialmente al rozamiento hidráulico en los segmentos de entrada, es válido inferir que al reducir dicho rozamiento (p.e. restringiendo la velocidad del agua ingresante mediante la válvula limitadora de la Figura 2) podría mejorarse sensiblemente la uniformidad de distribución. A fin de estudiar dicha suposición, se confeccionó un modelo de cálculo de la línea piezométrica en base a la expresión de Reynolds<sup>13</sup> de la pérdida unitaria de carga aplicable a conductos de bajo rozamiento resultando el Gráfico 2, donde  $P_i$  es la presión frente al orificio emisor  $i$ , relativa a la de entrada  $P_e$ , a lo largo de un conducto distribuidor con orificios de salida practicados a intervalos regulares. Como resultado de los ensayos hidráulicos que probaron la hipótesis anterior se formula el principio de distribución a "Caudal Impuesto", que a partir de allí pasaría a integrar la base conceptual de la tecnología SREA.

El mismo consiste en que: Si se limita por medios externos hasta un valor suficientemente bajo la velocidad de la vena líquida ingresante a un conducto distribuidor nivelado con salidas regularmente espaciadas, es posible obtener un grado de uniformidad tan elevado como se quiera en los caudales emitidos a lo largo del mismo.

En la práctica, para conductos de PVC o PEBD el valor tope de velocidad empleado para diseño o ajuste de la distribución fue de 0,10 a 0,20 metros/segundo.

Los ensayos resumidos a continuación permitieron comprobar y enriquecer los principios básicos de la presente tecnología así como acumular experiencia sobre sus detalles de implementación:

<sup>13</sup>FACORRO RUIZ; Curso de Hidráulica; p.p. 137-139



**Gráfico 2:** presión hidráulica frente a cada emisor a lo largo de un conducto distribuidor, relativa a la de ingreso  $P_e$ , para diferentes velocidades de entrada (s/Reynolds)

Caso Frutilla (strawberry) en la Huerta Agronomía, predio FAUBA, ciudad de Buenos Aires<sup>14</sup>: se verificó el principio operativo, con uniformidad de aplicación y distribución húmeda satisfactorias. Uso de energía mínimo. En condición sustentable, se cosechó una media de 1,5 Kg de frutilla (strawberry) por planta, respecto a un valor típico zonal de 0,350 Kg.

Caso Hortaliza de hoja a campo (Espinaca) en Junin, Pcia. de Buenos Aires<sup>15,16,17</sup>: se cosecharon 40 Tn/Ha de espinaca frente a una media nacional de 25; y de 30 Tn/Ha en el mismo establecimiento con idéntico manejo excepto el método de riego utilizado (aspersión). Cubrimiento de la demanda hídrica en +157%. Configuración húmeda en el suelo: pese a una deficiente uniformidad de aplicación debida a la marcada pendiente negativa del terreno, se produce una capa húmeda continua con profundidades entre 14 y 22 cm tanto en las líneas regadas como entre las mismas, estable en el tiempo dentro de un CV entre 8% y 13% a lo largo de 90 días.

Caso Eucaliptus en el IIR, INTA Castelar: experimento de aplicación forestal del SREA La tasa de crecimiento diario registrada fue de:

$$\text{TasaMedia}=6,5 \text{ mm/día; TasaMáxima}=11,8 \text{ mm/día.}$$

Una medición relevada a los 600 días del trasplante comprobó la continuidad de la tasa media, con alturas entre 4,5 y 6 m y diámetros de 100 mm en la base del tronco.

<sup>14</sup> ROSENFELD B., 1998: "El Sistema de Riego Ecológico Autónomo y su aplicación experimental en la Huerta Orgánica Agronomía"; XXI Congreso Argentino de Horticultura, San Pedro, Pcia. de Buenos Aires, Argentina

<sup>15</sup> GUTIERREZ, M. A.; "Análisis del funcionamiento del SREA a través de variables agronómicas"; 1999; Tesina de graduación FAUBA; Junín, Argentina.

<sup>16</sup> ZARA, C.; "Análisis del comportamiento hidráulico del SREA"; 1999; Tesina de graduación FAUBA; Junín, Argentina.

<sup>17</sup> ROSENFELD, B., 2000: "Sistema de Riego Ecológico Autónomo: Microirrigación de Ultra Bajo Volumen Adaptativa al Suelo"; 11ª Conferencia de la Organización Internacional de la Conservación del Suelo (ISCO); Buenos Aires, noviembre de 2000.

Caso Tomate en Guaymallén, Pcia. de Mendoza<sup>18</sup>: ensayo experimental productivo en región semi árida.

Resultado productivo: cosecha de 178 Ton/Ha (+40%) respecto de un máximo histórico de 127 Ton/Ha en el mismo establecimiento con idéntico manejo excepto modo de riego (tradicional por surcos). Abundante masa foliar que protegió el desarrollo frutal de la radiación solar y alta temperatura ambiente (media: 32 ° C). Tomate calibre grande a muy grande, bien terminado a cosecha, carnoso, dotado de color y sabor intenso. Perfil húmedo: capa horizontal continua en camellones, extendida a una profundidad de 12 cm en pasillos interfilares. Composición del aporte hídrico total: precipitaciones: 65 mm (16,4%); riego: 331 mm (83,6%). Consumo de agua de riego/Ha: 13% respecto del uso tradicional en la finca. Alimentación de agua por surgencia natural y bombeo desde la misma perforación según la presión (entre 2 y 8 mca) ofertada por el acuífero.

Conclusiones: se verificó la hipótesis que denominaremos de "stress cero", que no por obvia resulta menos explicativa de la experiencia con el SREA. Se refiere al efecto de minimizar el derroche de energía fisiológica efectuado por las plantas en el intento de adaptarse a situaciones sucesivas y alternadas de sequía e inundación:

**Si en un sustrato con los nutrientes necesarios se logra mantener a largo plazo la estabilidad temporal y espacial de una condición confortable en términos de provisión y distribución hídrica sin asfixia radicular para cada etapa fenológica durante el período de desarrollo, se habilita al cultivo a desplegar de modo natural su máximo potencial de crecimiento, vigor y autodefensa.**

Caso Instalación prototipo para arándano (blueberry) en Mercedes, Pcia. de Buenos Aires: el resultado agronómico comprueba nuevamente la hipótesis de "stress cero", extendiendo su efecto a precocidad. No obstante que lo conocido para esta especie es un período de espera de dos a tres años previo a alcanzar capacidad de producción comercial, el presente caso brindó su primera cosecha de 1200 Kg/Ha al 1er año desde el trasplante con calibres aptos para exportación. Al segundo año, la misma fue de 1750 Kg/Ha y ya las plantas presentaban un porte comparable a otras del doble de edad regadas por goteo. Además, las plantas presentaron un 50% más de tallos nuevos ("macoyos") desde las raíces, respecto de la línea testigo regada por goteo. Debe agregarse que dichos resultados se producían en un área de 2,75 Has con un consumo energético para bombeo de sólo 1 Hp utilizado la cuarta parte del tiempo.

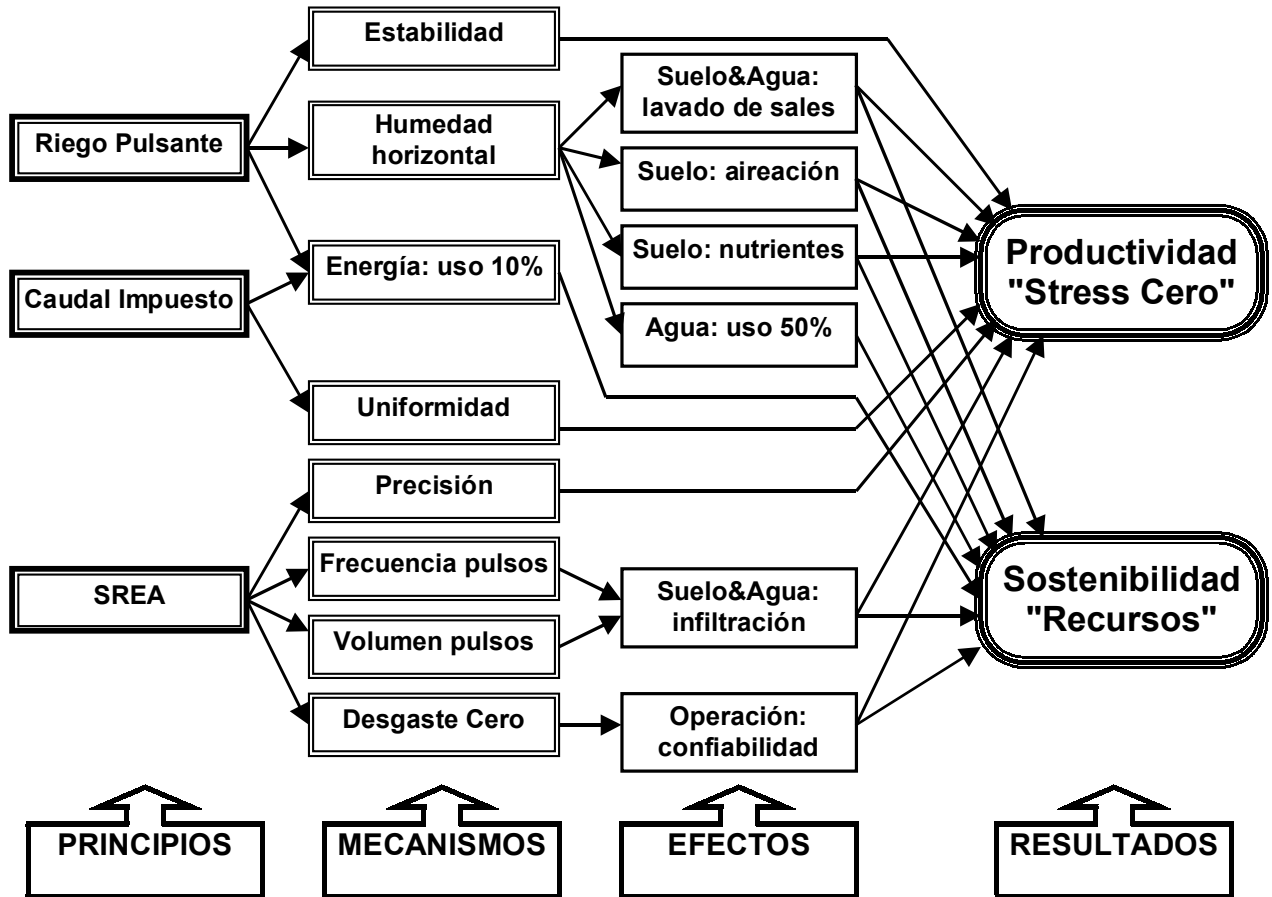
Desde una perspectiva actual, dichas pruebas reunieron suficientes antecedentes como para permitir:

- A) una comprensión más integral de la interacción de conceptos intervinientes en el SREA, según esquematiza el diagrama de la Figura 1;
- B) la formulación de un grupo homogéneo de hipótesis respecto de los nuevos principios físicos y tecnológicos puestos en juego, a saber: **Ahorro de Recursos, Stress Cero, Riego Pulsante y Caudal Impuesto**;
- C) el diseño y concreción de un nuevo experimento específicamente destinado a verificar dichas hipótesis; y
- D) la obtención de conclusiones que habilitan la generalización de aquellas experiencias y la prosecución del desarrollo en busca de mejores dispositivos capaces de implementar aún más eficazmente los principios validados.

---

<sup>18</sup> ROSENFELD B., 2000: "Sistema de Riego Ecológico Autónomo: Experimentos y Avances", Avances en Ingeniería Agrícola ISBN 950-29-0593-8, p.p.399-404, CADIR'2000, FAUBA, Buenos Aires, Argentina.

El presente trabajo se refiere en detalle a dicho experimento entendido como de verificación general y culminante de una primera etapa del desarrollo SREA, realizado con aplicación al cultivo de cebolla en el Campo Piloto San Adolfo que la Corporación de Fomento CORFO Río Colorado posee en el extremo sur de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.



**Figura 1:** diagrama esquemático de los principios, conceptos operativos e hipótesis interactuantes en el Sistema de Riego Ecológico Autónomo.

## OBJETIVOS

El objetivo principal del desarrollo de referencia es rescatar y revalorizar el principio de irrigación por pulsos considerado como el más deseable en cuanto a productividad sustentable mediante el empleo de un dispositivo pulsador central confiable a largo plazo al presentar un mínimo riesgo de falla por desgaste mecánico, fatiga de materiales y/o degradación de sellos elásticos.

Junto con ello, implementar una nueva estrategia de impulso y distribución del riego acorde al principio antedicho, capaz de acoplarse al dispositivo pulsador para brindar uniformidad de riego en una área cultivada con dimensiones de superficie comparativas a las regables por los métodos conocidos.

Un segundo objetivo es propender al máximo desarrollo potencial de que es capaz cada especie cultivada, exclusivamente por la vía natural de eliminar el estrés hídrico por defecto, tanto como la asfixia radicular por falta de oxígeno en condiciones de saturación

del suelo. Un corolario inmediato de esta meta es potenciar la eficacia productivo - económica de las prácticas de agricultura orgánica.

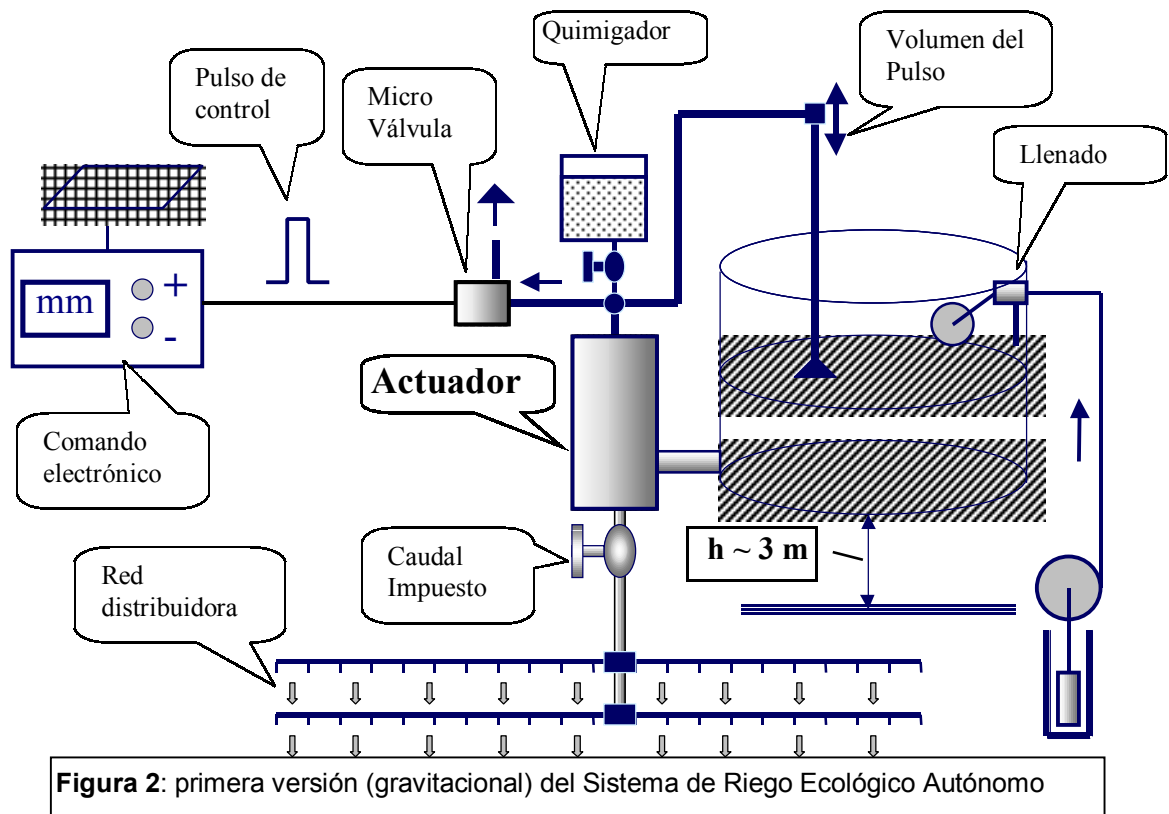
Un tercer objetivo es lograr dicha operación merced a un reducido gasto operativo en concepto de consumo energético y mantenimiento.

Un cuarto objetivo, por último, consiste en lograr la mejor preservación posible del recurso suelo frente a los riesgos de salinización y erosión.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para las pruebas de campo preliminares, como así también en el presente ensayo de campo en CORFO Río Colorado, se empleó una primera versión del dispositivo SREA caracterizada porque el volumen de cada pulso está determinado por una fracción fija del contenido de agua de un depósito elevado, siendo la energía gravitatoria la única impulsora de la distribución del riego en el área cultivada (Figura 2).

En el diseño y ajuste de estos ensayos se aplicaron las conclusiones de las pruebas hidráulicas preliminares, principalmente en cuanto a la aplicación del principio distributivo a Caudal Impuesto a fin de limitar la velocidad del ingreso fluido a cada conducto repartidor, a menos de 0,2 m/s.



### Descripción de Funcionamiento

El SREA secuencía en forma automática una sucesión ininterrumpida de ciclos, con períodos que duran desde una fracción de hora hasta varias horas. En una implementación típica, cada ciclo comprende una primera parte extensa durante la que el depósito se llena lentamente hasta alcanzar un nivel máximo. Una vez completado, este paso da lugar a un



estado de espera. El proceso de llenado “arma” un mecanismo de descarga disparada, acumulando energía en forma de aire confinado a presión positiva en una cámara especial dentro del Actuador. Cuando el módulo electrónico de Comando detecta que se ha alcanzado el momento calculado para pulsar, envía una señal eléctrica de muy baja energía, abriendo una microválvula neumática que permite el escape del aire confinado. Esto, a su vez, desencadena una descarga a elevado régimen, sólo limitado por la válvula reguladora de caudal y que continúa hasta vaciar el tanque, o hasta que el mecanismo neumático de corte la interrumpe en un nivel fraccional prefijado. Entonces el Actuador restablece el estado inicial, recomenzando el proceso con un nuevo ciclo.

El software residente en el Comando procesa una consigna programada en términos de lámina diaria de riego para, teniendo en cuenta los datos dimensionales y edáficos del cultivo, determinar los parámetros de dicha secuencia pulsante y ejecutarla. De este modo, lámina diaria de riego y capacidad de infiltración específicos son satisfechos por una determinada frecuencia de pulsos de cierto volumen, auto ajustables por separado en forma dinámica.

Con la excepción de la micro válvula, en la operación descrita no intervienen partes móviles, flexibles o de elastómero pasibles de desgaste, fatiga o envejecimiento.

No obstante, pueden ser controlados caudales significativos ya que la operación antedicha no depende del tamaño de la sección de pasaje. Es sólo aire lo que conmuta al agua, requiriendo muy baja energía de activación (algunas decenas de milivatios).

Finalmente y a efectos de ferti-irrigar, durante la descarga el Actuador impone succión al circuito neumático, permitiendo el agregado de agroquímicos a dosis idénticas fraccionadas con cada ciclo y por tanto en cantidad netamente proporcional al volumen de agua regada.

La red de distribución acorde con el dispositivo pulsante descrito es similar a la usual en goteo, salvo que emplea conductos repartidores con secciones de área mayor pero de menores espesores de pared. Para estos tubos, las secciones se dimensionan imponiendo la condición de velocidad de entrada (< 0,2 m/s). En los conductos ciegos, sin embargo, las secciones pueden ser relativamente menores.

En lo que respecta a laterales, se ha empleado exitosamente conductos emisores comerciales fabricados para goteo a baja presión que especifican el rango de mayor caudal por emisor (5 o más litros/hora/metro @ 0,5 bar), cinta textil exudante, manga perforada, etc. En todos los casos el criterio empleado en la especificación de un tipo particular de lateral ha sido la "relación volumétrica de llenado":

$$\boxed{\frac{(AreaTransversal \cdot LongitudTramo)[litros]}{(VolumenEmitido)[litros]} > 1}$$

En suma, el dispositivo descrito produce durante las 24 horas una sucesión de entregas breves equidistantes en el tiempo y localizadas bajo cada punto emisor, de modo que la suma acumulada de sus respectivos volúmenes se corresponde con la lámina de reposición deseada, aplicada a un área estimada como de máximo desarrollo radicular en torno a cada planta.

El ensayo Cebolla en CORFO, Hilario Ascasubi, Pcia. de Buenos Aires<sup>19</sup> se implementó como experiencia sistemática del SREA a campo, orientada específicamente a verificar las características de distribución de humedad y sustentabilidad del sistema, buscando explicitar sus límites en las condiciones climáticas, edáficas y productivas más exigentes. En efecto, la conjunción de un cultivo sumamente demandante de agua con un suelo poco retentivo de humedad en un clima caracterizado por alta heliofanía, escasas precipitaciones y presencia permanente de viento, implicaba colocar al SREA en una de las situaciones más demandantes que un regadío puede verse obligado a afrontar. El diseño del experimento forzó aún más la exigencia al incrementar significativamente la densidad de siembra y establecer como tratamiento extremo el uso de solamente un lateral emisor por tablón de 1,20 m de ancho.

Según Burgos y Vidal; y Thornwaite, el clima de la zona se describe como semiárido, mesotermal, con pequeño o nulo exceso de agua.

La experiencia tuvo lugar en una parcela de 10.000 m<sup>2</sup> no empleada anteriormente para cebolla, que forma parte del campo piloto experimental de CORFO "Estancia San Adolfo" ubicado a la altura del Km 786,7 de la Ruta Nac. 3 en cercanías de la localidad de Hilario Ascasubi, Provincia de Buenos Aires. La parcela presentaba ondulaciones leves sobre una pendiente general menor al 0,3 %, lo que no fue modificado con el propósito de respetar la condición natural a fin de evitar la operación de sistematización con laser usual al aplicarse el riego tradicional por gravedad. El terreno se delimitó con su lado frontal paralelo y a corta distancia de una acequia preexistente, alimentada por agua del Río Colorado y servida de un canal terciario a través de una compuerta regulable (Figura 3).

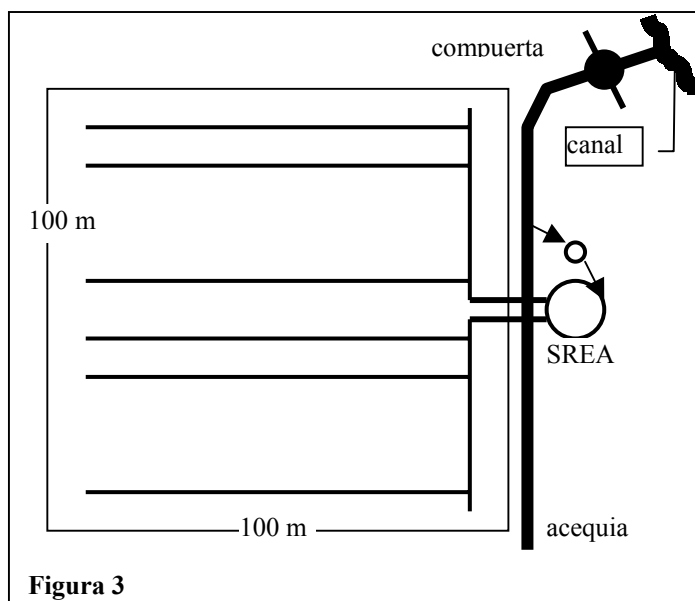


Figura 3

Suelo: Hapludol éntico franco-grueso; Retención Hídrica a 33 Kpa: 0,162 en peso; Densidad Aparente: 1,35.

Variedad de semilla sembrada: Valenciana Sintética 14, de amplia adopción local.

La densidad de siembra empleada fue de 88.660 plantas/línea ó 1.063.920 plantas/Ha (+50% respecto a lo usual en la zona).

Labores: La parcela fue sometida a las siguientes labores culturales y tratamientos:

1. Presiembra: arado de discos en todo el terreno
2. Postsiembra: aplicación de herbicida preemergente

<sup>19</sup> ROSENFELD B., DÍAS H., SVACHKA O., PLA M., 2004,:"Ensayo de Cultivo de Cebolla bajo el Sistema de Riego Ecológico Autónomo"; informe interno al Convenio CORFO - FAUBA-Ing. Rosenfeld. El experimento fue organizado y auspiciado con participación de: Corporación de Fomento del Río Colorado, Convenio FAUBA-Ing. Rosenfeld, Asociación de Productores de Cebolla, Asociación de Productores de Villarino Sur y Asociación de Productores Hortícolas de Carmen de Patagones, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

3. Fertilización: una aplicación de urea a mitad del proceso mediante fertirriego
4. Desmalezado: manual, en tres ocasiones; químico: una vez, a manchones acotados de sorgo de Alepo.

Marco de plantación: tablones con ejes espaciados 1,60 m (trocha del tractor); ancho del tablón: 1,20 m; separación longitudinal de plantas: 7 cm; filas de siembra por tablón: 12 (usual 8).

Tratamientos:

1. Un lateral: una cinta emisora ubicada en el centro de cada camellón; se aplicó a 31 camellones del ala izquierda;
2. Dos laterales: dos cintas por camellón, situadas centralmente con separación de 0,60 m; se aplicó a 31 camellones del ala derecha; y
3. Tres laterales: como prueba extrema, se realizó en solamente un camellón ubicado en el centro del experimento.

Depósito: tanque plástico de capacidad 2,8 m<sup>3</sup> elevado 3,5 m.

Llenado: mediante electrobomba centrífuga monofásica de 1 Hp con toma desde acequia al efecto, alimentada por tendido de 1000 m. Actuador SREA: pasaje 50 mm.

Lámina diaria de riego: 5,3 mm (máximo) (ver Discusión).

Objetivo del ensayo: comprobar mediante un cultivo de amplia difusión en la zona de influencia de las Instituciones intervinientes y en condiciones reales de producción, las características y ventajas concretas del nuevo Sistema de Riego en lo que hace al rendimiento económico-productivo, aprovechamiento del suelo, ahorro de agua y de energía entre otras. En particular, Investigar la distribución del agua en el suelo franco arenoso de la zona, producida por el riego pulsante SREA al emplear 1 ó 2 y hasta 3 laterales emisores por tablón cultivado.

## Evaluaciones

Productiva a la cosecha: discriminada por tratamiento y posición en el tablón, medida en peso bruto de cebolla y cantidad de bulbos. Rendimiento en calidad comercial: distribución por calibres según categorías usuales. Bolsas: con un contenido promedio de 23,5 Kg de cebolla.

### Metodología para evaluar el potencial de producción

Se delimitaron 9 sectores de 1,80 m de longitud de tablón cultivado a fin de medir la producción potencial de bulbos de cebolla, distribuidos y denominados según el tratamiento de la manera siguiente:

1 lateral				2 laterales				3 laterales
1-A	1-B	1-C	1-D	2-A	2-B	2-C	2-D	3

Dentro de cada sector, se cosechó separadamente todo lo producido a lo largo de cada una de las 6 filas dobles, que se numeraron en forma correspondiente de izquierda a derecha.

El total de 54 bolsas se colocó en galpón durante 30 días para su secado natural según la práctica acostumbrada.

Luego se procedió al conteo, pesaje y clasificación de los bulbos según las categorías comerciales de calibre usuales, a saber:

CALIBRE 90-70	CALIBRE 70-50	CALIBRE 50-35	CALIBRE <35	DESCARTE
---------------	---------------	---------------	-------------	----------

correspondiendo las tres primeras al mayor valor comercial.

Las estadísticas efectuadas sobre esta base ameritan la influencia de los tratamientos sobre la producción potencial por Ha y distribución de calibres obtenida en términos de peso y cantidad de bulbos, y en segundo lugar sobre la distribución de lo producido según la posición de la respectiva línea en sentido transversal al camellón.

Contenido de humedad en suelo: se efectuaron 21 tandas de mediciones en fechas no contiguas a lo largo de la campaña, mediante 21 sensores "Watermark" distribuidos como sigue:

- ◆ Tres zonas A, B y E localizadas al azar sobre camellones del tratamiento **I**, a 15, 30 y 45 cm de profundidad;
- ◆ Dos zonas C y D localizadas al azar sobre camellones del tratamiento **II**, a 15, 30 y 45 cm; y
- ◆ Una zona S para monitoreo de distribución transversal de humedad en camellón del tratamiento **I** con 6 sensores en correspondencia con las líneas de plantas, a 10 cm de profundidad.

Distribución de humedad en el suelo:

**Análisis visual** mediante cortes a pala ("calicata").

**Análisis cuantitativo:** mediante 6 sensores dispuestos en sentido transversal al tablón.

**Análisis operativo:** mediante análisis del producto según la posición relativa de la línea cultivada en el tablón.

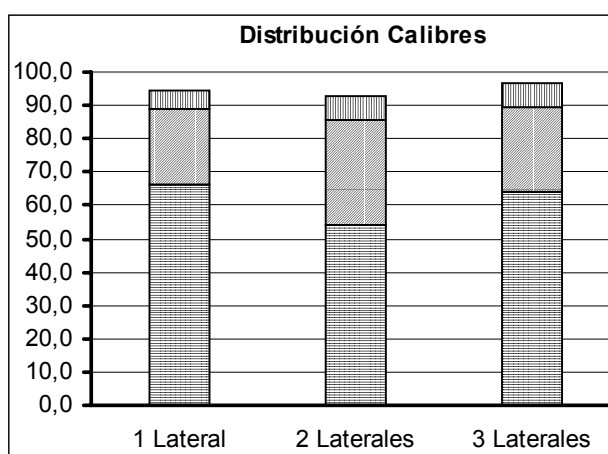
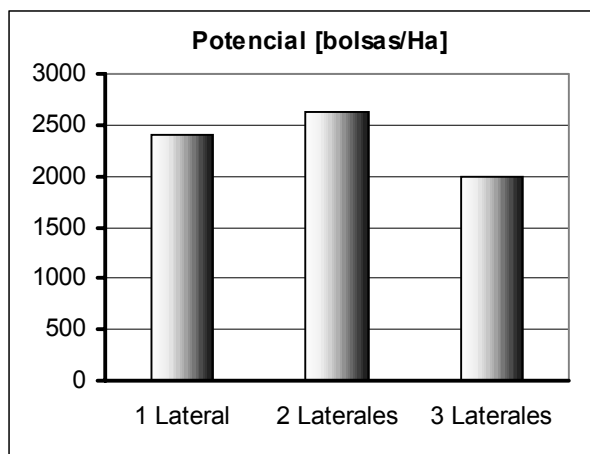
Uso de agua: medidor totalizador volumétrico a desplazamiento positivo.

Consumo energético: mediante medidor eléctrico monofásico standard (KW.hora).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

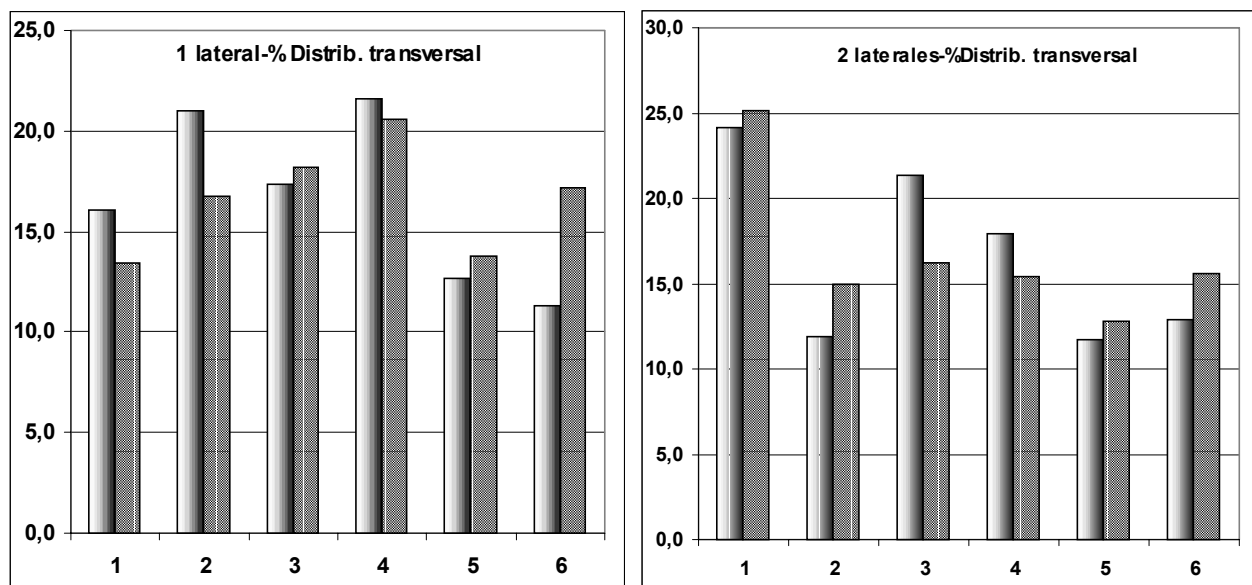
Resultado Productivo: El Gráfico 3 tabula e ilustra los valores obtenidos

Parámetro	1 Lateral	2 Laterales	3 Laterales
Calibre 90/70 [%]	66,6	54,0	64,0
Calibre 70/50 [%]	22,6	31,8	25,6
Calibre 50/35 [%]	5,3	6,9	7,3
Total 3 calibres [%]	94,5	92,7	96,9
Potencial [Kg/Ha]	56440	61741	47027
Potencial [bolsas/Ha]	2402	2627	2001



**Gráfico 3:** Resultados del ensayo de cebolla en CORFO en potencial productivo y calidad comercial

Distribución de agua en el suelo: A fin de mensurar operativamente el grado de uniformidad de humidificación edáfica en sentido transversal al tablón producido por los tratamientos principales, se contabiliza en el Gráfico 4 la media de peso y Nro. de bulbos en cada grupo de 2 líneas de plantas:



**Gráfico 4:** distribución transversal % de peso bruto y nro. de bulbos de cebolla para dos tratamientos.

En otros términos, el desvío standard de los apartamientos porcentuales de producción media, correspondiente a 6 posiciones equidistantes sobre una transversal al tablón de 1,20 m de ancho, resultó ser de:

1 lateral por tablón	2 laterales por tablón	3 laterales por tablón
<b>3,3%</b>	<b>4,5%</b>	<b>5,8%</b>

Uso del recurso agua: la medición del total de agua utilizada arrojó un valor de 25% respecto al método tradicional por surco, y de 50% respecto a una experiencia previa con goteo<sup>20</sup>. La capacidad de bombeo y por tanto la lámina de riego diaria máxima aplicable se vio limitada a **5,3 mm** por la fuerte caída de tensión inducida en el tendido eléctrico.

Condiciones climáticas durante el ensayo<sup>21</sup> de cebolla en CORFO:

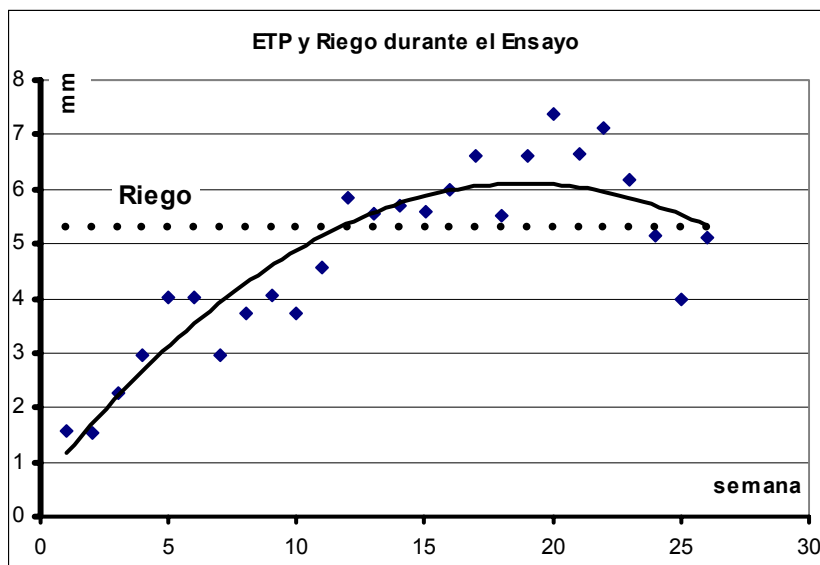
Precipitaciones: 211,6 mm (-24,4% respecto al valor histórico). Valores térmicos: promedio de temperaturas máximas y mínimas para diciembre: 29 °C y 13,2 °C respectivamente; enero: 31,5 °C y 14,8 °C. Extremos: en febrero: 37,4 y 7,1 °C, respectivamente.

Los vientos predominaron del sector noroeste con una velocidad media de 9,2 Km/h a 2 metros de altura.

La persistencia del viento origina en gran parte la elevada ETc registrada, que se ilustra en el Gráfico 5 en comparación con la lámina de riego máxima que el equipo pudo suministrar (ver Discusión).

<sup>20</sup> SANCHEZ R. y PEZZOLA A.,1997: "Riego por Goteo en Cebolla"; Bol. Téc. 7 ISSN 0328-3321; Proyecto Cebolla, INTA EEA H. Ascasubi, Ruta Nac. 3 Km 794, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.

<sup>21</sup> EEA INTA H. Ascasubi; Informe Climático 2002 - 2003.



**Gráfico 5:** comparación entre la demanda hídrica por Evapotranspiración y la lámina de riego máxima aportada por el SREA: 5,3 mm/día, limitada por el tendido eléctrico.  
ETc diaria (media semanal enero/2003, 2ª quincena):  
ETcmin=5,5mm;  
ETcmax=9,9 mm;  
ETcmed=7,1 mm.

Energía: El gasto en electricidad durante la campaña fue 164 \$/Ha (55 USD/Ha). Por producto, el valor resultó 0,07 \$/bolsa (0,023 USD/bolsa) representando un 0,88% del precio medio corriente de la bolsa en el mercado (8 \$).

Breve discusión de los resultados: Respecto de una producción standard de 2500 bolsas/Ha considerada satisfactoria para la zona, los resultados del experimento resultan significativamente positivos, particularmente en lo correspondiente al tratamiento **D**. Lo mismo puede señalarse en cuanto a la aptitud cualitativa (calibres) del producto. Esto se logró en circunstancias extremas, ya que el rigor climático local se vio acentuado durante la campaña 2002-2003 mientras la capacidad irrigante del SREA resultaba acotada por causas técnicas externas al sistema de riego (red eléctrica).

A partir del conjunto de experiencias efectuadas surgió la necesidad de continuar el presente desarrollo a fin de, en base a la verificación de los principios fundamentales implementados, superar las limitaciones prácticas observadas en cuanto a alcance de superficie regable, flexibilidad de uso y sencillez constructiva, entre otros.

Los avances de la Electrónica aplicada al control eficiente de grandes potencias electromecánicas se incorporan en la nueva versión "MPM" (Microirrigación Pulsante Modulada) del SREA para implementar el principio de Riego Pulsante a Caudal Impuesto con numerosas ventajas. En efecto, la nueva versión mejora al SREA al llevar a la práctica idéntico principio mediante la modulación directa de la acción de la bomba impulsora, controlando tanto el caudal impuesto a la red como el volumen de cada pulso con el auxilio realimentador de un dispositivo sensor - transmisor de caudal.

Las ventajas de la versión MPM consisten -entre otras- en reducir aún más el costo de la instalación al prescindir del depósito elevado, expandir el área regable habilitando la sectorización de tratamientos según las necesidades diferenciadas de cada parcela, sin dejar de preservar las ventajas ahorrativas de recursos características del principio operante, así como la confiabilidad y nulo mantenimiento inherentes a su antecesor. A ello se agrega la anulación de todo "golpe de ariete" usualmente deletéreo para los conductos en régimen pulsante.

La MPM -actualmente instalada en una prueba productiva de 10 Has- se propone como una generalización de la versión gravitacional del SREA; y de hecho la incluye como

una de sus variantes posibles de implementación para aplicaciones en superficies menores a unas 3 Has y/o casos en los que la fuente de agua se halla naturalmente elevada.

## CONCLUSIONES

Después de una serie de experiencias de laboratorio y campo aplicando la versión gravitacional del Sistema de Riego Ecológico Autónomo, fue posible formular un grupo homogéneo de principios tecnológicos, operativos e hipótesis destinados a explicar los inéditos resultados obtenidos en los aspectos agronómicos y de sostenibilidad.

Dichos conceptos, convencionalmente denominados por los autores "Riego Pulsante", "Caudal Impuesto", "Stress Cero" y "Cuidado de Recursos" fueron puestos a prueba durante la campaña 2002-2003 a través de un experimento específico de campo en condiciones de extrema exigencia con el propósito de poner de relieve los límites de validez de la presente tecnología, junto con desbrozar nuevos caminos de mejora y/o expansión.

A partir de los resultados obtenidos se concluye la efectiva validez y eficacia de los conceptos e hipótesis puestos a prueba, para proveer un grado no conocido hasta el momento de productividad con sostenibilidad para la agricultura intensiva. Sobre esa base, se ha probado ya una versión avanzada de dispositivo pulsador que, empleando electrónica de potencia de última generación, implementa los conceptos validados.

Los autores desearían que pudiera entenderse la referida experiencia como la apertura de un horizonte para nuevas investigaciones, ensayos, y síntesis de mejoras tecnológicas capaces de agregar capacidades a los dispositivos actualmente vigentes.

## BIBLIOGRAFIA

- Augier P. et al:** *"The need to improve the on-farm performance of irrigation systems to apply upgraded irrigation scheduling"*; FAO Water Report 8;
- Ascasub, H.** Informe Climático 2002 – 2003, EEA INTA
- Facorro Ruiz** (1974): *Curso de Hidráulica*; p.p. 137-139
- Gutierrez, M. A.** (1999) *Análisis del funcionamiento del SREA a través de variables agronómicas*". Tesina de graduación FAUBA; Junín, Argentina.
- HANSON B. et al:** DRIP IRRIGATION OF ROW CROPS: WHAT IS THE STATE OF THE ART?; [http://www.oznet.ksu.edu/sdi/Abstracts/Drip Irrigation of Row Crops.htm](http://www.oznet.ksu.edu/sdi/Abstracts/Drip%20Irrigation%20of%20Row%20Crops.htm)
- Humphreys A.** (1989): *"Surge irrigation: 1. An overview"*; ICID Bulletin 38(2): 35-48; y *"Surge irrigation: 2"*; Management. ICID Bulletin 38(2): 49-61.
- Isbérie, C. y P., P.** (1995). *Gestion des apports d'eau et tensiomètre*. Forum AGROFORA, ATH 1994. Nouv. Sci. Technol. 13: 203-209.
- Pizarro Cabello F.** (1990): *Riegos Localizados de Alta Frecuencia*. Mundi Prensa, Madrid, España. P.P.142-150
- Rosenfeld, B. y Dias H.** *"Sistema de Riego Ecológico Autónomo: desarrollo de una alternativa en irrigación localizada"*; Avances en el manejo del Suelo y Agua en la Ingeniería Rural Latinoamericana, CLIR '98, ISBN 950-34-0124-0; p.p.406-414, UNLP, La Plata, Argentina.

- Rosenfeld, B.** (1998): "*El Sistema de Riego Ecológico Autónomo y su aplicación experimental en la Huerta Orgánica Agronomía*"; XXI Congreso Argentino de Horticultura, San Pedro, Pcia. de Buenos Aires, Argentina
- Rosenfeld, B.** (2000): "*Sistema de Riego Ecológico Autónomo: Experimentos y Avances*", Avances en Ingeniería Agrícola ISBN 950-29-0593-8, p.p.399-404, CADIR'2000, FAUBA, Buenos Aires, Argentina.
- Rosenfeld B., Días H., Svachka O., Pla M.** (2004) :"*Ensayo de Cultivo de Cebolla bajo el Sistema de Riego Ecológico Autónomo*"; informe interno al Convenio CORFO - FAUBA-Ing. Rosenfeld.
- Rosenfeld, B.** (2000): "*Sistema de Riego Ecológico Autónomo: Microirrigación de Ultra Bajo Volumen Adaptativa al Suelo*"; 11ª Conferencia de la Organización Internacional de la Conservación del Suelo (ISCO); Buenos Aires, noviembre de 2000.
- Sanchez R. y Pezzola A.** (1997): "*Riego por Goteo en Cebolla*"; Bol. Téc. 7 ISSN 0328-3321; Proyecto Cebolla, INTA EEA H. Ascasubi, Ruta Nac. 3 Km 794, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.
- Spencer** (1974) Patent Nr. 3.797.741; US Patent & Trademark Office, USA.
- Zaidel, J. et al.** (1992)"*Estimation of finite difference interblock conductivities for simulation of infiltration into initially dry soils*"; Water Res. research, sep. 1992, p. 2285
- Zara, C.** (1999) "*Análisis del comportamiento hidráulico del SREA*". Tesina de graduación FAUBA; Junín, Argentina.
- Zur, B** (1976) "*The Pulsed Irrigation Principle for Controlled Soil Wetting*"; Soil Sci. 122; 282-291.
- Zur, B. y Savaldi D.**(1977) "*Infiltration under a Pulsed Water Application: 1. The Nature of the Flow System*"; Soil Sci. 124; 127-134.Zur B.,1976: The Pulsed Irrigation Principle for Controlled Soil Wetting; Soil Sci. 122; 282-291.