

## Fisiología de cultivos. "Intensificación sustentable. Captura de carbono y aumentos en rendimiento potencial y rendimiento bajo estrés en los grandes cultivos"

Edmundo Acevedo

### Introducción.

La agricultura en Chile y el mundo es una actividad económica que tiene relación con la producción de los cultivos en forma sustentable y su transformación a formas que son consumidas con el hombre. La realizan numerosas personas como una actividad para vivir. La ciencia agronómica, por otra parte, genera el conocimiento que apoya a la agricultura. Así, en la actualidad, la ciencia agronómica constituye la base de la agricultura moderna.

Me referiré a cultivos anuales, que son generalmente *commodities* que se transan fuera del país y, en consecuencia, los precios son fijados exteriormente. Así, los cultivos anuales chilenos experimentan muchos de los problemas globales de los cultivos anuales.

Me referiré a las necesidades alimentarias, a las repuestas que la agronomía ha tenido en el pasado con respecto a las necesidades alimentarias, al problema de la sustentabilidad, a la labranza de conservación o agricultura de conservación y al rendimiento de los cultivos para dar finalmente algunas conclusiones.

### Necesidad de alimentos.

La agricultura global ha sido extraordinariamente exitosa en la producción de alimentos en el siglo pasado, haciendo que los rendimientos aumenten en forma continua y que los precios disminuyan consecuentemente. Cada día resulta más barato alimentarnos y eso es un gran mérito de la ciencia agronómica.

En el siglo XXI, sin embargo, se requiere un aumento sustancial de la producción de los cultivos, ya que es necesario un mayor rendimiento por aumento de la población. El suelo en producción ha llegado a un límite, en consecuencia, para suplir las necesidades crecientes de la población se requiere una mayor intensificación en la producción. Además, hay una menor proporción de gente en los campos, hay menor agua disponible para riego, que es requerido para altas producciones. Habrá que aumentar la producción y mantener la rentabilidad mejorando al mismo tiempo, la sustentabilidad de los cultivos. Por último, se ha intensificado recientemente el uso de cultivos como fuente energética, compitiendo con la producción de alimentos.

Desde comienzos de la década actual se ha visto que la demanda en los principales cultivos alimenticios, trigo, maíz y arroz, que cubren más de 50% de la alimentación del hombre a nivel global, es superior al crecimiento de la producción (Cuadro 1). El año 2007 se experimentó la consecuencia de esto, y los precios de estos *commodities* subieron notablemente, creando una situación incómoda en muchos países del mundo, incluso en Estados Unidos, que llegó a racionar, la venta de arroz en supermercados en determinados momentos.

**Cuadro 1.** Crecimiento en la producción global de trigo, maíz y arroz y demanda proyectada. (Fischer, R. A. 2008; Fischer y Edmeades, 2009)

Cultivo	Demanda Proyectada en próximos 20 años (% por año)	Crecimiento de la producción en los últimos 15 años (% por año)
Trigo	1.5	1.0
Arroz	1.8	1.0
Maíz	1.5	1.2

#### **Respuestas de la Agronomía en el pasado.**

¿Cómo ha respondido la Agronomía en el pasado a la demanda de alimentos? La Agronomía tiene un gran ejemplo de aproximación a este problema, generado a mediados del siglo pasado y que se reconoce actualmente como “revolución verde”, llevada adelante por lo que hoy constituyen los Centros Internacionales del Grupo Consultivo para Investigaciones Agropecuarias (Consultive Group for Internacional Agricultural Research, CGIAR). Quedó en claro entonces que la agronomía genera los conocimientos que inciden en aumentos de rendimiento y mayor producción a través de dos grande canales, el mejoramiento genético, y las prácticas de manejo agronómico (Figura 1). El mejoramiento genético, contribuye con nuevos híbridos, o mejores variedades de polinización abierta que aumentan el potencial de rendimiento generando genotipos que tienen una mayor capacidad de producción. Esto se ha visto acelerado notablemente en los últimos 10 a 15 años con la irrupción de la biotecnología que facilita la labor del mejoramiento genético en algunos casos, particularmente la mejora de la resistencia a estreses bióticos, plagas y enfermedades. Las prácticas agronómicas, por otro lado, permiten que el potencial de rendimiento se exprese llegado a desarrollar al día de hoy la agricultura de precisión que está llamada a juzgar un rol muy importante en el futuro dada la exigencia de sustentabilidad de la producción.

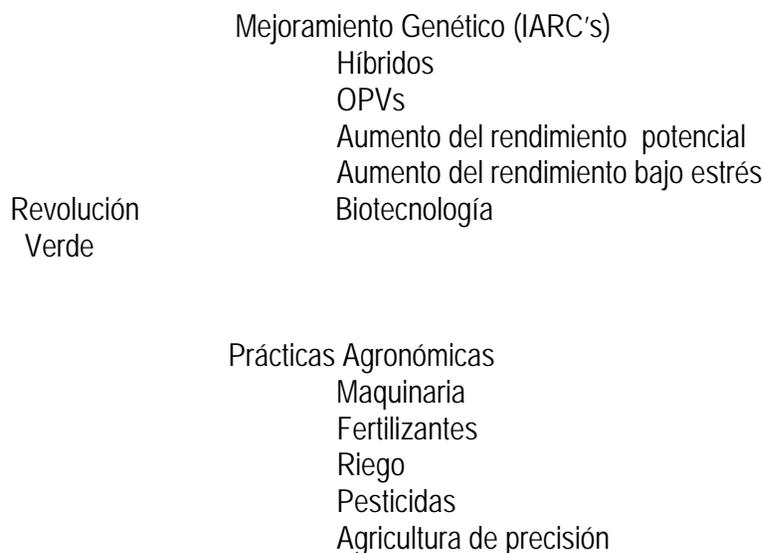


Figura 1. Esquema de operación de la Revolución Verde.

La aproximación a la generación de conocimiento y producción de alimentos mencionada ha sido extraordinariamente exitosa. La Figura 2a muestra para la década de 1980 a 1990, como todas las regiones del mundo excepto el África sub-Sahara, tuvieron un aumento en la disponibilidad de alimentos per cápita, a pesar del crecimiento de la población. La FAO, muestra para la década siguiente de 1990 a 2000 (Figura 2b) la seguridad alimentaria en el mundo y otra vez el África sub-Sahara es básicamente el área del mundo que mantiene problemas alimentarios, problemas que son de tipo social, extremadamente complejos y no necesariamente asociados a la ciencia agronómica.

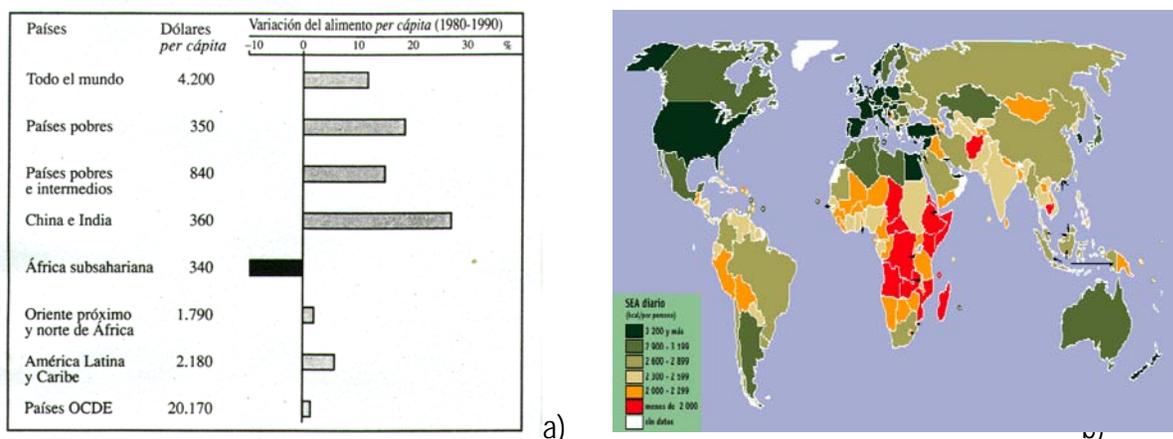


Figura 2. a) Variación del alimento per cápita por regiones 1980-1990. b) Mapa de seguridad alimentaria global 1990-2000 (FAO, 2001)

¿Qué problemas han quedado pendientes? Ha habido un escaso avance en el mejoramiento genético del rendimiento para las zonas con estreses abióticos, sequía, alta temperatura, baja temperatura, salinidad. El avance en rendimiento por fitomejoramiento del rendimiento bajo estrés (hídrico fundamentalmente) es del orden de 0.3% por año. El avance en fitomejoramiento en buenas condiciones es muy superior a eso, alrededor de 1%. Por otra parte, los aumentos en rendimiento han demandado una intensificación de la

agricultura, lo que ha tenido un alto costo ambiental, que se ha expresado en erosión, contaminación de los recursos suelo, agua y atmósfera.

### Sustentabilidad.

Los principales problemas ambientales, asociados a la intensificación de la agricultura, son, entre otros, erosión, acidez, salinidad, y uno que no se ve con facilidad, la pérdida de carbono y productividad del suelo (Acevedo et al 2009).

El crecimiento futuro de la producción agrícola de estos *commodities*, requiere de una intensificación agrícola sustentable. Para ello nació el concepto de agricultura de conservación. Curiosamente esto se centra en la labranza por cuanto el uso de la labranza, además de erosión, ha generado un balance de carbono negativo en los suelos agrícolas, que se correlaciona positivamente con una disminución de la productividad de los cultivos (Figura 3). No hay que confundir productividad de los cultivos con producción, evidentemente que la producción esta aumentando porque las nuevas variedades tienen mayor potencial y se usan mayores insumos en la producción. Pero la productividad, es decir, la producción por vector de insumos, ha ido cayendo y ese es un problema que la Agronomía vive el día de hoy y que tiene que resolver.

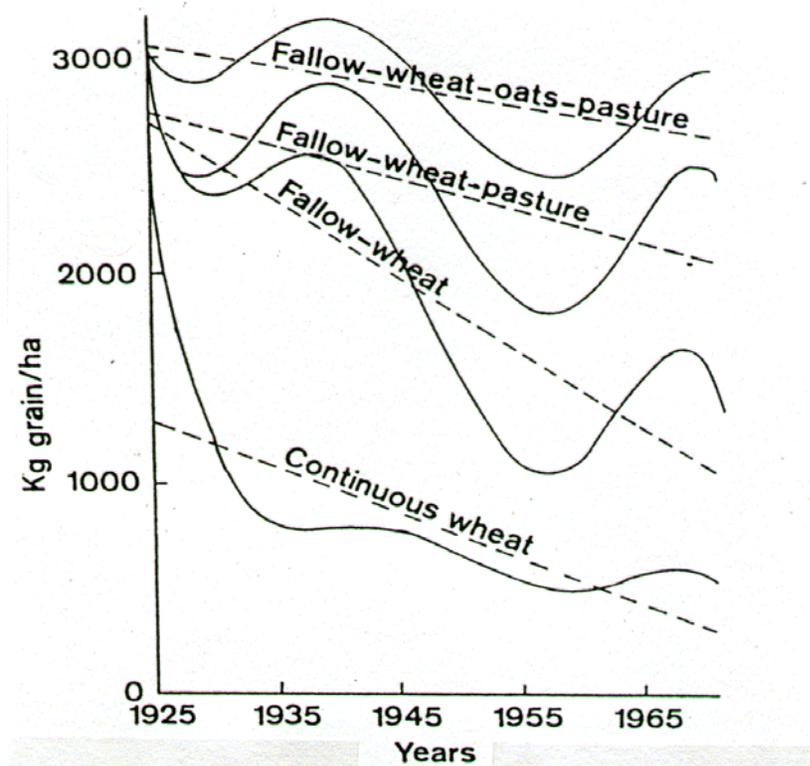


Figura 3. Disminución de la productividad de diferentes rotaciones de cultivos en el tiempo (Vlek, 1982)

### Labranza de conservación.

El carbono del suelo juega un papel esencial en su productividad y la labranza convencional lleva a perder del orden de dos toneladas de carbono por hectárea al año. La agricultura de conservación ha hecho posible que se llegue a invertir esto en 2.500 kilos, es decir, que se tenga un almacenamiento de carbono orgánico en el suelo del orden de 500 kilos por hectárea por año mejorando con ello sus propiedades físicas, químicas y biológicas. No es simple, sin embargo, la adopción de la labranza de conservación en Chile ya que el Chile agrícola, es decir, Chile central, tiene medioambiente mediterráneo de alto

rendimiento. El medioambiente mediterráneo implica lluvia en invierno y sequía en verano, lo que hace difícil la descomposición de los residuos después de la cosecha. En Chile hay, además, un cuociente fototérmico para producción de cultivos que es muy superior al cuociente foto térmico de todos los países del mundo, por lo que nos acercamos al record de producción de prácticamente todos los cultivos, y, en consecuencia, realizar este tipo de agricultura se hace bastante complejo por la gran cantidad de residuos que quedan en el campo. Hay una gran cantidad de residuos que quedan sin descomponer por cuanto no hay lluvia en el verano (Acevedo et al 2009). El verano es seco, los residuos no se descomponen y los agricultores se ven en la obligación de quemarlos. ¿Cómo evitar las quemas? Ese es un problema abierto, todavía no está resuelto porque la recolección de ese material no es económicamente factible para los agricultores. Algunos lo hacen, la gran mayoría lo quema. Hay otros problemas asociados a la labranza de conservación, como la compactación de suelos en algunas zonas agroecológicas.

### Rendimiento potencial y rendimiento bajo estrés.

El rendimiento de los agricultores bajo buenas condiciones (riego, fertilidad y otros) esta asociado al aumento del rendimiento potencial, es decir, con el aumento de rendimiento que se obtienen en las estaciones experimentales con una variedad adaptada y controlando los estreses. El rendimiento de ese agricultor corre paralelo y por debajo del rendimiento potencial. De ello se puede inferir que hay dos formas de aumentar el rendimiento en el campo de estos agricultores, elevando el rendimiento potencial y disminuyendo la brecha entre rendimiento de agricultor y rendimiento potencial. La figura 4 muestra el avance en rendimiento potencial y en el campo de agricultores. Ambas curvas, en este caso, son paralelas y se ha ajustado una recta a los últimos 20 años, para mostrar como ha caído la tasa de crecimiento del rendimiento potencial y cómo esto se refleja en forma paralela en el rendimiento de los agricultores. Hay algunas excepciones, como el maíz, en Iowa, USA en que la brecha entre rendimiento potencial y rendimiento de los agricultores se ha reducido notablemente. En el Reino Unido el progreso por año en rendimiento potencial ha sido 0,6% año<sup>-1</sup> en trigo y 0.7% año<sup>-1</sup> los agricultores con una brecha de 30%. En el valle Yaqui en el noroeste de México donde CIMMYT tiene su principal campo experimental el progreso en rendimiento potencial en trigo de primavera es de 0.3% año<sup>-1</sup> en el ultimo tiempo, 0.3% año<sup>-1</sup> de progreso en campo de los agricultores y un 50% de brecha.

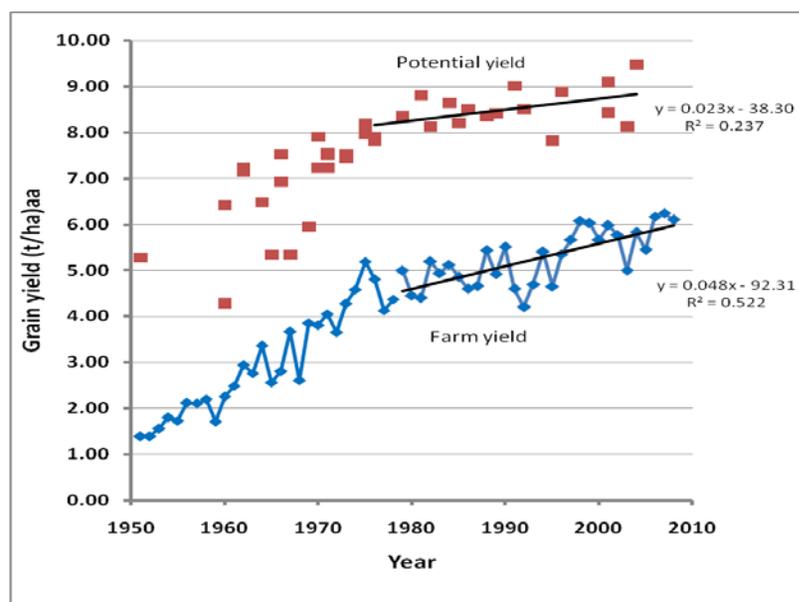
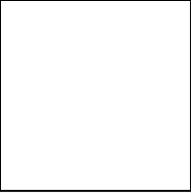


Figura 4. Rendimiento potencial de trigo y en campo de agricultores en el Noroeste de México (Fisher y Edmeades, 2009).

¿Qué se requiere para aumentar el rendimiento potencial?, Conceptualmente esto es simple, ya que el rendimiento está generado por la fotosíntesis y los elementos claves de estos sistemas son la intercepción de radiación, el uso de esta energía en la reducción de CO<sub>2</sub> y otros sustratos, incorporación de los asimilados en nuevas estructuras y la mantención, la respiración, es decir, lo que requieren las plantas para mantenerse vivas. ¿Cuáles son los valores más altos de eficiencia de uso de radiación (RUE) que se tiene en este momento? En maíz 3.5 gramos por mega joule de radiación fotosintéticamente activa, caña de azúcar la más alta, 4 gramos, trigo 2.8 gramos, soya 2.6 gramos, ¿pero cuál es el potencial? Teóricamente las plantas podrían llegar a producir 8.2 gramos de biomasa por mega joule de radiación de Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) absorbida. Actualmente el valor es cercano a 3.7 gramos de biomasa por mega joule, o sea, teóricamente hay aún espacio para crecer. Evidentemente que cada vez se hace más difícil aumentar la eficiencia del uso de la radiación. ¿Qué se piensa para poder mejorar la RUE? Manipular genéticamente las propiedades de la enzima que fija carbono, que es una carboxilasa oxigenasa en plantas C<sub>3</sub> y que tiene asociado el proceso de fotorespiración. Reinvestigar el follaje de las canopías, esto ha ocupado gran parte de los últimos diez años. Si se observa las siembras de maíz, actualmente parecen plantaciones de caña de azúcar, las hojas son totalmente verticales, esa es una disposición del follaje obtenida genéticamente con el fin de optimizar la eficiencia de la captación de radiación. ¿Cuáles son las variables fisiológicas que realmente han contribuido en el pasado a aumentar el rendimiento potencial? Las principales han sido el índice de cosecha y el número de granos por metro cuadrado en los cereales de invierno, para ello la fuente de mayor rendimiento de estos cultivos ha sido una mayor abertura de los estomas, curiosamente, tanto bajo condiciones de estrés de agua, como bajo condiciones potenciales. En Japón se han estado publicando en esta década algunos caracteres fisiológicos para arroz, mayor número de granos por metro cuadrado, mayor tasa de crecimiento, mayor fotosíntesis, hojas erectas. Hay personas que piensan, que se puede mejorar el rendimiento potencial directamente con los conocimientos actuales de biotecnología, esto no es así. Si uno hace un pequeño análisis de los diferentes niveles de organización partiendo del DNA, las enzimas, a los procesos fisiológicos, al cultivo, el rendimiento y el agricultor, se da cuenta que el nivel de complejidad va aumentando a tal extremo que es prácticamente imposible vincular el rendimiento directamente al DNA, la tarea ha sido muchísimo más compleja de lo que inicialmente se pensó. Así entonces la agronomía, seguirá jugando su papel, a nivel de agricultor, rendimiento y cultivo, junto con el fitomejoramiento y la fisiología y tal vez algún día se pueda llegar a la vinculación de las bases de la herencia con lo que se obtiene en rendimiento.

### **Conclusiones.**

Primero, aun hay problemas importantes en el desarrollo de la agronomía para sistemas agrícolas de medioambiente mediterráneos, en particular en condiciones de secano. Segundo, el progreso de rendimiento a nivel de agricultores está asociado al aumento del rendimiento potencial, en consecuencia hay que seguir estudiando como aumentar ese rendimiento potencial. Hay una realidad que hay que tener presente, tal es que la tasa de progreso anual de rendimiento potencial de los principales cultivos alimenticios del mundo es inferior al 1% al año y la demanda es del orden del 1,5% al año y hay una brecha de rendimiento que es agrónomicamente explotable. Se agotó la estrategia de aumentar el índice de cosecha en cultivos como los cereales de invierno, ahora hay que aumentar la biomasa de los cultivos, mayor materia seca en las espigas, mayor tasa de crecimiento alrededor de anthesis, mayor almacenamiento de carbohidratos solubles en los tallos en preanthesis. En la eficiencia del uso de la radiación hemos estamos a prácticamente la mitad del máximo teórico, y la evidencia fisiológica es que aumenta la fotosíntesis máxima por un aumento de conductancia.



## Literatura Citada.

Acevedo,E., Martínez E. and Silva.P. 2009. Constraints to zero tillage in mediterranean environments. Lead papers 4<sup>th</sup> World Congress on Conservation Agriculture: Innovations for improving efficiency, equity and environment. February 4-7, 2009 New Delhi, INDIA. Publisher by 4<sup>th</sup> World Congress on Conservation Agriculture and printed at M/s Print Process, 225, DSIDC Complex, Okhla Industrial Area, Phase I, New Delhi 110020. 195-206 pp.

Fischer,R.,A.,and Edmeades, G.,O. 2010. Breeding and cereal yield progress. Crop Science. 50: S85-S98.

Fischer,R.A. 2008. Improvements in wheat yield. Agric. Sci NS 1/08: 6-18.

Vlek,P.,Fillery,R and Burford,J. 1981. Fate of nitrogen in arid soils. Plant and Soil 58:133-175.