

# **PRINCIPIOS AGRONÓMICOS: BASES PARA UNA TEORIA AGRONÓMICA**

**Rafael Novoa**

# 1.- Consideraciones generales.

Toda ciencia , entendida como un conjunto de conocimientos organizados obtenidos usando el método científico, tiene una teoría que expresa estos conocimientos bajo la forma de principios y leyes.

Además las ciencias más avanzadas expresan sus leyes en lenguaje matemático. Este lenguaje es menos ambiguo que la prosa agregando la posibilidad de cuantificar los efectos de los factores involucrados

No cabe dudas que la Agronomía es una ciencia por ser un conjunto de conocimientos obtenidos usando el método científico que en este caso es, principalmente, el ensayo de campo. Sin embargo no tiene una teoría aceptada. Ello hace que el avance en la solución de problemas agronómicos sean mas lentos y poco organizados que los logrados vía el Mejoramiento Genético, por ejemplo, que se fundamente en una

ciencia bien establecida: la Genética.

Ésta falta también se nota en la enseñanza agronómica donde se entrega a los alumnos gran cantidad de conocimientos detallados sobre muchas ciencias agronómicas dejando a su criterio como integrar esta información. Mi propósito es entregar a Uds. una manera de ver los problemas agronómicos basada en tres principios básicos que estimo son la médula de la Agronomía y cuya aplicación permite

una integración de sus conocimientos y un análisis agronómico. Todo agrónomo debería conocerlos y aplicarlos sin enredarse en la maraña de factores que afectan la producción de cultivos. Creo que ello es necesario para que un agrónomo encarado con una consultas tal como: que se requiere para lograr éxito con un cultivo o como identificar algún factor que esté afectando los rendimientos recurra a estos principios.

Los principios que enunciaré proveen un marco que permite lo dicho anteriormente.

Por otra parte una buena teoría, en contra de los que se cree comúnmente, debe ser práctica. Espero dejar claro este punto con el ejemplo que daré y aquellos que citaré más adelante.

**En resumen el libro sigue la pauta siguiente.**

**Primero enuncia lo que constituirían los principios básicos de una teoría agronómica, luego los explica y desglosa en sus componentes, indica su peso relativo, da un ejemplo de como usarlos y comenta los avances en la expresión en lenguaje matemático de sus conocimientos.**

## **2.- PRINCIPIOS AGRONÓMICOS.**

**2.1.- Uso de organismos mejorados eficientes.**

**2.2.- Dar a estos organismos las condiciones ecológicas adecuadas.**

**2.3- Hacer una buena gestión.**

## **2.1.- Uso de organismos mejorados eficientes.**

En gran medida la eficiencia productiva y la calidad del producto son determinadas por el organismo usado para producir. Así, las variedades o razas (factor genético) y/o las modificaciones del organismo usado para mejorar su eficiencia (técnicas quirúrgicas como podas, injertos, uso hormonas y otras) son las opciones disponibles para lograr

buenos rendimientos, buena calidad y una mejor eficiencia.

La principal herramienta usada para mejorar la eficiencia productiva y la calidad de los organismos usados en la agricultura ha sido la genética. Las mejoras en la productividad anual de los cultivos debida al mejoramiento genético ha sido estimada en 0.83 % durante la década del 80 al 90 pero su impacto no ha sido igual en todos los países ni regiones.

Al mismo tiempo los consumidores han sido beneficiados con productos de mejor calidad y con menores precios.

Los agricultores solo se han beneficiados cuando las reducciones de costos han sido mayores que las reducciones de precios del producto (Evenson, 2003a,b).

**Los mejoradores han logrado estos avances vía:**

**1.- Aumento del índice de cosecha (IC) (relación: peso órgano cosechado/ peso biomasa aérea): un cambio en la anatomía del cultivo.**

**2.- Introducción de genes que proveen resistencia o tolerancia a enfermedades y plagas (OGM Bt)**

**3.- Mejorando la calidad de los órganos cosechados.**

Como la genética establece el potencial productivo de un organismo es muy importante conocer cual es este.

Una manera de tener una idea de su valor es conocer su rendimiento potencial de un cultivo.

Este se define como el rendimiento de un cultivar cuando crece en un ambiente para el cual está adaptado con agua y nutrientes no limitantes, con plagas, enfermedades, malezas, tenebrosidad y otros estreses controlados efectivamente (Evans, 1993, Evans y Fischer 1999).

El cuadro siguiente se muestra los rendimientos máximos medidos, de algunos cultivos y, las medias mundiales según FAO, 2013 (ton/ha)

<b>Cultivo</b>	<b>Rendimiento medio Mundial ton/ha</b>	<b>Variedad</b>	<b>Rendimiento Máximo ton/ha.</b> 1: Campo 2: Camara Crec. 3: Invernadero	<b>Región y País</b>
<b>Arroz</b>	<b>4.48</b>	<b>II-32A/Ming86</b>	<b>17,95<sup>1</sup></b>	<b>CHINA</b>
<b>Trigo</b>	<b>3.26</b>	<b><u>Savannah</u></b>	<b>15.36<sup>1</sup></b>	<b>Nueva Zelandia</b>
<b>Trigo</b>	<b>3.26</b>		<b>18<sup>1</sup></b>	<b>Llanquihue, CHILE</b>
<b>Trigo</b>	<b>3.26</b>	<b>Yecora Rojo</b>	<b>47,6<sup>2</sup></b>	<b>Utah, USA</b>
<b>Maíz</b>	<b>5.49</b>		<b>23,2<sup>1</sup></b>	<b>USA</b>
<b>Cebada</b>	<b>2.92</b>		<b>11.4<sup>1</sup></b>	
<b>Remolacha azucarera</b>	<b>56.43</b>		<b>157.2<sup>1</sup></b>	<b>California, USA</b>
<b>Papas</b>	<b>19.46</b>		<b>44.39<sup>1</sup></b>	<b>Nebraska, USA</b>
<b>Tomates</b>	<b>87.80</b>		<b>580<sup>3</sup></b>	<b>MEXICO</b>
<b>Avena</b>	<b>2.44</b>	<b>S-81</b>	<b>69.4</b>	<b>Faisalabad, Pakistán</b>

**Puede apreciarse que:**

**1.- El potencial genético de los cultivos es muy alto.**

**2.- Hay una gran margen para mejorar los promedios.**

**Conocer el rendimiento máximo provee, además, un punto en la curva respuesta del rendimiento muy importante, como veremos más tarde.**

Como acercarse a lograr este rendimiento máximos es el desafío de investigadores y agrónomos del futuro. El potencial genético está. Según Fisher (2007) es necesario no perder de vista el medio ambiente del campo. El enfoque desde abajo (molecular) hacia arriba para avanzar

es desafiado por la complejidad y se requiere mayor énfasis en el enfoque de arriba hacia abajo que conduzcan a identificar mecanismos claves. En este sentido hay avances en el desarrollo de técnicas para identificar los componentes claves de sistemas complejos (Liu et al. 2013) que quizás se pueda usar en los eco sistemas agrícolas.

## **2.2.- Proveer condiciones ecológicas adecuadas.**

El potencial genético de los organismos elegidos solo se puede expresar si las condiciones ecológicas lo permiten. Las condiciones meteorológicas, atmosféricas, edáficas, hídricas, sanitarias (plagas, enfermedades, malezas), nutricionales que forman el entorno afectan los procesos productivos y el desarrollo de la población de organismos cultivados. Buena parte de la agronomía consiste en como dar las mejores condiciones ecológicas posibles a la especie vegetal o animal usada.

## **2.3.- Hacer una gestión adecuada.**

Se refiere, principalmente, a la influencia de los factores humano y socio económicos. Implica cuidar: el momento de aplicación y la intensidad del uso de las técnicas, el uso y manutención de la infraestructura, cuidar: los aspectos sociales, económicos (decisiones de compra y venta), los ambientales, lo producido, mantenerse informado, planificar e introducir innovaciones.

### **3.- Peso relativo de estos principios**

**Teóricamente, en promedio generales a nivel de una zona o país, se puede postular que un tercio de los aumentos de rendimientos han sido debido a lo genético, otro tercio a mejoras ecológicas y otro a la mejor gestión.**

**A nivel de un agricultor la situación puede ser muy diferente y debe analizarse en detalle en cada caso.**

**La opinión de los mejoradores de cultivos es que ellos son los responsables de un 50 % de los aumentos de rendimiento logrados en la producción d cultivos (Hewstone, 1997, Duvick, 2005) y que el 50% restante se debería a las mejoras de los factores ecológicos (riego, manejo y fertilidad del suelos, controles sanitarios y otros).**

Los mejoradores están probablemente en lo cierto si se toma los valores de rendimientos obtenidos en condiciones experimentales con una gestión optimizada e invariable. Lo que no es el caso en la práctica de los agricultores de un país o región. Pero si la gestión se toman en cuenta la contribución del mejoramiento genético será mas baja: alrededor de 33 %.

Un estudio hecho en el Valle del Yaqui, México, entre 1968 y 1990 mostró que el aumento de rendimientos de trigo, a nivel de agricultor, debido al mejoramiento genético fue de 28 % (Bell et al. 1995) valor cercano al 33 % teórico indicado anteriormente.

El efecto debido a las mejores prácticas de gestión ha sido estimado en 50 % en el caso del maíz (Duvick, 2005).

Por otra parte si comparamos, los rendimientos promedio que alcanzan los mejores agricultores de una zona con el promedio de los que producen menos, el efecto puede ser mayor en muchos casos. Buenos agricultores producen 20 a 200 % más que otros en las mismas condiciones de suelo y clima, en Chile.

Un informe del International Water.

Management Institute considera que gran parte de la mayor producción de alimentos que se requerirá en el futuro podría ser lograda llevando a los agricultores con bajos rendimientos al 80 % de los rendimientos de los buenos productores.

Un análisis sobre el efecto de los grupos factores que disminuyen los rendimientos potenciales de una variedad en un clima

dado (Fairhurst and Witt, 2002, Roy et al. 2006) concluye que:

- Es factible lograr un rendimiento de 80 % del potencial.
- El 20 % menos es debido a que económicamente no es rentable invertir para lograr 100% del potencial.

- Es posible un rendimiento de 60 % del potencial.

Si solo N, agua y gestión son adecuados.

- Es factible un rendimiento de solo 40 % del potencial.

Si se aplica poco fertilizantes y se hace una mala gestión.

En conclusión: parece válido retener el valor de 33 % como la contribución promedio nivel país de cada uno de los 3 principios citados en los rendimientos

## **4.- Ejemplo de uso de los principios agronómicos**

### **4.1.- Análisis de un cultivo**

PRINCIPIO.	PREGUNTA	SI/NO	RECOMENDACIÓN
1.- <b>Uso Organismo eficiente</b>	¿ Se usa una variedad adecuada?	No	Cambiar variedad
<b>2.-Proveer las condiciones ecológicas adecuadas</b>			
<b>Climáticas</b>  <b>Hídricas</b>  <b>Térmicas</b>	¿ El clima es adecuado para el cultivo o variedad? ¿ Riega? ¿ Hace bien el riego? ¿ Sufre de heladas?	No  Si No  Si	Cambiar cultivo o variedad  Cambiar o mejorar sistema de riego Estudiar uso sistema de protección si no lo tiene

<p><b>Edáficas</b></p> <p>Drenaje</p> <p>Labranza</p> <p>Nutritivas</p>	<p>¿Es el suelo adecuado?</p> <p>¿Necesita drenaje?</p> <p>¿Se preparó bien el suelo?</p> <p>Fertiliza</p> <p>Usa dosis adecuada</p> <p>¿Hace análisis de suelo o foliar?</p>	<p>Si</p> <p>No</p> <p>No</p> <p>Si</p> <p>Si</p> <p>Si</p>	<p>Modificar sistema de labranza</p>
<p><b>Sanitarias:</b></p> <p><b>Malezas</b></p>	<p>¿Controla las malezas?</p> <p>¿Usa el herbicida adecuado?</p>	<p>Si</p> <p>No</p>	<p>Cambiar herbicida</p>
<p><b>Sanitarias:</b></p> <p><b>Enfermedades</b></p>	<p>¿Tiene enfermedades?</p> <p>¿Las controla bien?</p>	<p>Si</p> <p>Si</p>	

<b>Sanitarias: Plagas</b>	¿Sufre plagas? ¿Las controla bien?	Si Si	
<b>3.- Hacer una gestión adecuada</b>			
<b>Momento e intensidad del uso de la técnicas</b>	¿Aplicas las técnicas en el momento adecuado? ¿Con la debida intensidad?	Si No	Ajustar dosis (semillas, agroquímicos) o número de plantas o intensidad (número y profundidad labores suelo)
<b>Mantenerse informado</b>	¿Está bien informado?	No	Mejorar acceso a información
<b>Cuida los aspectos económicos</b>	¿Lleva registros de ingresos y gastos?	Si	
<b>Cuidar manejo del personal</b>	¿Maneja bien a su personal?	Si	

<b>Infraestructura y Maquinarias y equipos</b>	¿Mantiene bien los edificios, caminos, canales, etc...? ¿Mantiene sus máquinas?	Si  No	  M e j o r a r mantención
<b>Cuidar lo Cosechado</b>	¿Cuida lo cosechado?	Si	
<b>Cuidar los aspectos ambientales</b>	¿Se preocupa del deterioro ambiental?	No	Cambiar técnicas que afecten al medio ambiente

4.2 Otros ejemplos: Ficha técnica de cultivos. Eficiencia uso del agua. Que hacer frente al cambio climático. Análisis de cómo los avances científicos futuros pueden afectar a la agronomía y la agricultura. Que ramos debe tener la carrera de agronomía. Cuales técnicas agronómicas son las mas peligrosas para el medio ambiente.

**5.- Avances en la expresión  
en lenguaje matemático de  
los conocimientos  
agronómicos.**

# Leyes agronómicas:

## Ley del mínimo (Liebig, 1843)

$$Y = k * X$$

**Y:** rendimiento (ton/ha)

**X:** factor que está al mínimo  
(kg/ha)

**k:** ton/kg

## **Ley del Optimo.**

**“Un factor que está en su nivel mínimo contribuye más a la producción mientras mas cercanos a su nivel óptimo estén los otros factores de producción”, (Liebscher, 1895).**

# Ley de los rendimientos decreciente

Propuesta por Mitscherlich, a inicios del siglo 20, fue un avance sobre la ley del mínimo. Ella establece un límite máximo para el rendimiento  $Y$ , el que está dado por la siguiente ecuación resultante de integrar la ecuación diferencial:  $dy/dx = c (A-Y)$

$$Y = A * (1 - 10^{-cx}) \quad [\text{masa} * \text{área}^{-1} * \text{tiempo}^{-1}]$$

donde:

Y: Rendimiento

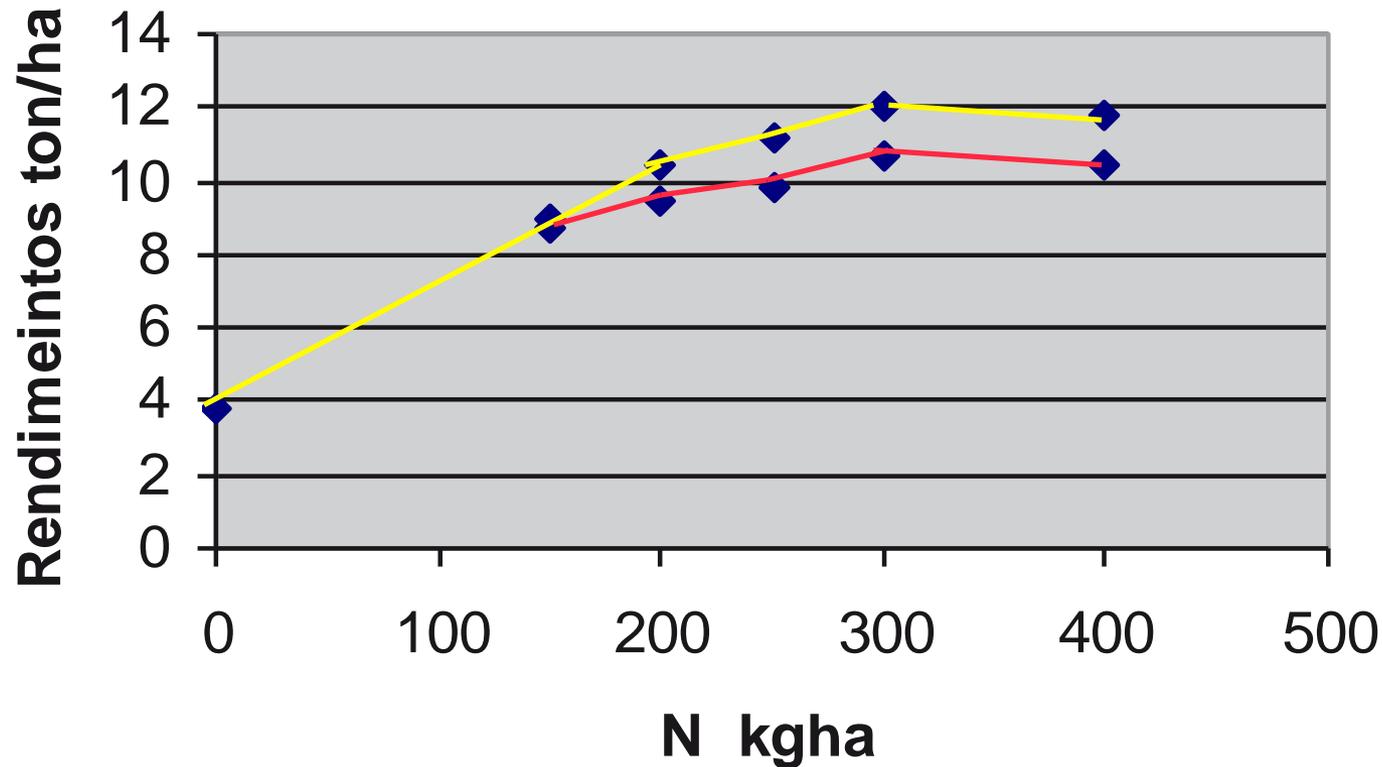
A: Rendimiento máximo posible,

c: constante de proporcionalidad o coeficientes de “actividad” y

x: cantidad del factor cuyo efecto se está determinando

Sin embargo esta ley no expresa el hecho que a altas dosis del factor X se produce una disminución del rendimiento debido a problemas osmóticos, o cambio en su composición química si X es un factor nutricional, o problemas de aireación si se trata del factor agua trata por ejemplo. En la práctica la porción de la curva que mas interesa es la entre 0 y A.

## Rendimientos trigo, vs. dosis crecientes de N y dos dosis P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 240 y 300 kg/ha



En estos resultados podemos ver dos curvas respuestas a dosis crecientes de N: la inferior cuando se aplicó 240 Kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y otra cuando se aplicó 300.

También se puede apreciar que al comienzo de la curva respuesta se cumple la ley del mínimo y a dosis mas altas la ley de rendimientos decrecientes. Igualmente se ve que se cumple la ley del optimo: la respuesta a N es mayor mientras mas cercano al optimo es la situación del P.

Las ecuaciones de la ley del mínimo y de Mistcherlich son simples, de una variable independiente, siendo las primeras establecidos en las ciencias agronómicas. Posteriormente el análisis multivariado proveyó una técnica estadística para establecer funciones de los rendimientos en término de más de una variable las que fueron llamadas “funciones de producción”. El paso

siguiente fueron los:

## MODELOS DE CULTIVOS

Un modelo, en ciencia, es una representación abstracta, conceptual, matemática (ecuación o sistema ecuaciones), de fenómenos, sistemas o procesos o una representación gráfica o física (por ejemplo: mapas, maquetas)

El hecho que las primeras ecuaciones propuestas no consideraran el factor tiempo hizo que los modelos actuales lo incorporen. Ello condujo a los llamados modelos dinámicos que fueron iniciados por de Wit (1965) en Holanda usando la técnica descrita por Forrester en su libro Principles of System (1961,1968).

Los modelos dinámicos, parten por simplificar el sistema modelado.

Esto lo hacen definiendo:

Variables de estado, tasas de procesos, flujos de información y variables externas que tiran el sistema.

## **1.- Variables de estado o niveles.**

Son variables dependientes que nos indican el estado de un sistema en un momento dado: número, superficie o biomasa de las hojas, biomasa o tamaño de los tallos, de las raíces o de los frutos.

## **2.- Tasas de los procesos que definen el estado de las variables de estado.**

Ejemplos: Tasa de fotosíntesis, tasa de respiración, tasa de absorción de minerales etc. Son como válvulas que regulan el flujo de energía o materia hacia o desde la variable de estado.

## **3.- Flujos de información**

Forman circuitos de retroalimentación que pueden modificar las tasas de los procesos

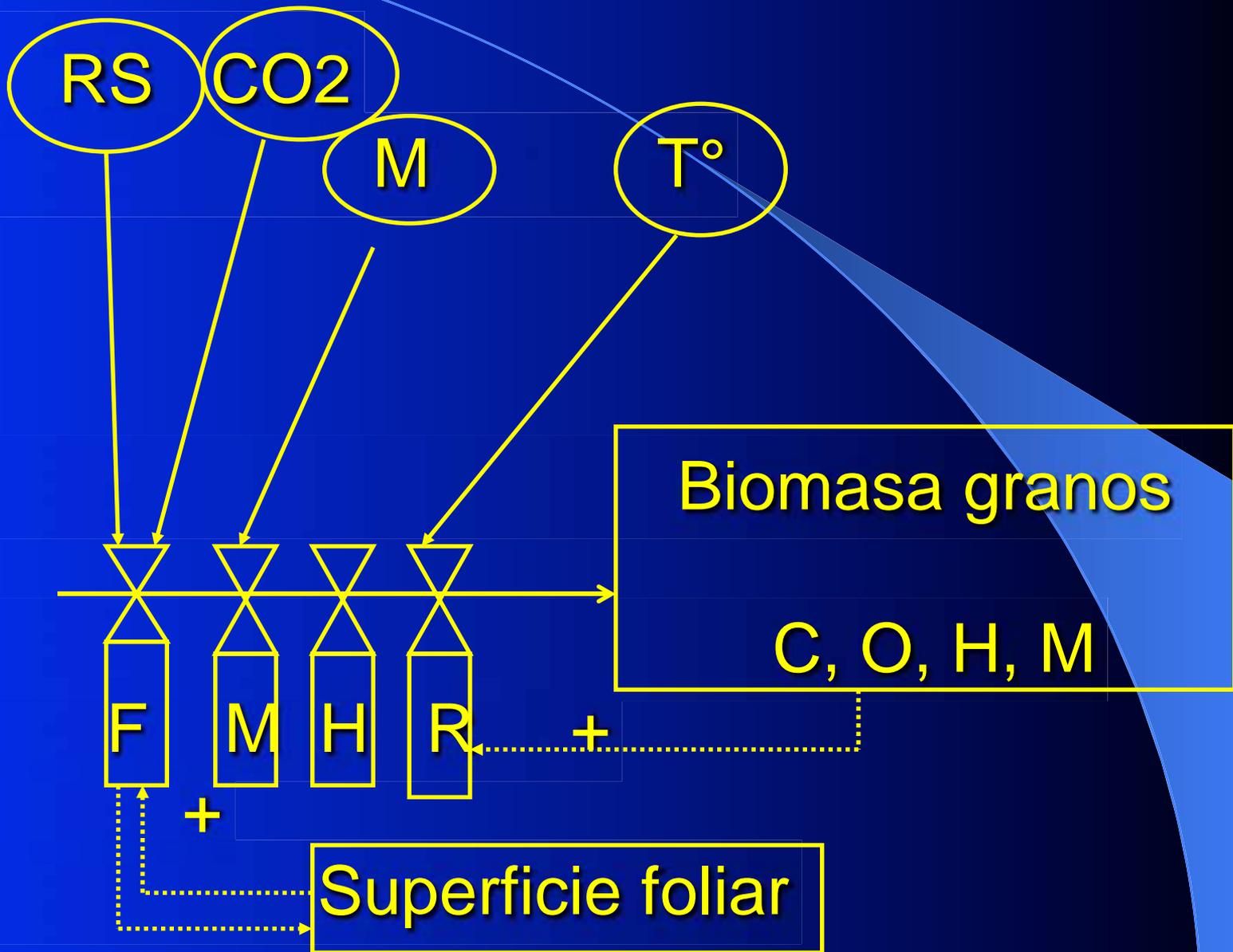
## **4.- Variables externas.**

Son variables del entorno del sistema que lo arrastra: radiación solar, temperaturas, concentración de CO<sub>2</sub> del aire y otras en caso de los cultivos.

En la construcción de un modelo se distingue varias etapas:

Conceptualización del sistema, diagrama de flujo, construcción del algoritmo y validación del modelo.

A continuación se muestra un diagrama simplificado de flujo de un posible modelo de un cultivo donde se muestra como se integran sus elementos.



En diagrama las variables de estado se representan por cuadriláteros  ,  
las tasas por símbolos de válvula   
los flujos de masa por líneas recta  
sólidas, los de información por líneas de  
puntos y las variables externas por  
óvalos 

La biomasa formada por C, O, H y minerales.

F: tasa fotosíntesis determinada por radiación solar, área foliar, apertura estomas, concentración de  $\text{CO}_2$ . Físicamente es un flujo de  $\text{CO}_2$  desde aire a planta, en unidades de masa por unidad de tiempo (m/t).

R : tasa de respiración influida por  $T^\circ$  y biomasa. Se puede visualizar como un flujo de  $\text{CO}_2$  desde la planta al aire

M : tasa de absorción de nutrientes (m/t)

La tasa de incorporación de hidrógeno es igual a 2.16 veces la tasa de F-R dividida por 44 (PM  $\text{CO}_2$ ) ya que dos H se fijan por mole de  $\text{CO}_2$  fijado

Haciendo una suma de las tasas por unidad de tiempo de los procesos que afectan a una variable de estado se construye una ecuación que determina el cambio de esa variable en el tiempo y es llamada ecuación de la diferencia. Si el periodo de tiempo considerado es pequeño, tiende a cero, esa ecuación es llamada una ecuación diferencial

la que al ser integrada entre dos momentos da el estado (peso de granos por ejemplo o superficie foliar o contenido de agua).

La evolución en el tiempo de estas variables representa el comportamiento del cultivo en ese ambiente

Un ejemplo simplificado de este tipo de ecuaciones, que describen el cambio de biomasa de granos (BG), tallos (BT), hojas (BJ) y raíces (BR) de un cultivo en el tiempo y que solo considera los flujos de CO<sub>2</sub>, H y Nutrientes minerales (M), es el siguiente:

$$BG_{(t+1)} = B_{(t)} + (F-R)*Crgr + 2.16*(F-R)*Crgr/44 + M*CrMgr$$

$$BT_{(t+1)} = B_{(t)} + (F-R)*CrTa + 2.16*(F-R)*CrTa/44 + M*CrMTa$$

$$BH_{(t+1)} = B_{(t)} + (F-R)*Crho + 2.16*(F-R)*Crho/44 + M*CrMH$$

$$BR_{(t+1)} = B_{(t)} + (F-R)*Crrai + 2.16*(F-R)*Crrai/44 + M*CrMr$$

El primer termino es el peso inicial del órgano, el segundo el flujo neto de CO<sub>2</sub>, el tercero el flujo de Hidrógeno, el cuarto el de M. Los coeficientes de reparto (CR) varían entre 0 y 1 con la edad de cada órgano. Para saber cuando se inicia y/o termina el crecimiento de un órgano se usa el conocimiento de las sumas de temperaturas del órgano de interés. En el caso de los granos es 0 hasta la cuaja del fruto y después cercano a 1 hasta la madurez. El de las hojas alto después de la emergencia y bajo después de la floración.

Este es un conjunto de ecuaciones que se puede integrar fácilmente en un computador usando técnica numéricas y que constituyen un modelo de un cultivo

Establecidas las ecuaciones el siguiente paso es la construcción de un algoritmo (programa) para resolver el modelo.

Por último, el modelo, debe ser validado lo que se hace usando análisis de sensibilidad, análisis de comportamiento y comparando los resultados que entrega, el modelo, con resultados medidos del sistema real.