

### Summary

*This is a study to determine the water requirements for developing agriculture in the North Pacific region of Costa Rica. When dealing with perennial crops, two agroclimatic models have been designed to simulate the development of soil water reserves, water balance and irrigation.*

*These are recurring models, employed on a daily basis. Figures for daily rainfall and potential evapotranspiration are the climatic input data. Other data include the useful reserve (UR) and the readily usable reserve (RUR). The study seeks to obtain optimum bioclimatic conditions while maintaining a maximum level of evapotranspiration (MET) by means of irrigation.*

*The findings are presented in statistical terms, to facilitate user interpretation.*

### Introducción

Como seres vivientes, las plantas necesitan del agua para producir la materia vegetal y, sobre todo, para asegurar la función de la transpiración. Sus necesidades se manifiestan con una intensidad variable a lo largo de todo su ciclo vegetativo. Las condiciones naturales de abastecimiento en agua (humedad del suelo, cantidad y distribución de las lluvias) no siempre se adaptan a sus exigencias biológicas. Si este abastecimiento es muy débil, la función de la irrigación es aportar los complementos de agua necesarios y suficientes para obtener una buena producción.

El objetivo del presente estudio fue el de analizar la región del Pacífico Norte de Costa Rica, que pre-

senta problemas de sequía, que han ocasionado serias pérdidas en los cultivos. Para el análisis se utilizó un modelo simple, que calcula el balance hídrico teórico del día; además, se empleó un modelo que estima la irrigación a partir de los resultados obtenidos en dicho balance. Para una mejor interpretación de los resultados, estos se presentan en términos estadísticos.

### Materiales y métodos

Se utilizó los datos de nueve estaciones meteorológicas ubicadas en la región físico-geográfica denominada Pacífico Norte o Seco de Costa Rica. Las coordenadas y el número de años de registro de la precipitación para estas estaciones aparecen en el Cuadro 1.

El procesamiento de los datos se realizó en un computador IBM 4331 y el programa fue escrito en FORTRAN IV. Los datos climáticos que sirven de entrada al modelo son: la precipitación pluvial diaria, el brillo solar diario y las temperaturas máxima y mínima diarias, contenidos en el banco de datos agroclimáticos de Costa Rica (3). Con estos últimos datos se estima la evapotranspiración potencial (ETP) por medio de la fórmula de Priestley y Taylor (2). Además, se introducen los valores de la reserva útil del suelo (RU), a partir de la cual se estima la reserva

---

<sup>1</sup> Recibido para publicación el 14 de setiembre de 1985.  
El presente artículo forma parte de los resultados obtenidos por el Proyecto de Agroclimatología del IICA, establecido dentro del marco de Cooperación IICA-ORSTOM (Francia). Se agradece al Dr. Michel Eldin y al Dr. Jean-Paul Lhomme, Especialistas en Agroclimatología del ORSTOM, así como al Dr. Michel Montoya, Director de la Oficina del IICA en Nicaragua, por el apoyo brindado al mismo.

\* Especialista en Agroclimatología  
IICA -- Sede Central, Costa Rica

difícilmente utilizable (RDU). Para este estudio se tomó  $RU = 100 \text{ mm}$  y  $RDU = 0.5 \text{ RU}$ .

### Modelo del balance hídrico teórico

Se utiliza un modelo simple del balance hídrico teórico del día, que simula las interacciones entre la atmósfera, el cultivo y el suelo (1, 4, 5). La ecuación que traduce el balance hídrico en forma diaria se escribe:

$$RH_j = RH_{j-1} + PE_j - ETR_j - D_j$$

donde,

$RH_j$  valor de la reserva hídrica del suelo el día  $j$

$RH_{j-1}$  valor de la reserva hídrica del suelo al día  $j-1$

$PE_j$  precipitación pluvial eficaz el día  $j$

$ETR_j$  evapotranspiración real el día  $j$

$D_j$  drenaje del día  $j$

Esta ecuación sirve como relación recurrente para calcular las reservas hídricas diarias sucesivas

### Aplicaciones del modelo del balance hídrico

1. **Análisis frecuencial de la reserva hídrica del suelo, RH.** Como resultado de este modelo se obtiene una matriz con los niveles diarios de la reserva hídrica del suelo de dimensión  $RH (n, 366)$ , con  $n$  = número de años de registro. Con el propósito de determinar las décadas del año que presentan problemas de sequía, se calcula a partir de la matriz, para cada década, la frecuencia con la cual ocurren diez días consecutivos secos. Se considera un día seco como un día con una reserva hídrica inferior a la reserva difícilmente utilizable (RDU)

2. **Estudio del período de sequía.** Para cada año de registro se determina el número máximo de días consecutivos secos para el o los períodos de sequía; se forma una muestra de tamaño  $n$  y se calculan los siguientes parámetros estadísticos: máximo (MAXI) y mínimo (MINI) de la serie, la mediana (MEDN), el primer (QNT 1) y cuarto (QNT 4) quintiles, la media (MED), la desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV).

3. **Estudio de la diferencia de evapotranspiración.** A partir de la matriz  $DH (n, 366)$ , que contiene los valores diarios de la diferencia entre el nivel de evapotranspiración máxima (ETM) y el de evapotranspiración real (ETR), que representa un déficit hídrico del cultivo, se calcula los parámetros estadísticos anteriormente mencionados.

Esta diferencia se origina cuando el suelo se encuentra insuficientemente provisionado en agua o cuando la planta es fisiológicamente incapaz de asegurar el gasto de agua resultante de la demanda climática; en este momento el régimen de evapotranspiración máxima no se alcanza y la planta se encuentra en régimen de evapotranspiración real, que es menor a ETM ( $ETR < ETM$ ).

El cierre parcial de los estomas reduce el intercambio gaseoso de la planta con la atmósfera y frena su actividad fotosintética. Se admite generalmente que para una especie dada la reducción de los flujos de vapor de agua y de gas carbónico es sensiblemente la misma, resultando que los fenómenos de evapotranspiración y de fotosíntesis aparecen como proporcionales, esto es:

$$\frac{MS_o - MS}{MS_o} = \frac{ETM - ETR}{ETM}$$

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas empleadas en el estudio agroclimático del Pacífico Norte de Costa Rica.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste	Elevación (msnm)	Años de Registro Precipitación
Cañas	10° 25'	85° 05'	95	27
Iladelfia	10° 26'	85° 35'	17	23
Liberia	10° 36'	85° 32'	85	16
Nicoya	10° 05'	85° 27'	120	28
Puntarenas	9° 58'	84° 50'	3	25
Quebrada Grande	10° 51'	85° 30'	366	26
Santa Cruz	10° 16'	85° 35'	54	29
Taboga	10° 21'	85° 09'	40	10
Tilarán	10° 28'	84° 58'	562	28

donde.

MS<sub>O</sub> producción de materia seca durante ETM  
 MS producción de materia seca durante ETR

**Modelo de irrigación**

El objetivo del presente modelo es calcular, para cada año de registro, el número de irrigaciones necesarias para obtener una "optimización bioclimática"; esto significa mantener el nivel máximo de evapotranspiración.

Sin embargo, ello no implica necesariamente una situación óptima desde el punto de vista económico, ya que el producto marginal (PM<sub>g</sub>) resultante de una irrigación puede ser inferior al costo marginal (CM<sub>g</sub>) del agua.

Se continúa con el principio del balance hídrico diario:

$$RH_j = RH_{j-1} + PE_j - ETM_j - D_j$$

pero esta vez en lugar de utilizar ETR<sub>j</sub> se empleará ETM<sub>j</sub>, porque RH va a fluctuar solamente entre RDU y RU.

Se irrigará cada vez que se cumplan las dos condiciones siguientes:

$$\text{Se irriga si } \left\{ RH_j < RDU \right\} \text{ y } \left\{ RH(n,j + 9) < RDU \right\}$$

RH(n,j + 9) representa el valor de la reserva hídrica del día j + 9 y tiene el propósito de contemplar la posibilidad de que la reserva hídrica del día j vuelva a ser superior a RDU, por efecto de una lluvia que caiga en el transcurso de los nueve días siguientes al día j; en este caso es innecesario el riego. Después de cada irrigación, RH<sub>j</sub> tomará el valor máximo que corresponde al de la reserva útil (RH<sub>j</sub> = RU) y se continuará con el balance hídrico.

**Aplicaciones del modelo de irrigación**

1. **Análisis estadístico del número de irrigaciones.**  
 Como resultado del modelo de irrigación se obtiene un vector NI(n), con n = número de años de registro, el cual contiene el número de irrigaciones necesarias por año. A partir de esta muestra se efectúa el análisis estadístico.
2. **Análisis estadístico de la fecha de cada irrigación.**  
 Para cada irrigación se anota el número del día en que el modelo calcula que se debe realizar el riego, obteniéndose una matriz de dimensión FI (n,m), n = años de registro y m = número de irrigaciones

para la estación en el valor de la mediana, pudiéndose calcular de esta manera los parámetros estadísticos para cada fecha de irrigación.

**Resultados y discusión**

**Modelo del balance hídrico teórico**

1. **Análisis frecuencial de la reserva hídrica del suelo.**  
 En la Figura 1 se muestra los resultados obtenidos con el análisis frecuencial para la estación Cañas. Se determina las décadas que presentan problemas de sequía (10 días consecutivos secos, RH < RDU) con una frecuencia alta. Como alta podría considerarse una frecuencia superior a 0.75, o sea que el evento pueda ocurrir tres años de cada cuatro. Además, se aprecia la influencia del fenómeno climático denominado como "canícula" o "veranillo", que afecta al Pacífico Norte de Costa Rica.
2. **Estudio del período de sequía.** En los Cuadros 2 y 3 aparecen los valores para cada parámetro estadístico del número de días consecutivos secos de cada estación meteorológica analizada, tanto para la época seca principal como para el denominado veranillo. Se puede esperar que se presenten en promedio, como mínimo, 127 días consecutivos secos (RH < RDU) en Tilarán y como máximo 170 días en Filadelfia, con una probabilidad de 80% de que ocurran al menos 104 días consecutivos secos en Tilarán y 155 en Filadelfia. Con relación al veranillo, se pueden presentar en promedio siete días consecutivos secos en Tilarán y 21 días como máximo en Cañas.

En el Cuadro 4 se indica, en términos estadísticos, la fecha de inicio de cada período de días consecutivos secos para la principal época seca de la región; esta fecha gira alrededor de la década 33, o sea al comienzo del mes de diciembre (valor de la mediana).

3. **Estudio de la diferencia de evapotranspiración.**  
 Un ejemplo de estos resultados se ilustra con el Cuadro 5. Para cada década del año se indica el valor en décimas de milímetros de la diferencia absoluta de evapotranspiración (ETM-ETR) que, como se ha visto, se puede considerar como un déficit hídrico del cultivo. La evolución a lo largo del año del valor en milímetros de esta diferencia de evapotranspiración se representa en la Figura 1.

En la Figura 2 se presenta los resultados de la diferencia relativa de evapotranspiración en porcentaje para el primer quintil, la mediana y cuarto quin-

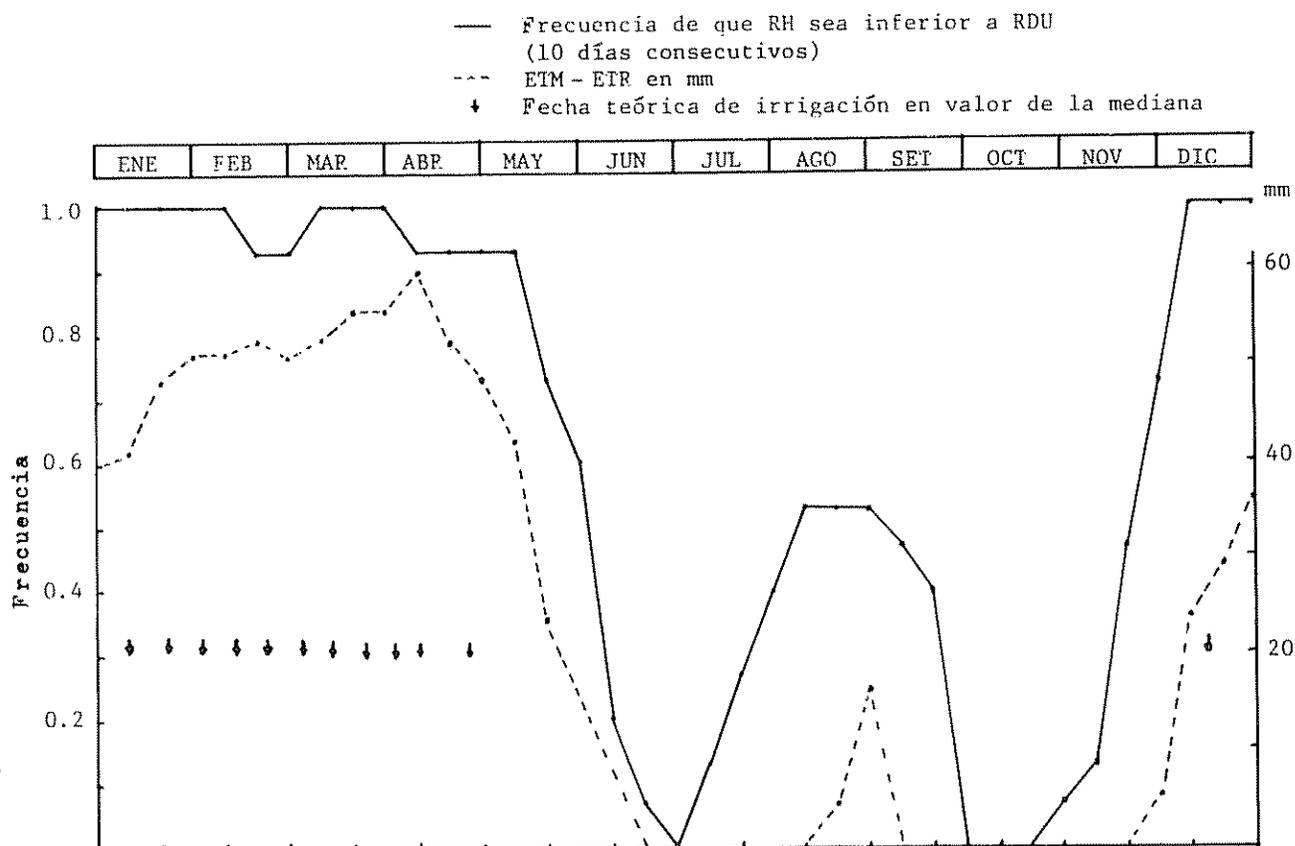


Fig. 1 Reserva hídrica, diferencia de evapotranspiración (ETM-EIR) y fecha teórica de irrigación para la estación Cañas

Cuadro 2. Parámetros estadísticos del número de días consecutivos secos para la región del Pacífico Norte de Costa Rica.

Estación	MINI	QNI 1	MEDN	QNI 4	MAXI	MED	DE	CV
Cañas	77	154	169	188	195	166	29	0.18
Filadelfia	133	155	174	186	200	170	19	0.11
Liberia	120	137	174	187	202	165	26	0.16
Nicoya	85	121	152	164	171	145	23	0.16
Puntarenas	96	132	170	182	192	158	28	0.18
Quebrada Grande	89	135	155	174	281	158	37	0.23
Santa Cruz	90	131	169	175	200	159	27	0.17
Taboga	88	109	147	171	177	142	29	0.21
Tilarán	70	104	131	153	169	127	27	0.21

til. Resalta, para la estación Cañas, el hecho de que pueda ocurrir, un año de cada cinco, una reducción en la producción de materia seca de hasta un 40% durante el período de canícula (julio-agosto-setiembre). Esto último si se admite la proporcionalidad entre el nivel de evapotranspiración y la tasa fotosintética

### Modelo de irrigación

1. Análisis estadístico del número de irrigaciones. El número de irrigaciones teóricas que calcula el modelo de irrigación se presenta en el Cuadro 6. Se puede apreciar que se propone, en promedio, como mínimo seis riesgos en Tilarán y como máxi-

Cuadro 3. Parámetros estadísticos del número de días consecutivos secos dentro del “veranillo” para la región del Pacífico Norte de Costa Rica.

Estación	MINI	QNT 1	MEDN	QNT 4	MAXI	MED	DE	CV
Cañas	0	0	22	38	46	21	16	0.77
Filadelfia	0	4	13	20	33	12	9	0.76
Liberia	0	7	14	18	66	17	17	1.01
Nicoya	0	0	2	9	26	5	7	1.38
Puntarenas	0	5	18	29	56	19	14	0.74
Quebrada Grande	0	0	9	19	75	14	21	1.47
Santa Cruz	0	0	13	25	54	15	14	0.92
Taboga	3	3	13	36	39	18	14	0.78
Tilarán	0	0	3	19	23	7	9	1.23

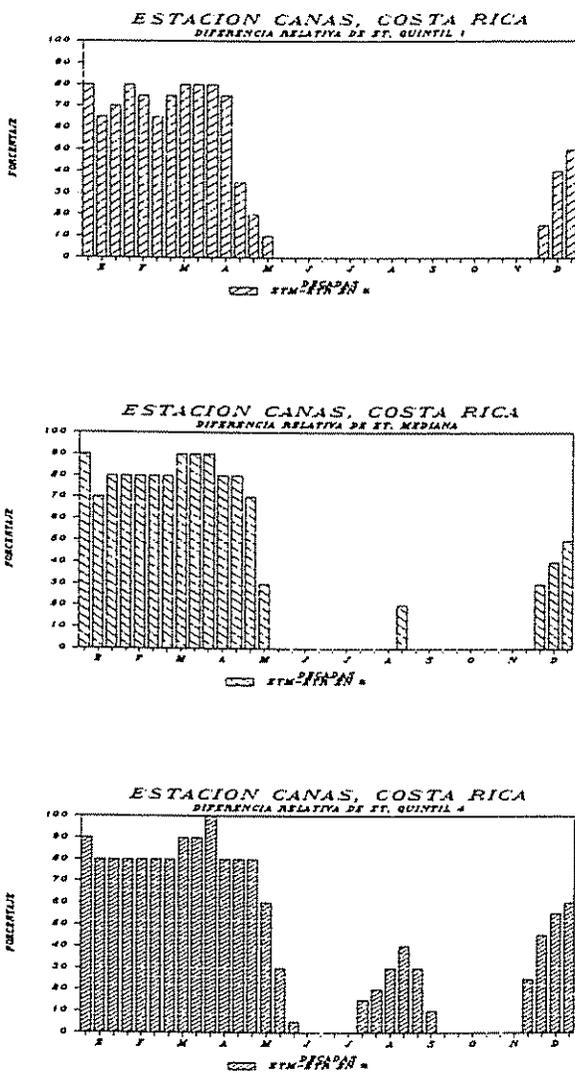


Fig. 2. Diferencia relativa de evapotranspiración en porcentaje, primer quintil, mediana y cuarto quintil Cañas, Costa Rica

mo trece para Filadelfia y Liberia. Conociendo que RH toma el valor de RU cuando el modelo propone cada riego, se derivaron los resultados que aparecen en el Cuadro 7. Si se analiza el primer quintil se observa que existe una probabilidad de un 80% de que el déficit hídrico teórico en el suelo sea superior a 200 mm en Tilarán y como máximo 600 mm en Liberia. Esto equivale a un déficit de 2000 y 6000 m<sup>3</sup> de agua por hectárea respectivamente.

Estos últimos resultados se ilustran en la Figura 3, en la que se observa la distribución espacial del déficit teórico en la región del Pacífico Norte (en valor promedio).

2. Análisis estadístico de la fecha de cada irrigación. Para la estación Cañas, en el Cuadro 8 se encuentran los parámetros estadísticos para la fecha de cada irrigación. Sin embargo, hay que señalar que solamente las primeras irrigaciones contarán con el número total de años de la muestra y que, a partir del valor mínimo que aparece en el Cuadro 6, el tamaño de la muestra se reduce, por lo que para las últimas fechas el valor obtenido puede presentar incoherencias. Además, cada fecha de cada irrigación debe ser analizada en forma independiente.

En la Figura 1 se indica, con una flecha, el momento en que se debe hacer cada irrigación, si considera el valor de la mediana.

**Conclusiones**

Existe un 80% de probabilidad de que ocurra un déficit hídrico teórico superior a los 450 mm en el Pacífico Norte, si se exceptúa la estación de Tilarán, donde a la probabilidad 0.8 el déficit alcanza solamente el valor de 200 mm. Para superar dicho déficit el modelo de irrigación propone en promedio de 10 a

Cuadro 4. Parámetros estadísticos de la fecha de inicio del periodo de días consecutivos secos para la época seca principal del Pacífico Norte de Costa Rica.

Estación	MINI	QNI 1	MEDN	QNI 4	MAXI	MED	DE	CV
Cañas	303	314	323	330	331	322	8	0 02
Filadelfia	307	311	325	328	346	322	11	0 03
Liberia	1	313	325	333	334	293	98	0 33
Nicoya	1	316	332	346	359	298	106	0 36
Puntarenas	1	323	334	340	364	311	87	0 28
Quebrada Grande	1	315	332	344	353	287	117	0 41
Santa Cruz	308	318	328	337	359	330	14	0 04
Taboga	1	323	336	340	349	302	101	0 33
Tilarán	1	1	341	359	364	236	159	0 67

Cuadro 5. Parámetros estadísticos de la diferencia absoluta de evapotranspiración (ETM - ETR) por década para la estación Cañas, Costa Rica con RU = 100 mm (en décimas de mm).

MINI	AN	QNI 1	MEDN	QNI 4	MAXI	AN	MED	DE	CV
133	60	369	410	424	427	70	387	71	0 18
334	60	423	475	480	480	69	454	42	0 09
458	60	475	510	510	510	74	496	18	0 04
275	65	490	510	510	510	74	477	74	0 16
47	65	493	530	530	530	74	478	128	0 27
45	65	428	510	510	510	74	447	133	0 30
101	65	483	530	530	530	74	484	109	0 22
374	65	525	560	560	560	74	537	50	0 09
433	65	522	560	560	560	74	541	33	0 06
308	68	503	591	600	600	74	551	85	0 15
0	61	470	529	530	530	74	457	157	0 34
131	72	257	493	510	510	74	413	142	0 34
0	62	148	422	509	520	66	336	183	0 54
0	60	95	231	392	418	68	241	140	0 58
0	61	0	7	228	360	68	105	124	1 18
0	61	0	0	52	262	66	39	78	2 02
0	60	0	0	0	39	71	4	12	2 59
0	60	0	0	0	15	71	1	4	3 74
0	60	0	0	2	28	72	3	7	2 53
0	60	0	0	57	165	72	30	56	1 85
0	60	0	0	129	274	69	51	90	1 76
0	60	0	3	140	323	73	58	94	1 62
0	60	0	39	190	382	73	90	120	1 33
0	60	0	166	247	356	70	126	123	0 98
0	60	0	0	196	270	69	78	105	1 35
0	60	0	0	83	276	68	43	72	1 68
0	60	0	0	9	65	73	7	17	2 34
0	60	0	0	0	0	74	0	0	****
0	60	0	0	0	0	74	0	0	****
0	60	0	0	0	1	68	0	0	3 74
0	60	0	0	2	80	73	10	24	2 50
0	60	0	1	35	186	74	26	49	1 90
0	63	0	51	186	231	74	81	85	1 05
9	64	120	228	306	351	74	202	100	0 49
145	60	263	297	358	376	74	296	64	0 21
237	60	315	349	373	393	74	343	37	0 11
208	60	374	410	418	424	74	391	53	0 13

Cuadro 6. Número de irrigaciones teóricas con  $RU = 100$  mm para la región del Pacífico Norte de Costa Rica.

Estación	MINI	QNT 1	MEDN	QNT 4	MAXI	MED	DE	CV
Cañas	7	9	12	13	14	11	2	0.17
Filadelfia	11	11	13	14	15	13	1	0.10
Liberia	12	12	13	15	16	13	1	0.10
Nicoya	5	9	10	11	12	10	2	0.18
Puntarenas	9	10	11	13	14	11	2	0.15
Quebrada Grande	5	8	10	12	19	10	3	0.29
Santa Cruz	8	11	12	13	16	12	2	0.15
Taboga	9	9	11	12	15	11	2	0.16
Tilarán	2	4	6	8	11	6	2	0.38

Cuadro 7. Déficit hídrico teórico acumulado en mm para la región del Pacífico Norte de Costa Rica con  $RU = 100$  mm.

Estación	MINI	QNT 1	MEDN	QNT 4	MAXI	MED	DE	CV
Cañas	350	450	600	650	700	550	2	0.17
Filadelfia	550	550	650	700	750	650	1	0.10
Liberia	600	600	650	750	800	650	1	0.10
Nicoya	250	450	500	550	600	500	2	0.18
Puntarenas	450	500	550	650	700	550	2	0.15
Quebrada Grande	250	400	500	600	950	500	3	0.29
Santa Cruz	400	550	600	650	800	600	2	0.15
Taboga	450	450	550	600	750	550	2	0.16
Tilarán	100	200	300	400	550	300	2	0.38

13 riesgos de  $500 \text{ m}^3$  de agua por hectárea Sobresale la región de Liberia al presentar un déficit del orden de los 600 mm, con una probabilidad de 0.8 de ser superado

La época seca principal se inicia entre la década 32 y 33, o sea a inicios del mes de diciembre, para la mayor parte de las estaciones analizadas

Existe una probabilidad de 0.8 de que esta época contenga más de 100 días secos consecutivos ( $RH < RDU$ ) para toda la región. A esta misma probabilidad (80%) para Filadelfia, se puede esperar al menos 155 días consecutivos secos y que se sobrepasen los 186 días secos, dos años de cada diez (20%).

Con relación al veranillo, éste no presenta gran significado a la probabilidad 0.8, pero sí a la de 0.2, o sea que un año de cada cinco el "veranillo" puede tomar importancia al incidir negativamente en la producción agrícola, sobre todo para las estaciones Cañas, Puntarenas, Taboga, Liberia y Santa Cruz

Se hace necesario recordar que el modelo ha sido aplicado al caso de un cultivo perenne, y que si se

desea referirse al caso particular de un cultivo anual será necesario considerar la fecha de siembra y de cosecha, y lo que es más importante, la variación de la ETM según el estado vegetativo del cultivo, o sea la variación del coeficiente de cultivo (k).

Por otra parte, con relación al modelo de irrigación propuesto, habrá que tomar en cuenta variables de tipo socioeconómico, porque no todos los aportes de agua tienen la misma influencia sobre la producción total. Estos aportes, por lo tanto, no tendrán el mismo valor en un sentido económico, por lo cual algunos de ellos podrían ser suprimidos.

Es necesario abordar lo que los economistas llaman "la teoría del costo de oportunidad", para seleccionar el cultivo que mejor se adapte desde el punto de vista no solamente bioclimático sino también económico, para cada región analizada.

### Resumen

En este estudio se establece los requerimientos hídricos necesarios para el desarrollo de la agricultura en el Pacífico Norte de Costa Rica. Se utiliza

Cuadro 8. Parámetros estadísticos de la fecha teórica de irrigación para la estación Cañas, Costa Rica.

MINI	QNT 1	MEDN	QNT 4	MAXI	MED	DE	CV
2	3	7	11	16	7	4	0.53
15	15	21	23	38	21	6	0.27
26	27	32	37	82	36	14	0.38
37	38	43	51	92	47	13	0.28
48	51	55	64	102	59	13	0.22
59	63	66	75	343	86	69	0.80
70	74	78	85	357	97	70	0.72
74	83	91	103	333	107	61	0.57
84	93	101	114	361	118	66	0.56
94	101	106	236	324	156	94	0.60
104	114	126	354	357	226	116	0.52
114	127	347	357	365	267	107	0.40

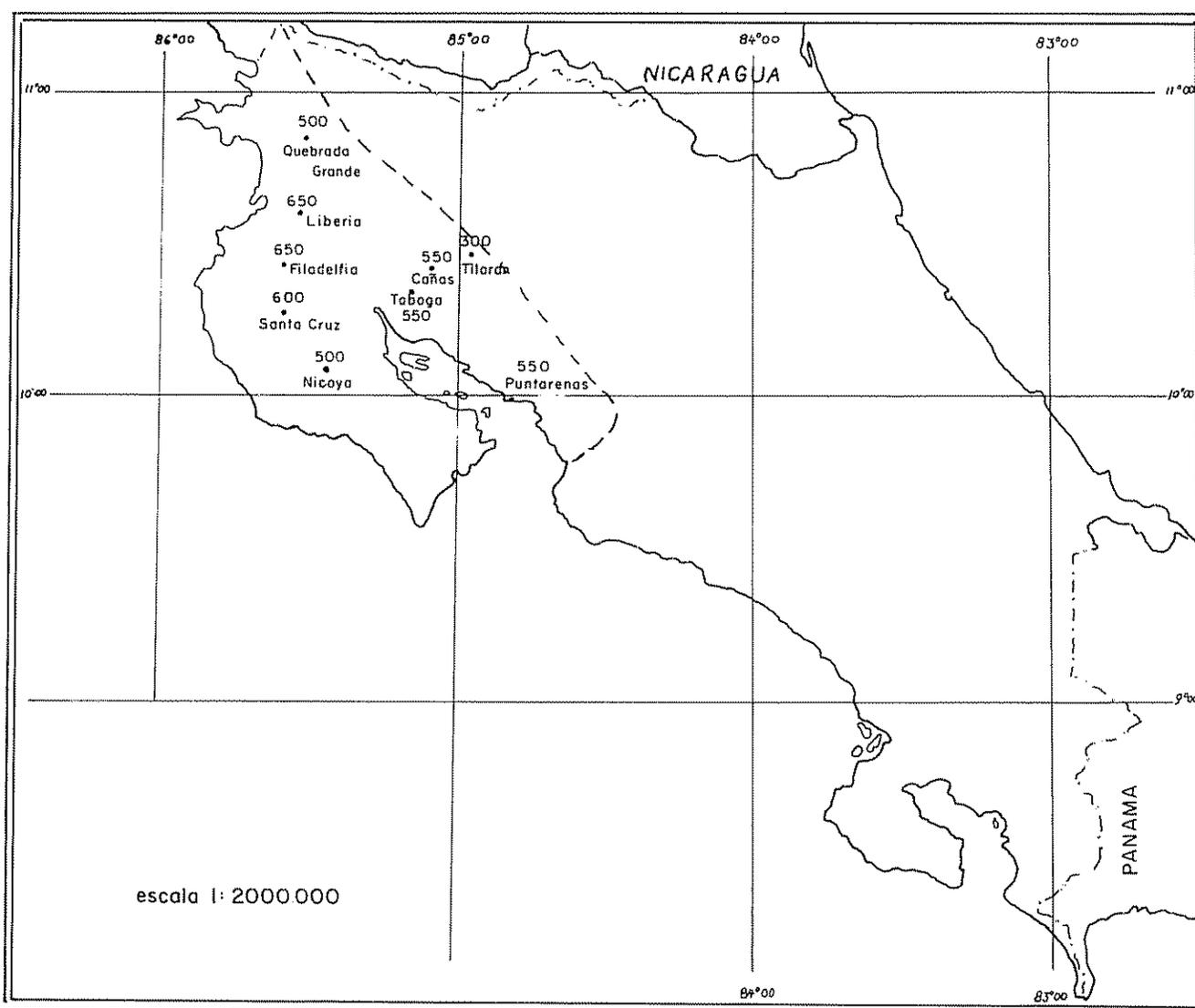


Fig. 3 Déficit hídrico teórico en mm (valor promedio). Costa Rica – Pacífico Norte.

dos modelos agroclimáticos (balance hídrico e irrigación), que simulan la evolución de la reserva hídrica del suelo, si se considera un cultivo perenne

Los modelos son recurrentes y funcionan con un paso de tiempo de un día. Los datos climáticos que sirven de entrada son los datos diarios de la lluvia y los valores de la evapotranspiración potencial. Además, intervienen los valores de la reserva útil (RU) y de la reserva fácilmente utilizable (RFU). Se intenta una "optimización bioclimática" por medio del riego, manteniendo el nivel máximo de evapotranspiración ETM.

Los resultados son presentados en términos estadísticos, con el afán de facilitar su interpretación.

#### Literatura citada

1. LHOMME, J.P.; GOMEZ, L.; JARAMILLO, A.: 1984. Modelo matemático del balance hídrico Turrialba, 34(4):503-507

2. PRIESTLEY, C.; TAYLOR, P.A. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2):81-92.

3. ROJAS, O., ELDIN, M.; LHOMME, J.P. 1982. Información del banco de datos agroclimáticos de Costa Rica IICA-ORSTOM-IMN San José, Costa Rica 7 volúmenes snp.

4. ROJAS, O.E. 1984. Etude agrométéorologique du bilan hydrique théorique et essai de modélisation d'irrigation dans le Sud-Ouest de la France. INA, Paris-Grignon, France, 74 p.

5. ROJAS, O.E. 1985. Estudio de las condiciones hídricas del Pacífico Norte de Costa Rica IICA, Serie Publicaciones Misceláneas No. 546, San José, Costa Rica, 73 p.

## Notas y comentarios

### Empleo de cloroplastos para incrementar la fotosíntesis

No hay duda que inmensas utilidades esperan a cualquier empresa biotecnológica que pueda crear cultivos que crezcan más rápido, necesiten menos fertilizante o sean resistentes a las plagas y a los herbicidas.

Hasta ahora la mayor parte de la investigación en este campo se ha enfocado en modificar genes del núcleo de las células vegetales. Pero los pequeños cloroplastos verdes, situados fuera del núcleo, tienen sus propios y distintivos genes. Los genes de los cloroplastos son interesantes, tanto científica como comercialmente, porque los cloroplastos son los responsables por el más obvio carácter que distingue a la planta de los animales... el proceso de la fotosíntesis.

Ahora, Marc De Block, Jeff Schell y Marc van Montague, del Laboratorium voor Genetica, en Gent, Bélgica, han encontrado una manera de manipular los

genes del cloroplasto (*European Molecular Biology Organization Journal* vol. 4, p. 1367).

El DNA dentro del cloroplasto codifica las proteínas vitales que las plantas emplean para cosechar la energía de la luz y construir carbohidratos y otras moléculas que son esenciales para un crecimiento vigoroso. En una reunión sobre "Nueva Tecnología en Biotecnología", que tuvo lugar en Londres, en julio de 1985, Jeff Schell dijo a los delegados que "uno puede ahora comenzar a inactivar genes específicos de cloroplastos y preguntarles lo que pueden hacer".

El proceso seguido por De Block y colegas es bastante complejo. A grandes rasgos, consiste en conseguir células vegetales (en este caso de tabaco) con una característica muy especial (en este caso, resistencia al antibiótico cloramfenicol) y llevar el gen de esta resistencia a su nuevo hogar. El más popular vector empleado por ingenieros genéticos es un anillo pequeño de DNA, llamado el plasmidio Ti ("tumor inducing") proveniente de la bacteria *Agrobacterium tumefaciens*. El problema de transferencia de genes a los cloroplastos es complicado, pero el grupo consiguió vencer la serie de obstáculos que se presentó.

El grupo se dedicó entonces al gen del cloroplasto que codifica una subunidad de una enzima llamada ribulosa bifosfato carboxilasa, abreviada como "rubisco". El rubisco cataliza la reacción que convierte el dióxido de carbono atmosférico en compuestos orgánicos. Tan importante es el rubisco que puede constituir más de la mitad del contenido de proteínas de la hoja; es probablemente la proteína más abundante en la naturaleza.

El trabajo de De Block ofrece a los biotecnólogos la oportunidad de introducir en los cloroplastos un rubisco modificado, presumiblemente codificando una enzima más eficiente.

Es también muy oportuno estudiar ahora una segunda función del rubisco. Además de fijar el dióxido de carbono, el rubisco está involucrado en un proceso conocido como fotorespiración. Al contrario de la respiración, de la que los animales dependen para vivir, nadie entiende completamente la función de la fotorespiración o por qué ha evolucionado en las plantas. En realidad, la peculiaridad de las plantas de no "respirar" como los animales se hizo familiar, hace más de un siglo, cuando Nathaniel Ward en los ochocientos treinta ideó las cajas cerradas con vidrios (las cajas wardianas) en las que las plantas crecían, en un sistema cerrado, sin gastar agua ni aire, lo que permitió el transporte masivo por mar de plantas vivas, desde el sudeste de Asia y de Australia hasta los jardines botánicos de Inglaterra (K. Lemmon, *The Golden Age of Plant Hunters*, London, 1968).

Si el rubisco pudiese ser modificado en tal forma que ya no interviniese en la fotorespiración y siempre continuase trabajando en sus funciones fotosintéticas, el crecimiento de la planta podría ser aumentado.

Algunos indicios de cómo crear plantas que no "desperdicien" energía en la fotorespiración puede venir de las llamadas plantas C4. Para las plantas, el primer paso para construir los carbohidratos es incorporar al dióxido de carbono de la atmósfera

pequeñas moléculas orgánicas. Las plantas C4, que incluyen a la caña de azúcar y al maíz, por ejemplo, convierten el dióxido de carbono en un compuesto de cuatro carbonos, llamado oxaloacetato. Las plantas C3, donde se encuentran la mayoría de las plantas de clima templado, en contraste, fabrican el compuesto de tres carbonos, fosfoglicerato a partir del dióxido de carbono atmosférico. Una diferencia particularmente interesante entre los dos tipos es que las plantas C4 gastan mucho menos energía en la fotorespiración que las plantas C3. La fotorespiración en plantas C3 puede ser suprimida reduciendo la cantidad de oxígeno en su ambiente, y esto resulta en un crecimiento considerablemente más rápido (lo que podría explicar el éxito de las cajas wardianas). Obviamente, es impráctico alterar el contenido de oxígeno del aire en que crecen las plantas, pero quizás las plantas C3 pueden hacerse capaces de adquirir las mañas que las plantas C4 parecen emplear tan eficientemente.

La manipulación de cloroplastos también podría conseguir plantas resistentes a los herbicidas. Muchos de los herbicidas ampliamente usados atacan a proteínas específicas en los cloroplastos. Uno de esos herbicidas, atrazina, se liga a una proteína del cloroplasto llamada QBeta, una proteína esencial en el proceso fotosintético. Científicos de Michigan y de Cambridge han descubierto que un simple cambio de una base en el gen QBeta (el cambio de un simple nucleótido) puede dar lugar a una proteína resistente a la atrazina.

Pero, tengamos en cuenta que la ingeniería genética práctica es, por supuesto, muy diferente a la teórica. Los problemas de colocar un gen modificado en el preciso sitio del cloroplasto, en el que no vaya a perturbar el resto de los procesos celulares, son enormes. Pero los científicos siguen intentando, con gran ahinco, obtener resultados prácticos de la ingeniería genética. Esperemos que tengan éxito en bien del aumento de la productividad de la agricultura mundial. Adalberto Gorbitz.