

UNA CONTRIBUCION A LA METODOLOGIA DE
LA ZONIFICACION ECOLOGICA DE
CULTIVOS ANUALES

Tesis de Grado

Magister Scientiae

Javier García Benavides



INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro Tropical de Enseñanza e Investigación
Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales
Turrialba, Costa Rica
Octubre, 1972

UNA CONTRIBUCION A LA METODOLOGIA DE
LA ZONIFICACION ECOLOGICA
DE CULTIVOS ANUALES

Tesis

Sometida al Consejo de la Escuela para Graduados como
requisito parcial para optar al grado de


Magister Scientiae

en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

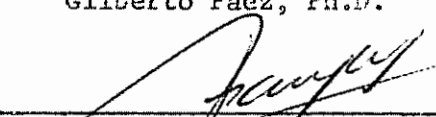
Permiso para su publicación, reproducción total o
parcial, debe ser obtenido en dicho Instituto

APROBADA:




Gilberto Páez, Ph.D.

Consejero



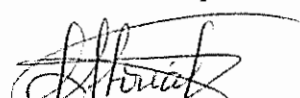
José Fargas, Ph.D.

Comité



Waldemar Albertin, Ph.D.

Comité



Jorge Soria, Ph. D.

Comité

Octubre, 1972

A mis padres, ejemplos de trabajo, dedicación
sobriedad y espíritu de sacrificio

AGRADECIMIENTO

Dejo constancia de mi agradecimiento

A J. Michel Montoya, D.Sc.B., compañero de trabajo y proyectos, quien realizó los trámites de mi contratación.

A Francisco Morillo, Ph.D. y demás funcionarios del Ministerio de Agricultura y Cría de Venezuela, a quienes debo la concesión del permiso correspondiente.

A Víctor Quiroga, H.S., Manuel Zamora, Asistente en Computación, Jorge Montoya Arce, Asistente en Meteorología y Emilio Ortíz, Dibujante, por su espontánea y franca colaboración.

BIOGRAFIA

El autor, de nacionalidad venezolana, nació en La Coruña, España, el 25 de diciembre de 1942, residiendo en Venezuela desde 1958.

Los estudios secundarios los realizó en su ciudad natal. Cursó estudios superiores en la Universidad Central de Venezuela; Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, graduándose en la especialidad de Hidrología y Meteorología en mayo de 1964.

De 1965 a 1970 cursó estudios en la misma Universidad en la Facultad de Agronomía.

En enero de 1965 ingresó al Centro de Investigaciones Agronómicas del Ministerio de Agricultura y Cría como Hidrometeorólogo de la Sección de Meteorología Agrícola.

En setiembre de 1970 fue contratado por la Zona Norte del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas y destinado a Turrialba, Costa Rica.

De octubre de 1970 a octubre de 1971 desempeñó el cargo de Agroclimatólogo del Proyecto de Zonificación de Cultivos Básicos para el área Centroamericana y Panamá y adscrito al Departamento de Cultivos y Suelos Tropicales del IICA-CTEI.

Hasta mayo de 1972 estuvo encargado del Proyecto de Zonificación de cultivos potencialmente exportables del área Centroamericana y Panamá.

Realizó sus estudios de Postgrado en la especialidad de Cultivos Tropicales y Ecología de Cultivos para optar al título de Magister Scientiae en el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, Turrialba, Costa Rica, de enero 1971 a octubre 1972.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITEPATUPA	3
2.1 La naturaleza de las zonificaciones ecológicas de cultivos	3
2.2 Antecedentes de Zonificación Ecológica de Cultivos en el Trópico	7
2.3 Algunas relaciones clima-rendimiento.....	10
3. MATERIALES Y METODOS	12
3.1 La agroclimatología y las consideraciones agro- nómicas de los regímenes hídrico, tér- mico y fotoperiódico	12
3.1.1 El régimen hídrico	12
3.1.2 El régimen térmico y fotoperiódico y sus influencias sobre el rendimiento	16
3.2 Variables climáticas y agroclimáticas, clasifica- ción general	19
3.3 Esquema Metodológico General Empleado por el IICA en sus Proyectos de Zonificación	21
3.4 Esquema Metodológico Ampliado	22
3.4.1 El primer nivel de precisión agroclimática ..	23
3.4.2 El segundo nivel de precisión agroclimati- ca	23
3.4.3 El tercer nivel de precisión agroclimática ..	24
3.5 Alcances de los distintos niveles de precisión del Esquema Metodológico Ampliado	24
3.5.1 Alcance del primer nivel	25
3.5.2 Alcance del segundo nivel	26
3.5.3 Alcance del tercer nivel	27
3.6 Posibles combinaciones entre niveles (N) y aproximaciones (A)	28
3.7 Etapas que comprende el esquema metodológico	28
3.7.1 Primera etapa: Definición de los requeri- mientos agroecológicos de los cultivos ..	28
3.7.2 Segunda etapa: Estimación de elementos meteorológicos para el área en estudio ..	29
3.7.3 Tercera etapa: Análisis agroclimático	30
3.7.4 Cuarta etapa: Análisis de variables fi- sioedáficas	31
3.7.5 Quinta etapa: Elaboración de mapas de componentes	32

3.7.5.1	Mapas de variables térmicas	32
3.7.5.2	Mapas de variables hídricas	32
3.7.5.3	Mapas de combinación de variables ..	32
3.7.5.4	Mapas de variables fisioedáficas ..	32
3.7.6	Sexta etapa: Síntesis cartográfica sucesiva	32
3.7.7	Séptima etapa: Presentación de resultados ...	33
3.8	Sistema de operación de las distintas etapas. El camino crítico	34
3.9	Descripción del material de investigación	35
3.10	Zonificación de área (segunda aproximación - primer nivel de precisión)	38
3.10.1	Requerimientos agroecológicos del cultivo. Primera etapa	38
3.10.1.1	Respuesta fotoperiódica	38
3.10.1.2	Respuesta térmica	39
3.10.1.3	Respuesta hídrica	41
3.10.1.4	Respuesta edáfica	42
3.10.2	Estimación de elementos meteorológicos necesarios para el análisis agroclimático. Segunda etapa.....	43
3.10.2.1	Estimaciones térmicas	43
3.10.2.2	Estimaciones de humedad relativa ..	48
3.10.3	Análisis agroclimático. Tercera etapa	51
3.10.4	Análisis fisioedáfico. Cuarta etapa	54
3.10.5	Elaboración de mapas de componentes: Quinta etapa	55
3.10.5.1	Mapas hídricos	57
3.10.5.2	Mapa térmico	58
3.10.5.3	Mapas de variables fisioedáficas ..	58
3.10.6	Síntesis cartográfica. Sexta etapa	58
3.11	Zonificación de línea (Segunda aproximación - segundo nivel de precisión)	60
3.11.1	Ampliación de la tercera etapa	60
3.12	El análisis de factores múltiples 'Factor Analysis' como método de zonificación (segunda aproximación - segundo nivel de precisión) ..	62
3.12.1	Pasos y cálculos a realizar	63
3.13	Zonificación de punto (tercer nivel de precisión agroclimática)	64
3.13.1	Escogencia de las variables agroclimáticas ..	66
3.13.2	El balance hídrico en el tercer nivel de precisión	69
3.13.3	Criterios para detectar la normalidad en el cálculo de probabilidades	72
4 .	RESULTADOS	74

4.1	Zonificación de área. (Primera aproximación - primer nivel de precisión)	74
4.1.1	Primera etapa. Índices agroecológicos del cultivo	74
4.1.1.1	Índices térmicos	74
4.1.1.2	Índices hídricos	74
4.1.2	Segunda etapa. Estimados de elementos meteorológicos	75
4.1.2.1	Estimados térmicos	75
4.1.2.2	Estimados de humedad relativa	79
4.1.3	Tercera etapa. Estimados derivados del análisis agroclimático	84
4.1.4	Cuarta etapa. Jerarquización de las categorías de uso potencial de la tierra	90
4.1.5	Quinta etapa. Mapas finales	90
4.2	Zonificación de línea (segunda aproximación - segundo nivel de precisión)	94
4.2.1	Representación cartográfica	100
4.2.1.1	Mapa de suelos	100
4.2.1.2	Mapas de variables agroclimáticas. Mapa final	100
4.2.1.3	Mapas adicionales	103
4.2.2	Identificación de las áreas por un índice de sitio	105
4.3	El análisis de factores múltiples (Factor Analysis (segunda aproximación - segundo nivel)	106
4.3.1	Matrices de correlación	108
4.4	Zonificación de punto (tercer nivel de precisión agroclimática)	113
4.4.1	Variables complementarias	113
4.4.1.1	Temperatura	113
4.4.1.2	Transcurso de la precipitación mensual durante el ciclo	113
4.4.1.3	Número de días con lluvia y promedio de agua caída en cada día con lluvia en mm	115
4.4.1.4	Concordancia de las precipitaciones en ambas localidades	115
4.4.1.5	Fechas de ocurrencia del primero y segundo grupo de lluvias para el ciclo (mayo-setiembre)	117
4.4.2	Variables agroclimáticas	117
4.4.2.1	Balance hídrico	117
4.4.2.2	Magnitud de la deficiencia promedio de los períodos con deficiencia durante el ciclo del cultivo ...	123

	<u>Página</u>
4.4.2.3	Número de períodos con deficiencia en el ciclo 123
4.4.2.4	Número de períodos con deficiencia >10 mm en el ciclo 124
4.4.2.5	Valor promedio de los coeficientes de variación para los valores de deficiencia dentro de cada mes 125
4.4.2.6	Probabilidad de obtener distintas magnitudes de deficiencia 126
4.4.2.7	Deficiencias totales promedio para el período de floración 127
4.4.2.8	Deficiencias totales para el ciclo del cultivo 128
4.4.2.9	Magnitud del exceso promedio de los períodos con exceso durante el ciclo del cultivo .. 128
4.4.2.10	Número de períodos con exceso en el ciclo 129
4.4.2.11	Número de períodos con exceso mayores de 30 mm en el ciclo .. 129
4.4.2.12	Valor promedio de los coeficientes de variación para los valores de exceso 130
4.4.2.13	Probabilidad de obtener distintas magnitudes de exceso 130
4.4.2.14	Excesos totales promedio para el período de floración 130
4.4.2.15	Excesos totales para el ciclo del cultivo 133
4.4.2.16	Almacenajes de agua en el ciclo del cultivo 133
4.4.3	Jerarquización de las variables agroclimáticas e índices relacionados con los rendimientos 134
5.	DISCUSION 137
6.	CONCLUSIONES 143
7.	RESUMEN 145
7a.	SUMMARY 147
8.	LITERATURA CITADA 149

LISTA DE CUADROS

Cuadro No.		<u>Página</u>
1	Esquema de clasificación general de variables	21
2	Acontecimientos del proyecto, tiempos estimados, fechas mínimas y máximas de entrega y margen para cada actividad de acuerdo al PERT	37
3	Indices agroclimáticos que corresponden a la intensidad de la humedad y la sequía para <u>Phaseolus vulgaris</u>	42
4	Texturas de suelo y pH indicados como óptimos para el cultivo del frijol	43
5	Ubicación geográfica y algunos índices climáticos y agroclimáticos de las estaciones en estudio	45
6	Localización, altura sobre el nivel del mar, humedad relativa, precipitación y duración de la estación seca, de las estaciones consideradas	50
7	Indices térmicos considerados para los estudios de la zonificación del frijol <u>Phaseolus vulgaris</u>	74
8	Indices agroclimáticos que corresponden a la intensidad de la humedad y la sequía para <u>Phaseolus vulgaris</u> considerados para Costa Rica	75
9	Ecuaciones de estimación térmica según las dos técnicas empleadas	76
10	Comparación de las temperaturas observadas y estimadas por cada una de las técnicas y eficiencia relativa de las mismas	77
11	Relaciones entre la precipitación mensual y la humedad relativa para cada una de las estaciones consideradas	80
12	Comparación de los valores de humedad relativa observados y estimados	83

Cuadro No.		<u>Página</u>
13	Valores que alcanzan las distintas variables detectadas con el segundo nivel de precisión agroclimática para las localidades en estudio	85
14	Explicación de los índices usados en el cuadrado de clasificación para la zonificación del frijol (A ₂ M ₁)	92
15	Jerarquización y clasificación de las unidades de zonificación para el cultivo del <u>Phaseolus vulgaris</u> en Costa Rica (miles de hectáreas)	93
16	Jerarquía para distintas categorías hídricas, de duración de la época de siembra y de años negativos (segunda aproximación --segundo nivel de precisión)	98
17	Índices equivalentes para la integración del índice de sitio del quebrado zonificador	106
18	Índices de sitio para cada una de las localidades en estudio de acuerdo al análisis discriminatorio de las siete u ocho variables seleccionadas	107
19	a) Medias y desviación estandar de las variables b) Matriz de correlación que expresa la estructura de asociación de las variables usadas en el estudio (ocho) c) Variancia común (communality) y estimado del primer factor de ponderación (Factor Loading) ...	109
20	a) Medias y desviación estandar de las variables b) Matriz de correlación que expresa la estructura de asociación de las variables agroclimáticas y derivadas usadas en el estudio (siete) c) Variancia común (communality) y estimado del primer factor de ponderación (Factor Loading) ...	110
21	Algunos valores de las variables complementarias usadas en el desarrollo del tercer nivel de precisión agroclimática	114
22	Probabilidad de encontrar distintos niveles de deficiencia en Turen	126
23	Probabilidad de encontrar distintos niveles de deficiencia en Acarigua	127

Cuadro No.		<u>Página</u>
24	Probabilidad de encontrar distintos niveles de exceso de agua en Acariçua	131
25	Probabilidad de encontrar distintos niveles de exceso de agua en Turau	132
26	Tipos agroclimáticos tentativos que corresponden al número de períodos (frecuencia) con deficiencia mayor de 10 mm para el ciclo del cultivo	136

LISTA DE FIGURAS

Figura No.		<u>Página</u>
1	PERF-camino crítico. Interrelación de las etapas del proyecto y tiempo de cada actividad	36
2	Isotermas rectilíneas reducidas al nivel del mar. Temperatura media para julio en Costa Rica	47
3	Valores de humedad relativa observados y estimados, promedio de doce valores mensuales (grado de asociación (65)).....	82
4	Duración de la época de siembra. Valores calculados según el primer nivel de precisión contra los calculados según el segundo nivel de precisión	95
5	Epoca de siembra óptima detectada por el primer nivel de precisión contra el segundo nivel de precisión	97
6	Valores de precipitación total durante el ciclo (Turen vs. Acarigua)	116
7	Fechas de ocurrencia del primer grupo de lluvias en mayo	118
8	Fechas de ocurrencia del segundo grupo de lluvias en mayo	119
9	Distribución de la precipitación y la evapotranspiración potencial en Turen	120
10	Distribución de la precipitación y la evapotranspiración potencial en Acarigua	121

LISTA DE MAPAS

Mapa No.		<u>Página</u>
1	Zonificación ecológica para el cultivo del frijol en Costa Rica (segunda aproximación - primer nivel de precisión)	91
2	Curvas de nivel y ubicación de estaciones (Meseta Central y alrededores - Costa Rica)	99
3	Categorías de uso potencial de la tierra (Meseta Central y alrededores - Costa Rica)	101
4	Identificación, clasificación y jerarquización de las áreas aptas para el cultivo de mejor a peor ..	102
5	Isófanos del comienzo de la época de siembra y de la fecha óptima de siembra del cultivo	104
6	Isolíneas del índice de sitio de acuerdo al "Análisis de Factores Múltiples"	112

1. INTRODUCCION

Para percibir la importancia de la zonificación ecológica de cultivos bastará hacer un breve análisis de algunas necesidades que se encuentran en la elaboración de planes y proyectos de desarrollo agropecuario, en cualquiera de sus niveles jerárquicos: nacional, regional, o de área específica. El punto de partida es el análisis económico de los productos agropecuarios que se encuentran deficitarios, la balanza del mercado internacional y perspectivas de exportación de los mismos. Como resultado del diagnóstico de mercados, se pueden elaborar listas de productos que tienen buenas perspectivas económicas para una expansión. Sin embargo, no basta el establecimiento de estas listas de cultivos para poder hacer planes de fomento; la primera interrogante que se plantean los planificadores será sobre la localización de las áreas, que tengan condiciones ecológicas adecuadas para estos cultivos: así se podrán formular las directivas necesarias para alcanzar las metas de expansión con una mayor seguridad y, por lo tanto, garantía del retorno a las inversiones.

Un segundo caso se refiere a planes de producción en áreas específicas; a este nivel es necesario determinar cuáles son los cultivos que tienen las mejores perspectivas ecológicas, en función de los recursos biofísicos disponibles en el área. De ahí la utilidad de la zonificación ecológica para los planificadores que necesitan de la lista de los cultivos ecológicamente factibles, de la determinación de los espacios geográficos con recursos ecológicos adecuados para cada uno de ellos y el costo y mercadeario de productos, etc., como elementos indispensables para la toma de decisiones relativas a que cultivo fomentar.

Uno de los objetivos de la ecología agraria es la zonificación de

áreas aptas para el desarrollo de los cultivos. Esta zonificación puede hacerse a un nivel general para una especie y a un nivel más detallado para variedades de esa especie. En países o regiones tradicionalmente agrícolas la zonificación a nivel general no tiene mucha utilidad ya que ha sido lograda por la experiencia secular; tampoco tendría mucho sentido zonificar a nivel de variedades. En las grandes áreas tropicales prácticamente deshabitadas, la zonificación es el punto de partida para cualquier acción de desarrollo.

No cabe duda que la integración del factor clima con el factor suelo es capaz de definir situaciones que permitan dilucidar qué área es más conveniente para el desarrollo de los cultivos, y si se trata de considerar también cada cultivo por separado teniendo en cuenta sus exigencias específicas, el resultado será mejor. Las experiencias realizadas acerca de la zonificación de cultivos no solucionan íntegramente el problema complejo en sí.

Una manera de aliviar el problema general con respecto a precisión y confiabilidad para las áreas zonificadas sería contemplar varios niveles de precisión que generan varios modelos de zonificación, que básicamente se agrupan en tres: de puntos, de línea y de área.

Los objetivos del presente trabajo son:

1. Desarrollar una metodología que permita obtener mayor precisión en la zonificación ecológica de cultivos anuales.
2. Aplicar los modelos de zonificación de punto ; de línea y de área, tomando como ejemplo el frijol (Phaseolus vulgaris).

2. REVISION DE LITERATURA

2.1 La naturaleza de las zonificaciones ecológicas de cultivos

Para Azzi (4), el concepto fundamental que constituye la base de la climatología agrícola es el de los equivalentes meteorológicos, los cuales se explicarán más adelante. Su adopción no simplifica solamente los problemas bioclimáticos, sino que aclara situaciones complejas antes difíciles de solucionar. La simple relación de los elementos climáticos puros con el desarrollo de las plantas no soluciona satisfactoriamente el problema. Debemos en este caso abandonar el concepto de clima y tomar el de agroclima. Según Burgos (2), agroclima sería el conjunto de condiciones climáticas principales, determinantes de otras que son su consecuencia en sus valores de intensidad, duración, frecuencia y época, que posibilitan el cultivo económico de una especie determinada. Este concepto no implica el del clima, ya que dos localidades de clima diferente pueden tener el mismo agroclima, o que climas generales muy parecidos pueden provocar condiciones agroclimáticas distintas para un mismo cultivo.

Fundamentalmente se tienen que determinar los tipos agroclimáticos de los cultivos, los cuales están íntimamente ligados a los equivalentes meteorológicos. Estos equivalentes se refieren, por ejemplo, a los grados de temperatura y la cantidad de lluvia que separan las situaciones normales de las anormales y que son específicos para cada cultivo; cabe mejor llamarlos índices agroclimáticos ya que relacionan el efecto del fenómeno meteorológico sobre el cultivo.

La zonificación agroclimática la representa Azzi (4) como zonas fisiográficas, es decir, el conjunto de las localidades que presentan el

mismo cuadro climatológico en relación con una determinada especie vegetal. La zona fisiográfica o agroclimática reúne en una sola área, sea continua o discontinua, todos los puntos que presentan las mismas características atmosféricas en relación con un cultivo dado y sirve de orientación para coordinar las actividades que tienden a una adaptación más perfecta del cultivo al ambiente y a mejorar este último así, y gracias a la zonificación agroclimática, nos vemos ayudados y guiados en la elección de las medidas agrotécnicas y prácticas agronómicas adecuadas para disminuir la acción desfavorable de los factores ambientales. De la misma manera, al efectuar el balance de años de cosechas negativas y rendidoras, se puede obtener la pauta a seguir, genéticamente hablando, para combinar los caracteres de producción y resistencia que aseguren buenos rendimientos.

Los elementos climatológicos utilizados para ubicar las áreas climáticas, pueden ser puros o específicos, es decir, según se represente el elemento climatológico en su forma normal o se trabaje con índices agroclimáticos. Así la representación de las temperaturas medias (isotermas) o de las precipitaciones totales (isoyetas) serán índices climáticos que, si bien pueden usarse en las zonificaciones, su resultado es deficiente (1), el uso de valores como sumatoria de las temperaturas por encima de $12,8^{\circ}\text{C}$, que sería el cero biológico de las cítricas o la magnitud de exceso o la deficiencia de agua en el suelo referidas a un cultivo, son índices agroclimáticos que proporcionan elementos de juicio más precisos para trabajar con mayor rigor.

Muchos son los trabajos de aplicación agrícola o forestal en los cuales para probar la aptitud de una localidad, se refiere al tipo climático

que le corresponde, según alguna de las clasificaciones climáticas tradicionales. Las limitaciones que presentan estas aplicaciones directas a problemas biológicos, movió el interés de algunos autores para tratar de introducir modificaciones a aquellas clasificaciones, es decir, tratar de lograr clasificaciones climáticas que sirvieran para apreciar las posibilidades agrícolas, afinando las jerarquías para así poder tener resultados prácticos. Como ejemplo de este grupo podemos mencionar a Papadakis (70) y De Fina et al. (20). este último realizó amplios estudios para ubicar cultivos índices en la República Argentina relacionándolos con los elementos del tiempo y otros del complejo ambiental. Ellos definen sus tipos con índices climáticos fijos ordenados sistemáticamente, atribuyéndoles una mejor o peor significación agrícola. Papadakis (70) trata de tipificar el régimen térmico en su amplitud anual, para ello se utiliza como parámetro característico del invierno, la temperatura mínima media anual. Los tipos estivales se definen según la temperatura media del mes más cálido. Desde un punto de vista climático los trabajos de Papadakis (71) son muy completos.

Las regiones hídricas en este caso se establecen por medio de un índice hídrico, derivado del déficit de saturación del aire y que equivale a la suma de los índices mensuales. También emplea la evapotranspiración potencial.

Una valiosa contribución para este tipo de estudios fue la determinación de las formaciones vegetales del mundo o zonas de vida de Holdridge (46). Esta metodología llama la atención por simplicidad y los resultados que pueden obtenerse dentro del marco de su alcance. No obstante necesita de ajustes cuando se trata de problemas a nivel espacial más pequeño.

Al parecer para especies forestales y especies agrícolas perennes dentro de una primera aproximación o nivel de reconocimiento es aceptable.

Se puede observar que con este tipo de clasificaciones se pretenden definir tipos climáticos que tienen la misma aptitud agrícola, ya sea usando parámetros meteorológicos o índices agroclimáticos. Teóricamente, a cada unidad resultante le corresponderá los mismos cultivos posibles. Sin embargo, esto en la práctica resulta difícil realizar por diferentes exigencias meteorológicas de los cultivos, su distinta modalidad, etc. Cuando el interés de algunos autores fue el de determinar la aptitud climática para algún cultivo específico, se originaron trabajos de mayor precisión; así en el caso de Azzi (4) se puede decir que al trabajar con los equivalentes meteorológicos fue más preciso y salió antes a la luz que otras clasificaciones con usos dudosos en lo que respecta a zonificaciones agroclimáticas.

Al abandonar la idea de definir unidades climáticas de igual aptitud agrícola y pretender de manera sistemática determinar los tipos agroclimáticos de los cultivos individuales se entra en el campo de la agroclimatología strictus sensu, desechando para estos fines el concepto de clima y tomando el de agroclima.

Burgos realizó determinaciones de tipos agroclimáticos en diversos cultivos (10, 11). García Benavides (25, 26, 27) realizó determinaciones siguiendo la misma pauta anterior y esbozó una metodología para ubicar mejor en el espacio y en el tiempo los cultivos anuales. Varios investigadores trabajan en estudios bioclimáticos y agroclimáticos donde podemos citar a Pascale y Demario (72), por su experiencia en Sudamérica.

Se ha esbozado hasta aquí, la zonificación agroclimática y algunos

aspectos que podrán llevarnos a una jerarquía de precisión, así como el conocimiento de Azzi (4), como creador de muchas ideas que actualizadas, están todavía en boca. Para llegar a la zonificación ecológica, de cultivos se deberá incluir otro grupo de factores del ambiente. De esta manera es como el factor edáfico junto con el climático integrarán el conocimiento necesario para poder ubicar en el espacio geográfico las áreas potenciales para el desarrollo de cultivos específicos.

En ecología agrícola se distinguirá un suelo de otro, por su especial comportamiento con respecto a cada cultivo. Tal comportamiento se mide por el rendimiento de las plantas cultivadas. La integración entonces del factor edáfico con el climático, podrá ser considerada como una síntesis del medio ambiente y por consiguiente una zonificación ecológica.

2.2 Antecedentes de Zonificación Ecológica de Cultivos en el Trópico

Como se indicó anteriormente, existe poca experiencia en el mundo sobre zonificación ecológica de cultivos en el medio tropical. Entre los esfuerzos se puede mencionar el que llevó a cabo Papadakis (71) en el Oeste de Africa (Costa de Marfil, Bahomey, Ghana, Liberia, Nigeria y Togo), este es un trabajo bastante generalizado y basado en un análisis agroclimático y edáfico simple.

En América Tropical se pueden señalar los trabajos que realizó con anterioridad el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (65) para el área centroamericana y los de Aguirre y Salas (1) para frijol en el Istmo Centroamericano. Estos estudios, si bien alcanzaron una expresión cartográfica de síntesis, no son del todo satisfactorios ya que consideran en el análisis variables climáticas y no agroclimáticas, que sería lo recomendable. En estos trabajos se siguió una metodología propia para cultivos

perennes, siguiendo la técnica de Holdridge (49) y no da resultados deseables para cultivos anuales a menos que se hagan las modificaciones pertinentes.

Algunos geógrafos brasileños como Maricato (61, 62) y Dos Santos (22) trataron de llegar a zonificaciones de cultivos mediante la determinación de fitoclimogramas, desgraciadamente los ensayos de expresión cartográfica son extremadamente deficientes. Estos ensayos corresponden a cultivos como cacao, caña de azúcar, coco y tabaco, entre otros, y el espacio geográfico considerado fue el Brasil.

Otro trabajo interesante es el llevado a cabo por el 'Instituto de Pesquisa Agropecuaria do Norte' en Brasil (7). En este trabajo se propone una zonificación a nivel de una primera aproximación que si bien trabaja en algunos casos con índices agroclimáticos generales, la expresión cartográfica es algo deficiente, pudiendo ser convenientemente mejorada al introducir un análisis cartográfico de las variables más exhaustivo.

Otro aporte significativo realizado en beneficio de la zonificación ecológica de cultivos en el trópico americano es el conjunto de trabajos que se han llevado a cabo en Venezuela, aplicando el concepto agroclimático para la definición de tipos agroclimáticos en un grupo de cultivos tropicales. Este esfuerzo es consecuencia del Seminario Regional de Agroclimatología que se llevó a cabo en Maracay, Venezuela, en 1960. Entre estos estudios se pueden señalar los de Burgos y Reyes para cacao (11), los de García B. para café (25), cítricas (27) y frijol (26), el de García B. y Montaldo para yuca (37), el de García B. y Sánchez para palma datilera (40) y los de García B. y Mazzani para ajonjolí (32, 33). Como se indicó anteriormente, estos estudios permitieron definir índices agroclimáticos

para los cultivos específicos, a los cuales se adicionó en algunos casos diversos mapas factoriales correspondientes a los valores indicados por los índices. No se llegó a la elaboración de una síntesis de los mapas factoriales ni se incluyó ningún factor edáfico.

Las más recientes contribuciones relativas a la zonificación ecológica de cultivos en zonas tropicales, corresponden a los proyectos que el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas está llevando a cabo para los países del Mercado Común Centroamericano. En recientes comunicaciones (65) se presenta el esquema metodológico empleado en las zonificaciones. Este esquema incluye entre sus etapas, un análisis agroclimático detallado, la inclusión de variables edáficas, y una expresión cartográfica final que sintetiza todas las variables empleadas, llegándose así a delimitar en el espacio geográfico, las áreas con potencial ecológico para el cultivo que se desea estudiar.

Igualmente que para cultivos, en el IICA-CTEI, se realizaron zonificaciones para la ganadería tropical y templada en Costa Rica por García B. y Manrique (31) y para los otros países del área Centroamericana por Manrique (60).

Para los trabajos anteriores llevados a cabo en el IICA-CTEI, se usó una metodología agroclimática a partir de un primer nivel de precisión agroclimática, de acuerdo con los aportes realizados por García B. Esta metodología puede ser llevada a alcanzar grados de detalle suficientemente estrictos que permitan resolver muchos de los problemas planteados al complejo ecológico de la zonificación de cultivos. La metodología usada siguiendo sucesivas aproximaciones y la introducción en ella de los niveles de precisión agroclimática se expondrán en este trabajo.

2.3 Algunas relaciones clima-rendimiento

Las variables climáticas y agroclimáticas al relacionarlas con los rendimientos presentan toda una gama de respuestas, es decir, mientras unas ayudan poco a explicar la marcha del cultivo otras en simples combinaciones dan una respuesta satisfactoria. Pueden combinarse también un gran número de variables. Vidal (89) trabajando con un índice climático integrador de 8 variables donde relaciona el clima y la fenología del cultivo, logra explicaciones del rendimiento con coeficientes de determinación del 36 por ciento ($r^2 = 0,36$). Sin embargo, una sola variable de las ocho enumeradas explica por sí sola el 50 por ciento. Así, trabajando con el exceso de agua anual para cultivos perennes García y Montoya (28, 36) encontraron coeficientes de determinación entre 75 y 85 por ciento. Aplicando simultáneamente dos variables, excesos y deficiencias de agua, el coeficiente de determinación oscila entre 85 y 99 por ciento. De la misma manera García y Mazzani (33) en cultivos anuales obtuvieron coeficientes superiores al 85 por ciento relacionando excesos y deficiencias de agua durante el ciclo del cultivo contra el rendimiento, para comparaciones simples. Relacionando ambas variables el R^2 superó el 90 por ciento (32). Igualmente, podemos citar a McFarlane (58), Dean (19), Silva (81), Suárez de Castro (83), Robinson (78), Sylvain (84), Alvim (3) y otros (24, 57, 63, 64) e innumerables más, tanto en cultivos perennes como anuales y relacionando una o varias variables simultáneamente con los rendimientos.

En estudios realizados por Cochemé y Franquin (14) se comparan 14 variables climáticas y fenoclimáticas con el rendimiento del algodón. La combinación que presentó el coeficiente de determinación más elevado (76 por ciento) relaciona 5 variables: Altura de la lluvia en los meses de

abril y mayo, altura de la lluvia en el primer mes de germinación, altura de la lluvia durante el segundo mes, altura de la misma en el tercer mes y altura de la lluvia del resto de la estación lluviosa. Trabajando con las variables por separado aquella que presenta mejor correlación es la duración del período húmedo ($r^2 = 0,21$). Los mismos autores reconocen que debieron efectuar regresiones curvilíneas en vez de lineales y que se debería intervenir con el balance de agua en el suelo, en vez de la altura de las precipitaciones. No cabe duda que trabajando con variables modificadas, es decir, con aquellas propiamente agroclimáticas se obtienen explicaciones más satisfactorias. En estudios realizados por García B. y Pinchínat (38) se establecieron las relaciones entre 18 variables agroclimáticas y el rendimiento del frijol (P. vulgaris L.) en Turrialba, para las variedades 27-R y Turrialba-4. La variable que presenta mejor coeficiente de determinación ($r^2 = 0,81$) es el almacenaje más bajo durante el ciclo seguida de el número de períodos con deficiencia ($r^2 = 0,56$) y el almacenaje promedio durante el ciclo ($r^2 = 0,51$). Efectuando combinaciones se obtuvo para dos variables, coeficientes de determinación de 87 por ciento y 90 por ciento ($R^2 = 0,87$ y $R^2 = 0,90$) para Turrialba-4 y 27-R, respectivamente, siendo las variables el número de períodos con deficiencia y el almacenaje más bajo durante el ciclo. Combinaciones entre el número de períodos con exceso y el almacenaje más bajo durante el ciclo también dieron coeficientes de determinación elevados ($R^2 = 0,60$ y $R^2 = 0,89$) para Turrialba-4 y 27-R, respectivamente.

3. MATERIALES Y METODOS

Este estudio se ha dividido en cuatro partes; la primera trata de introducir conceptos básicos de la zonificación de cultivos, alcances de la metodología propuesta, así como la necesidad del uso de la agroclimatología moderna. La segunda, tercera y cuarta parte trata de la zonificación a distintos niveles de precisión con metodología propia para cada caso. Estas partes se interrelacionan de tal manera que el problema planteado se va desglosando en niveles de precisión cada vez mayores de acuerdo con las exigencias. Las cuatro partes pueden interpretarse independientemente y pueden ser usadas individualmente o en conjunto.

3.1 La agroclimatología y las consideraciones agronómicas de los regímenes hídrico, térmico y fotoperiódico

De las variables climáticas y agroclimáticas, comúnmente usadas en la zonificación, estas últimas permiten obtener mejores resultados, pudiendo de una manera práctica darle explicación a las relaciones entre clima y plantas a través de sus rendimientos o épocas propicias de siembra y desarrollo. Así vamos a dilucidar qué áreas son más apropiadas que otras para el establecimiento de los cultivos.

Las variables agroclimáticas y climáticas que se agrupan en los regímenes térmico, fotoperiódico e hídrico son cuantiosas. Por separado expondremos a continuación las consideraciones de los tres regímenes a través de la variación del rendimiento.

3.1.1 El régimen hídrico

Dentro del régimen hídrico agroclimático se van a estudiar las relaciones entre la evapotranspiración potencial (ETP) y las precipitaciones atmosféricas; así como el estudio de la duración de la estación

húmeda y su posición en el transcurso mensual agroclimático. El problema radica esencialmente en ajustar los ciclos de vegetación, crecimiento y desarrollo a los límites de la estación húmeda de tal manera que las principales etapas de cultivo coincidan con los valores óptimos más cercanos a sus exigencias climáticas.

En un nivel general podrán considerarse tres períodos principales en la estación húmeda:

- a) El primer período se refiere al período prehúmedo durante el cual la precipitación si bien ha comenzado, es inferior a la evapotranspiración potencial. Este período va desde el comienzo de las primeras lluvias, punto que denominaremos A, hasta el punto B, donde la lluvia equilibra justamente a la evapotranspiración potencial. En este punto se van a unir las curvas de precipitación y ETP, y si el cultivo cubre el suelo el balance hídrico se considera como nulo.
 - b) El segundo período o período húmedo es aquel donde la precipitación, también globalmente considerada, es superior a la ETP. Este período va entre los puntos B₁ y B₂. Siendo B₂ aquel punto donde van a encontrarse nuevamente las curvas de la precipitación y la ETP. Al final de este período nos encontramos con un balance global positivo, es decir, existen reservas de agua en el suelo.
 - c) El tercer período va entre el punto B₂, hasta el punto C₂ donde la evapotranspiración real se anula por agotarse las reservas del suelo. Se conoce este período como poshúmedo.
- El primer período anteriormente expuesto, corresponde teóricamente

para ciertos cultivos a la época de siembra normal. En este período se puede detectar el punto denominado S, donde la precipitación es igual a la mitad de la ETP. Este valor corresponde también aproximadamente a la evaporación real media de un suelo desnudo. Para una siembra efectuada en el momento S, la evapotranspiración real aumentará de manera exponencial como aumenta la superficie foliar hasta que el cultivo cubra el suelo completamente. Lo deseable es que el cultivo cubra el suelo en el momento B_1 ; esto dependerá de la especie, de la variedad, de la densidad, pero fundamentalmente del tiempo que transcurre entre S y B_1 .

El período de tiempo entre A_1 y S no debería ser apto para sembrar, las condiciones hídricas y las reservas de agua son muy bajas, a no ser que sean plantas extremadamente resistentes a la sequía como el Pennisetum typhoideum. También podría pensar en sembrarse en ese subperíodo, si interesa por alguna razón especial ajustar el ciclo del cultivo a un período húmedo demasiado corto o que características especiales del período húmedo al coincidir con determinada etapa básica del desarrollo de la planta hagan que se obtengan mejores cosechas y merezca la pena correr el riesgo siempre alto de sembrar en el subperíodo A_1 , S. Esto último suele ser factible en cultivos como el millo, sorgo, y algodónero que necesitan una relativa poca cantidad de kg de semilla por hectárea.

El período prehúmedo es aquel donde tiene lugar la preparación del suelo, esta preparación es más fácil a medida que nos acercamos más al punto B_1 y se torna más difícil o prácticamente imposible después de dicho punto.

En términos agroclimáticos tenemos que distinguir entre estación lluviosa y húmeda; la estación lluviosa comienza en A_1 y termina en C_1

(punto de terminación de las lluvias); la estación húmeda comienza en S y termina en el punto C₂. Durante el segundo período o período húmedo la evapotranspiración real es igual a la evapotranspiración potencial estando los cultivos en condiciones óptimas a no ser que la curva de la pre cipitación esté demasiado elongada dando como resultado excesos de agua que pueden ser perjudiciales. Si el suelo llega a saturarse en este se- gundo período el tercer período resultará también convenientemente apto dependiendo del almacenaje al final del punto B₂, y de la capacidad de al- macenamiento de agua en el suelo específico considerado.

Las posiciones de los puntos S, B₁, B₂ y C₂ tienen un especial signi- ficado al relacionarlos con las etapas del cultivo. El estudio de estas relaciones dará lugar a establecer consideraciones de tipo fenológico que pueden ser primordiales para el verdadero ajuste entre el ciclo del culti- vo y el devenir climatológico. Es lógico considerar que un período de se- quedad o exceso de agua, no tendrá la misma importancia si ocurre en algu- nos de los tres períodos antes considerados o en alguna etapa básica del cultivo como pudiera ser la floración. El estudio en conjunto de los su- cesos climáticos y agroclimáticos así como los sucesos de tipo fenológico encierran en general, los elementos de juicio necesarios para interpretar los rendimientos alcanzados. Bajo un punto de vista agroclimático general la variación del rendimiento vendría dado por:

- 1) La duración del período de vegetación real
- 2) De la cantidad de agua que cae en el período prehúmedo
(excesos y deficiencias)
- 3) Del exceso de agua en el suelo en el período húmedo
- 4) De la cantidad de agua caída en el período posthúmedo
(excesos y deficiencias)

Hasta aquí se ha hipotetizado que el cultivo es más o menos concorde con el régimen hídrico general, en el transcurso mensual. Sin embargo, por exigencias del mismo cultivo puede que esto no sea así y que la siembra se haga a partir de un punto avanzado en el tiempo del régimen hídrico. Es entonces aquí que más importante que las consideraciones de tipo climático y agroclimático del mismo régimen, serán las consideraciones fenológicas estudiadas a partir de la influencia del clima en las principales etapas del cultivo, y que concuerden o no con los períodos principales del régimen hídrico explicado por un balance de agua en el suelo.

3.1.2 / El régimen térmico y fotoperiódico y sus influencias sobre el rendimiento

Estos dos regímenes son en realidad menos importantes en condiciones tropicales que el régimen hídrico, en lo que respecta a su uso para la zonificación ecológica de los cultivos. Sin embargo, las posibles adaptaciones de los cultivos las podemos estudiar también a partir de consideraciones heliotérmicas. Goslin (43), entre otros autores, ha estudiado convenientemente estos efectos sobre las plantas.

El crecimiento y el desarrollo vegetal están influenciados por el complejo heliotérmico. El crecimiento celular es una resultante de los procesos de fotosíntesis y de respiración; depende sin tener en cuenta el factor agua, de la luminosidad del contenido de CO_2 y de la temperatura.

La velocidad de crecimiento sigue aproximadamente la ley de Van't Hoff entre temperaturas límites que oscilan, para cultivos tropicales, entre 10° y 32°C . A partir de esta última temperatura decrece rápidamente, esta velocidad de crecimiento. La influencia de la temperatura es luego decisiva para el crecimiento y para que éste sea conveniente es necesario

que la temperatura nocturna presente una oscilación adecuada contra la temperatura diurna (53). Consideraciones similares podíamos observar al tratar el desarrollo de las plantas. Así podemos decir que para que ocurra la floración en ciertas especies se hace necesario que exista una determinada relación entre temperaturas diurnas y nocturnas.

Para algunas especies y variedades estrictamente no fotoperiódicas (neutras) parece ser la suma de temperaturas la que determina la inducción a la floración. Pero para variedades fotoperiódicas es el fotoperíodo el que induce básicamente esta floración.

Con respecto al fotoperíodo podíamos hablar en términos generales de plantas neutras, plantas fotoperiódicas y plantas de reacción fotoperiódica débil. Para las primeras nos interesa conocer mejor la sumatoria de temperaturas y para las segundas la duración astronómica de la insolación; las terceras se comportan de una manera intermedia.

La productividad final de una planta es función de su superficie foliar total. La superficie foliar media es una expresión que nos indica el crecimiento ponderal; sin embargo, el número de hojas es una expresión del desarrollo vegetativo independiente del crecimiento ponderal. Si nos olvidamos del nivel de fertilidad y del factor agua la productividad final de una planta dependerá de la duración del período de desarrollo (número de hojas) y de la velocidad de crecimiento (superficie foliar media). No obstante el rendimiento de un cultivo es función no de la superficie foliar directamente sino de la relación superficie foliar/superficie del suelo ocupada, la cual es igual al llamado índice de área foliar (IAF).

Debido al autosombreamiento total la superficie foliar no está lúmicamente saturada y la fotosíntesis no está regularmente distribuida

hacia la base del follaje. Por supuesto que la fracción no saturada aumenta con el desarrollo y el crecimiento. El IAF alcanza para determinadas condiciones de temperatura y luminosidad un valor óptimo para la porción del follaje no saturado; allí la intensidad de la luz está cerca del punto de compensación. Tendremos entonces un valor para la fotosíntesis neta máxima:

$$\frac{dw}{dt} = (dp - dr)/dt$$

hasta este valor óptimo del índice, la producción de materia seca dw/dt irá en aumento con el aumento en la intensidad de la fotosíntesis dp/dt . A partir de aquí disminuirá cuando aumente la intensidad de respiración dr/dt . Por lo tanto, la porción del follaje iluminado aunque esté en su punto de compensación de luz y debido a la importancia que toma la respiración tendrá una fotosíntesis neta negativa. Es decir, no hay aumento en materia seca.

Un aumento en la intensidad luminosa será entonces favorable para el rendimiento. Por el contrario; una elevación de la temperatura hará aumentar el valor del punto de compensación y la respiración dr/dt ; el valor óptimo del IAF disminuirá con la consiguiente merma en el rendimiento.

Existe, pues, una relación agronómica estrecha entre la radiación, la intensidad de la luz y la temperatura, a través del IAF. Esta relación se fundamenta en el balance fotosíntesis-respiración.

Se puede resumir diciendo:

- 1) Que las temperaturas nocturnas tienen un marcado efecto sobre el crecimiento y el desarrollo
- 2) Que las temperaturas mínimas en la estación seca constituyen un factor básico para estudiar la velocidad de desarrollo

- 3) Que las temperaturas máximas pueden ser limitantes en regiones tropicales.

Se hace necesario estudiar ciertas variables que forman parte del complejo heliotérmico pudiendo ser las siguientes:

- 1) Temperaturas máximas y mínimas (diurnas y nocturnas)
- 2) Sumatorio de temperaturas
- 3) Radiación solar en todas sus formas
- 4) Fotoperiodismo.

3.2 Variables climáticas y agroclimáticas, clasificación general

Una variable climática puede considerarse como aquella que define a un factor climatológico y tiene una concepción únicamente física del fenómeno. Así, el simple dato de la precipitación, la temperatura media de un lugar, la velocidad del viento, etc., son variables climáticas.

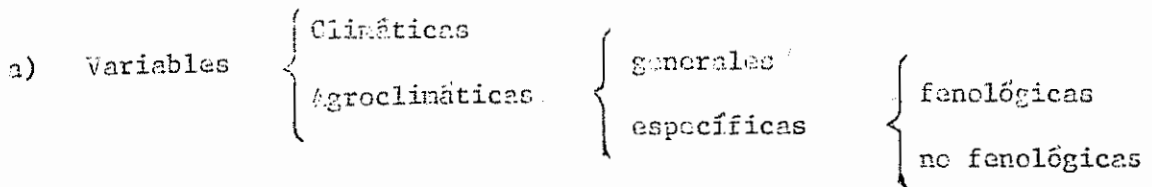
Una variable agroclimática es aquella que presenta una relación evidente entre la variable climática y la planta, tiene entonces un carácter biofísico. Por ejemplo, la precipitación relacionada con el ciclo de cultivo de una planta será una variable agroclimática. Existe otro grupo de variables que complementan el efecto climático y ayudan a definir la adaptación de los vegetales, también se van a considerar como agroclimáticas. Así tenemos entre ellas a la evapotranspiración potencial y aquellas que también se consideran como integrantes del 'clima edáfico', estos son: la humedad del suelo y la temperatura del mismo.


Las variables agroclimáticas a su vez se pueden dividir en generales y específicas. El simple dato de la evapotranspiración potencial es una variable agroclimática general. En realidad no nos está refiriendo nada a un cultivo específico, sino se indica lo contrario, lo mismo podríamos

decir de la humedad del suelo. En el momento que se hace alusión a un cultivo particular se está considerando una variable agroclimática específica; por ejemplo, la sumatoria de temperaturas por encima de $12,8^{\circ}\text{C}$, siendo este número el cero biológico de las cítricas. También una variable agroclimática específica puede ser fenológica si detecta la relación con una etapa básica del cultivo; como decir que la deficiencia de agua crítica para la floración del algodónero fueran 10 mm (valor supuesto).

En el Cuadro 1 vemos como sería el esquema general de estas variables además que indicamos que las variables agroclimáticas podemos agruparlas y estudiarlas a través de tres grandes grupos de acuerdo a su condición de limitantes por sus magnitudes extremas o sean propicias para el desarrollo o el crecimiento de un cultivo específico.

Cuadro 1. Esquema de clasificación general de Variables.



b) Variables	Estímulo	Reacción
Climáticas o Agroclimáticas <div style="text-align: center;">  </div>	Agua (Excesos extremos)	Producen muerte en los tejidos vegetales
	Agua (Sequedad extrema)	" "
	Temperatura (Frío extremo)	" "
	Temperatura (Calor extremo)	" "
	Viento (Valores extremos)	" "
	Temperatura (Termoperiodismo)	Determinan el desarrollo
	Luz (Fotoperiodismo)	" "
	Temperatura (Integral térmica)	Determinan el crecimiento
	Agua (Hidroperiodismo)	" "

3.3 Esquema Metodológico General Empleado por el IICA en sus Proyectos de Zonificación

El esquema desarrollado por el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas en su Centro Tropical de Enseñanza e Investigación de Turrialba, Costa Rica, para la zonificación ecológica de cultivos puede ser empleado con tres etapas diferentes de detalle. Estas tres aproximaciones sucesivas son las siguientes:

- a) Primera Aproximación: Es el resultado de la expresión cartográfica sintética del análisis de variables agroclimáticas que inducen en el cultivo en estudio.
- b) Segunda Aproximación: Es el resultado de adicionar a la Primera Aproximación, las variables fisio-edáfica que inciden en el cultivo. Se logra una subdivisión de las zonas agroclimáticas.
- c) Tercera Aproximación: Resultado de la adición a la Segunda Aproximación, de variables medio ambientales cuya presencia es localizada. Se logra obtener una subdivisión de las subzonas de la segunda aproximación.

Las escalas cartográficas recomendadas para estas aproximaciones son: para la Primera Aproximación, escalas menores de 1:500.000; para la Segunda Aproximación, escalas de 1:50.000 y 1:500.000; y para la Tercera Aproximación, escalas mayores a 1:100.000.

En los proyectos realizados hasta el momento, el grado de detalle empleado corresponde a la Segunda Aproximación del esquema metodológico general, es decir, que incluye el análisis de variables agroclimáticas y fisioedáficas, correspondientes a los cultivos considerados. La expresión cartográfica final corresponde a la escala 1:500.000.

3.4 Esquema Metodológico Ampliado

En el esquema general se había introducido recientemente la modificación de sustituir las variables climáticas, con las que se trabajó en los proyectos realizados en los años 1968 y 1969, por variables agroclimáticas, tanto generales como específicas. De esta manera se realizaron los estudios para los países del área Centroamericana y Panamá. Se la

dio también hincapié al régimen hídrico. No obstante quedaban una serie de incógnitas por resolver, que solamente se podían detectar a través de un sucesivo aumento en la precisión de las diferentes etapas. Sobre todo es necesario lograr una precisión adecuada y escalonada para las distintas aproximaciones en lo que respecta al estudio agroclimático.

Se propone establecer tres niveles de precisión agroclimática que se expondrán a continuación y se denominarán primer, segundo y tercer nivel. Al unir estos niveles a las aproximaciones se obtendrán combinaciones que se ajustan a las exigencias de los futuros proyectos.

3.4.1 El primer nivel de precisión agroclimática

En este nivel se van a estudiar las variables agroclimáticas a partir de los valores promedios de las series de tiempo. Se trabaja con el régimen hídrico caracterizado por un balance de agua en el suelo entonces se determinan los valores mensuales promedios de excesos y deficiencias de agua de la serie de años considerados. El esquema del primer nivel de precisión es general correspondería a un análisis agroclimático adecuado para integrar la primera aproximación y bajo ciertas condiciones también la segunda aproximación.

3.4.2 El segundo nivel de precisión agroclimática

La precisión de este nivel es más significativa, porque considera los valores mensuales separadamente. No existen entonces, valores promedios, cada valor es individual y distinto, permitiéndose determinar a un nivel mensual y quincenal variabilidades de fenómenos a través del espacio y del tiempo. Este nivel es ideal para integrar la segunda aproximación, aunque también podríamos usarlo en la primera. Si la zona en estudio es demasiado grande (generalmente mayor de 50.000 km²) y existen en

ella series largas de observaciones climáticas, se necesita la ayuda de computadoras debido a lo elaborada de su manipulación.

A partir de este nivel de precisión se hace necesario tomar en cuenta algunas características del "clima edáfico" de cada localidad, con el objeto de determinar el verdadero almacenaje de agua en el suelo, variable para cada tipo del mismo. La observación directa de las propiedades físicas del suelo es necesaria, de esta manera se pretende trabajar con un balance de agua más real en contraposición con el teórico que se desarrolla generalmente en el primer nivel de precisión. No obstante la inclusión de un balance real en el primer nivel, es también conveniente.

3.4.3 El tercer nivel de precisión agroclimática

Es este un nivel estricto; el análisis mensual es abandonado para determinar análisis diarios. A veces pueden ser suficientes cálculos semanales pero para áreas de mucha variabilidad climática aún este último análisis enmascara las verdaderas situaciones, siendo necesario el diario, el cual es muy elaborado en la mayoría de los casos y la computadora imprescindible.

3.5 Alcances de los distintos niveles de precisión del Esquema

Metodológico Ampliado

La adopción de estos niveles vino como consecuencia de tratar de contestar más preguntas y de tratar de solucionar más problemas planteados en el transcurso de la zonificación ecológica. Mediante los análisis en los tres niveles anteriores, no solamente se pueden ubicar áreas aptas para el desarrollo de cultivos específicos sino que es posible detectar entre otras cosas, épocas propicias para siembra, épocas óptimas de siembra, porcentaje de años negativos, estudio de la variabilidad de los

rendimientos obtenidos, etc.

3.5.1 Alcance del primer nivel

Con el primer nivel de precisión y con las variables agroclimáticas en él empleados, se pueden delimitar áreas aptas para el desarrollo de cada cultivo y efectuar una jerarquización no muy rigurosa pero suficientemente estricta para la escala cartográfica empleada.

En el primer nivel podemos elegir una o dos variables hídricas y una térmica; más de tres en total serían muy difíciles de sintetizar y de cartografiar debido a la escala usada ya que incluimos también condiciones fisioedáficas. Como se dijo anteriormente, es propósito único de este nivel efectuar una clasificación agroclimática específica preliminar que pueda detectar espacialmente las zonas aptas para el desarrollo de un cultivo.

Las variables a ser usadas pueden ser muchas. A través del estudio completo de zonificación y en la aplicación de los tres niveles de precisión agroclimática, se observan más de 30 variables climáticas y agroclimáticas generales, específicas y fenológicas. Se presenta entonces el dilema de cuál escoger; lo ideal sería seleccionar una variable más explicativa de la situación, a ser posible que tuviera significado fenológico y que fuera específica para el cultivo. En el desarrollo de la investigación en el primer nivel de precisión agroclimática y en su parte hídrica se escogió la variable denominada duración de la época de siembra.

Esta variable estudia la longitud de la época en que se hace posible efectuar la siembra. Esta época de siembra está relacionada con la posibilidad del desarrollo total de la planta hasta su cosecha y se determina a partir del estudio de la acumulación de los excesos y deficiencias de

agua durante el ciclo de la planta (34). Los excesos y deficiencias límites provienen del estudio de los tipos agroclimáticos del cultivo (26). Como vemos, se hace necesario un estudio del balance de agua en el suelo, obteniéndose mejor precisión en la zonificación que trabajar con una clasificación climática o agroclimática y buscar homologías con el cultivo en estudio. Se abandona la idea de buscar unidades climáticas que tienen la misma aptitud agrícola para detectar en el espacio, los agroclimas específicos de cada cultivo. Para este nivel se trató de representar una variable criterio suficientemente representativa.

3.5.2 Alcance del segundo nivel

El segundo nivel tiene un alcance mayor. Es aquí donde a partir del análisis exhaustivo del balance de agua en el suelo podemos estudiar una serie de variables que no sólo van a permitir delimitar áreas aptas o no aptas y efectuar su jerarquización, sino que van a contribuir con el estudio más detallado de estas áreas, sobre todo en lo que respecta a la determinación y ubicación en el transcurso mensual de las fases principales del cultivo.

El comienzo de la época de siembra, la ocurrencia de la época óptima de siembra, la variabilidad de las mismas en el tiempo, son variables típicas del segundo nivel de precisión. En este segundo nivel no hacemos alusión expresa a la relación clima-rendimiento, sin embargo, es conveniente introducir una variable que cuantifique en forma resumida y general el grado de adaptación del cultivo en el área estudiada en lo que respecta a los rendimientos. Como una expresión de ello se puede considerar el porcentaje de años negativos. Por años negativos entendemos aquellos donde las condiciones climáticas rebasen los límites de adaptación, encontrándose

con mermas en los rendimientos tales que no obtengamos cosechas económicas o que se perdiera el cultivo totalmente por adversidades atmosféricas. Un estudio realizado con el segundo nivel de precisión debe ser a partir de una escala de 1:250.000.

3.5.3 Alcance del tercer nivel

En este nivel de precisión se completa el estudio agroclimático a un nivel ya bastante detallado; en él tendremos en cuenta básicamente la relación clima-rendimiento y las variables usadas tratarán de explicar su participación positiva o negativa en la evolución de las cosechas.

En este caso nos interesa más la distribución en el tiempo que en el espacio. No obstante, puede ser necesario completar la última distribución hasta definir un área homogénea agroclimática para incursionar en el estudio edáfico detallado de la tercera aproximación ecológica empleada en la zonificación. Al encontrarnos con la unidad más pequeña en la división agroclimática, es decir, que sea homogénea con respecto al agroclima, se deben efectuar nuevas jerarquizaciones a partir del estudio de características edáficas detalladas, no contempladas anteriormente a un nivel general.

3.6 Posibles combinaciones entre niveles (N) y aproximaciones (A)

	N ₁	N ₂	N ₃
A ₁	A ₁ N ₁	A ₁ N ₂	A ₁ N ₃
A ₂	A ₂ N ₁	A ₂ N ₂	A ₂ N ₃
A ₃	A ₃ N ₁	A ₃ N ₂	A ₃ N ₃

Las combinaciones son, lógicamente, nueve, sin embargo hay algunas que no deberían realizarse por diferir en la precisión de los componentes. En un círculo se han representado aquellos más convenientes para realizarse dentro del marco ecológico (A₂).

3.7 Etapas que comprende el esquema metodológico

3.7.1 Primera etapa: Definición de los requerimientos agroecológicos de los cultivos

En esta etapa se determina para el cultivo en estudio sus requerimientos ecológicos; éstos pueden ser definidos en diversas formas según la disponibilidad de información. En el caso ideal se determinan, en primera instancia, los índices agroclimáticos, para lo cual se podrán seguir las siguientes vías:

- a) Determinación del tipo bioclimático del cultivo
- b) Evaluación agroclimática de la región de origen de la especie
- c) Evaluación agroclimática de las regiones del mundo de difusión de la especie
- d) Evaluación del agroclima de las regiones en donde la experiencia ha demostrado el fracaso del cultivo

- e) Evaluación de índices agroclimáticos derivados de trabajos experimentales sobre los requerimientos agroclimáticos de la especie.

Mediante la aplicación de las normas anteriores, se puede determinar el agroclima de una especie cultivada y si la amplitud comprendida entre los valores extremos de los índices se dividen en jerarquías sistemáticas se obtienen los tipos agroclimáticos (9), que facilitan la clasificación y permiten establecer diferencias y analogías.

Paralelamente a la determinación de los índices agroclimáticos habrá que proceder en forma similar para la determinación de los requerimientos fisio-edáficos del cultivo en función de sus exigencias biológicas y de los requerimientos de la tecnología para su producción.

En los casos en que la información sobre el cultivo sea deficiente se podrá emplear, para la determinación de los rangos de tolerancia del cultivo, el análisis de variables climáticas y no agroclimáticas, como serían en la situación ideal.

3.7.2 Segunda etapa: Estimación de elementos meteorológicos para el área en estudio

Una situación real que se presenta por lo general en los países tropicales de nuestro continente y del mundo, es la deficiente información meteorológica disponible. Por lo general la red de estaciones es de poca densidad y de deficiente distribución. Otra razón por la cual se incluye esta etapa de estimación de elementos meteorológicos es que generalmente un alto porcentaje de las estaciones de registro son de cuarto orden, o sea que hacen mediciones solamente de precipitaciones.

Por medio de diversas técnicas se deberán estimar, para las localidades

de registros parciales, los otros elementos meteorológicos necesarios para el análisis agroclimático. Entre las estimaciones que con más frecuencia se realizan pueden ser señaladas, las térmicas en sus aspectos de medias generales, de máximas o de mínimas, y las de humedad relativa. Estas últimas por su carácter de no ajustarse a un patrón de variabilidad definido, a veces es imposible realizarlas.

3.7.3 Tercera etapa: Análisis agroclimático

En esta tercera etapa se contempla el análisis agroclimático de acuerdo con el primer, segundo o tercer nivel de precisión, o a ambos en conjunto, considerando la disponibilidad de datos meteorológicos compilados o estimados en la segunda etapa, así como de los requerimientos agroclimáticos específicos para el cultivo, dados por los tipos agroclimáticos que se determinaron en la primera etapa.

En condiciones óptimas de disponibilidad de datos meteorológicos observados o estimados y del conocimiento de los tipos agroclimáticos, el tipo de análisis que se emplea con más frecuencia es el del balance mensual de agua en el suelo. Este tipo de análisis permite definir zonas agroclimáticas, las que pueden ser jerarquizadas, además de ofrecer un conjunto de indicaciones sobre la calendarización de prácticas culturales de la especie relativas a épocas y fechas óptimas de siembra, un modelo preliminar de este tipo de análisis se puede ver en el trabajo de García B. y Montoya (35), que aquí se expondrá en la sección correspondiente.

En condiciones de deficiente información meteorológica o de índices agroecológicos, podrán realizarse otro tipo de análisis, como serían la determinación de isoyetas acumuladas a partir de una fecha de siembra, determinación de períodos ecosecos, etc. Estos análisis se establecerán para

la totalidad de localidades que tengan registros meteorológicos, ya que posteriormente en la quinta etapa se elaborarán por interpolación y análisis diversos mapas factoriales teniendo como puntos de referencia las localidades analizadas.

3.7.4 Cuarta etapa: Análisis de variables fisioedáficas

A partir del conocimiento de los requerimientos edáficos de los cultivos, determinados en la primera etapa y del conocimiento de las prácticas culturales más aconsejables (riego, mecanización, etc.) para el cultivo, se analiza la información disponible sobre aspectos topográficos y edáficos del territorio a zonificar.

En condiciones óptimas, el tipo de documentos cartográficos más empleados, son los mapas de capacidad de uso de la tierra o de uso potencial. En el caso de no disponer de estos documentos se podrá emplear mapas de suelos, de tipo genético (grandes grupos, series, etc.), los cuales deberán ser interpretados en función del cultivo en estudio. En el peor de los casos, cuando no se dispone de ningún documento cartográfico sobre suelos, se podrá emplear mapas hipsométricos o llevar a cabo una fotointerpretación de tipo rápido (geomorfológica o fisiográfica). Por supuesto, en este caso el grado de precisión será bastante bajo.

Con la finalidad de simplificar la interpretación de las variables fisioedáficas por los utilizadores de los mapas de zonificación, se recomienda hacer una jerarquización de las unidades cartográficas de suelo en función de su aptitud para el cultivo considerado. Las tres categorías que se emplean con más frecuencia son las siguientes: (1) muy buena, (2) buena y (3) regular.

3.7.5 Quinta etapa: Elaboración de mapas de componentes

Esta etapa se inicia con la confección de un mapa base que pueda ser reproducido en copias transparentes. La etapa en sí consiste en dar una expresión cartográfica a las variables ecológicas (agroclimáticas y edáficas) analizadas en las etapas previas, considerando los límites dados por los tipos agroecológicos. Como ejemplo de estos tipos de mapas que pueden ser trazados, se citan los siguientes:

3.7.5.1 Mapas de variables térmicas: Isotermas promedio anual, Isotermas promedio para los períodos vegetativos del cultivo considerado, Isotermas de máxima e Isotermas de mínimas.

3.7.5.2 Mapas de variables hídricas: Isoyetas totales para los períodos vegetativos del cultivo considerado, número de meses eco-secos, Iso-líneas de excesos hídricos e Isolíneas de deficiencias hídricas.

3.7.5.3 Mapas de combinación de variables: Isolíneas de la duración de época de siembra, Isofanos de fechas de siembra e Isofana de cosecha, etc.

3.7.5.4 Mapas de variables fisio-edáficas: Categorías de capacidad de uso de la tierra y Categorías de uso potencial de la tierra. En esta etapa se procura confeccionar los mapas de componentes en una escala cartográfica uniforme.

3.7.6 Sexta etapa: Síntesis cartográfica sucesiva

Esta etapa consiste en hacer una síntesis con los mapas de componentes elaborados en la etapa precedente. El número de mapas que se emplean está dado por el grado de detalle que se desee dar al estudio, que a su vez estará relacionado a la escala cartográfica empleada.

El método más simple de llevar a cabo esta etapa, es mediante el uso

de una técnica empleada frecuentemente en ciencias geográficas, la que se denominan de síntesis cartográfica sucesiva. Esta síntesis cartográfica puede ser llevada a cabo por métodos manuales o por métodos de síntesis modernos con la ayuda de computadoras.

La síntesis cartográfica sucesiva consiste, como su nombre lo indica, en la superposición y síntesis sucesiva de los mapas de componentes. Por lo general en el esquema metodológico propuesto se trabaja en dos fases: la primera que conduce a la síntesis de mapas factoriales agroclimáticos, que dará como resultado la definición de las áreas agroclimáticas para el cultivo (primera aproximación) y la segunda que corresponde a la adición a esta síntesis agroclimática, de las variables fisio-edáficas (segunda aproximación) alcanzando de esta manera la definición de unidades de zonificación ecológica del cultivo.

3.7.7 Séptima etapa: Presentación de resultados

Esta etapa consiste en la elaboración final de los mapas e interpretaciones respectivas. Para la confección de los mapas finales se hará el diseño correspondiente para la organización del material cartográfico, textos y leyendas que acompañas al documento.

En el marco de los proyectos de zonificación que el Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas está llevando a cabo se ha adoptado algunas pautas para la presentación de los mapas finales. Así, la zona agroclimática general será delimitada por un trazo continuo grueso, las subdivisiones térmicas por un trazo fino cortado y las hídricas por uno fino punteado. Las subdivisiones fisioedáficas son indicadas mediante trazos finos continuos.

En el caso de una segunda aproximación y un primer nivel de precisión

agroclimática, las unidades delimitadas fueron caracterizadas por un quebrado, en cuyo denominador, que representa las variables agroclimáticas, se encontrarán dos cifras, la primera correspondiente a la categoría térmica y la segunda a la hídrica. En el denominador se encontrará, a la izquierda, una cifra que indica la categoría fisioedáfica y una letra que indica las posibles limitaciones que deberían ser tomadas en cuenta para el manejo eficiente del suelo.

Al trabajar con niveles de mayor precisión el quebrado en cuestión contendrá varias cifras correspondientes a las variables agroclimáticas empleadas. Aproximadamente, el número será de cuatro variables como mínimo.

Con la finalidad de hacer más accesible la interpretación por los utilizadores de las unidades de zonificación ecológica, se hace una jerarquización de las diversas unidades. Las categorías indican el margen de probabilidad para la obtención de rendimientos. Al presente se contemplan las siguientes categorías:

- 1) Muy alta probabilidad de obtener buenos rendimientos
- 2) Alta probabilidad de obtener buenos rendimientos
- 3) Regular probabilidad de obtener buenos rendimientos
- 4) Baja probabilidad de obtener buenos rendimientos
- 5) Muy baja probabilidad de obtener buenos rendimientos.

3.8 Sistema de operación de las distintas etapas. El camino crítico.

Con objeto de representar la interrelación entre las distintas etapas, actividades y acontecimientos, para llevar a cabo la simultaneidad necesaria en el proyecto o futuros proyectos, se ha efectuado el análisis del sistema PERT, así como el cálculo del margen total y el margen libre

del tiempo en el desarrollo de las actividades. En la Figura 1 se presenta el diagrama de interrelación de actividades. En él se ha representado también el camino crítico. En el Cuadro 2 indicamos la fecha mínima, la fecha máxima y el margen para cada acontecimiento. Las actividades tienen una duración en semanas. Se refieren al tiempo necesario para llevar a cabo un proyecto típico con un equipo ágil de trabajo, para una área aproximada de 100.000 a 150.000 km² con suficiente densidad de estaciones y buen material cartográfico. El proyecto calculado se refiere a dos cultivos y a la aplicación de los tres niveles de precisión. En el diagrama de la Figura 1 se puede observar el tiempo parcial empleado para cada nivel de precisión.

3.9 Descripción del material de investigación

Para el desarrollo y consideración de la metodología propuesta se va a elegir un cultivo anual y región en estudio que en conjunto con distintas aproximaciones y niveles de precisión nos permiten exponer claramente dicho sistema a la vez que se abarcan los pasos necesarios para resolver el problema práctico en sí.

Para la zonificación de área y de línea se eligieron a la República de Costa Rica y ciertas áreas de la misma; como zonificación de punto o microunidad espacial se escogió al territorio venezolano de las localidades de Turen y Araure, ambos en el Estado Portuguesa. En sí las zonificaciones corresponden una a la segunda aproximación y primer nivel de precisión (A_2N_1) y la otra a la segunda aproximación pero con un segundo nivel de precisión (A_2N_2). La primera combinación en escala 1:500.000 y la segunda con escala 1:250.000. Con las localidades del Estado Portuguesa en Venezuela típicas de cultivos anuales de 'invierno'

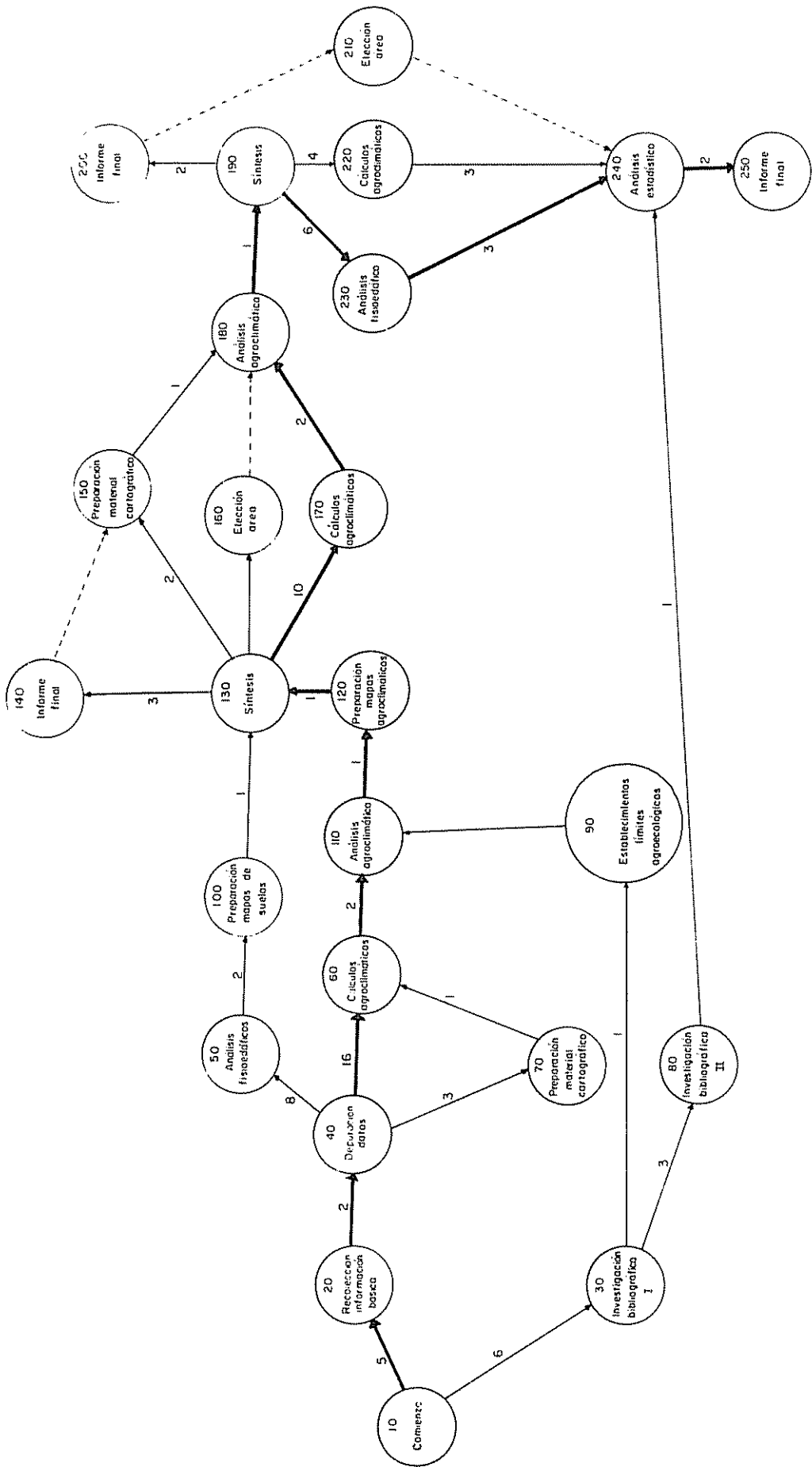


Fig. 1 PERT - camino crítico. Interrelación de los etapas del proyecto y tiempo de cada actividad.

Cuadro 2. Acontecimientos del proyecto, tiempos estimados, fechas mínimas y máximas de entrega y margen para cada actividad de acuerdo al PERT.

Acontecimiento Siguiete	Acontecimiento Precedente	t_e	Fecha mínima T_E	Fecha máxima T_L	Margen
250	240	2	51	51	0
240	210	0	42	42	7
240	220	3	47	49	2
240	230	3	49	49	0
240	80	1	10	49	39
230	190	6	46	46	0
220	190	4	44	46	2
210	200	0	42	49	7
210	190	0	40	49	9
200	190	2	42	49	7
190	180	1	40	40	0
180	150	1	31	39	8
180	160	0	27	39	12
180	170	2	39	39	0
170	130	10	37	37	0
160	130	0	27	39	10
150	140	0	30	38	8
150	130	2	29	38	9
140	130	3	30	38	8
130	120	1	27	27	0
130	100	1	18	27	9
120	110	1	26	26	0
110	90	0	7	25	18
110	70	1	11	25	14
110	60	2	25	25	0
100	50	2	17	26	9
90	30	1	7	25	18
80	30	3	9	48	39
70	40	3	10	24	14
60	40	16	23	23	0
50	40	8	15	24	9
40	20	2	7	7	0
30	10	6	6	24	18
20	10	5	5	5	0

se realizó el cálculo del tercer nivel de precisión agroclimática (N_3) como un desglosamiento de la zonificación de punto (A_3N_3).

Como cultivo anual se escogió el Phaseolus vulgaris en el caso de los estudios en Costa Rica. Para el tercer nivel de precisión puede adoptarse, en la investigación desarrollada, cualquier cultivo anual de ciclo más largo que el Phaseolus vulgaris. La información agroecológica del cultivo procede de la amplia revisión bibliográfica revisada y adaptada a las exigencias agroclimáticas. El material básico cartográfico, meteorológico y edáfico, proviene de fuentes secundarias (Servicios Meteorológicos, Instituto Cartográfico, Catastro y Ministerio de Agricultura).

El Phaseolus vulgaris es una de las plantas que con más frecuencia se emplea en la experimentación biológica, sin embargo, esta investigación es por lo general llevada a cabo en laboratorio con plantas aisladas, por lo cual los resultados son de difícil interpretación cuando se desea llevarla a la práctica en el campo para la producción económica. Las principales características ecológicas del frijol que pueden aplicarse en su zonificación ecológica se resumen a continuación.

3.10 Zonificación de área (segunda aproximación - primer nivel de precisión)

3.10.1 Requerimientos agroecológicos del cultivo. Primera etapa

3.10.1.1 Respuesta fotoperiódica

El P. vulgaris según Allard y Zaumeyer (2), es una planta que tiene bastante plasticidad, en relación a sus requerimientos fotoperiódicos. Tiene una gran cantidad de variedades que responden particularmente a días cortos o son fotoperiódicamente neutras. En el caso de variedades tropicales, el fotoperiodismo no debe considerarse como un problema de importancia. Los mismos autores, indican que en la búsqueda de una adaptación cosmopolita, que debe ser seleccionada en variedades

mejoradas de frijol, el aspecto de fotoperiodicidad no es muy limitante.

3.10.1.2 Respuesta térmica

Según diversos autores (6, 18, 75, 79, 82, 85), el rango térmico óptimo para el cultivo del frijol en regiones tropicales corresponde a valores de temperatura promedio mensual de 18,0°C a 24,0°C. Para variedades de latitudes más altas, autores como MacGillivray (59) señalan rangos de 15,5 a 21,5°C para medias mensuales. Los límites críticos máximos señalados en base a experimentos de laboratorio indican valores de 48,3 y 54,4°C y los mínimos de 2 y 3°C (79). Analizando la influencia térmica en las diferentes fases fisiológicas del desarrollo del P. vulgaris se puede observar que cada función fisiológica tiene sus exigencias bien definidas que se detalla a continuación.

Sobre la germinación como indica Box (6), el límite térmico inferior en el cual ya no se presenta germinación es de 8°C.

El crecimiento, según investigaciones realizadas por Dale (17), quien encontró que en plantas de frijol de 15 días de edad, los incrementos de temperatura encima de 25°C dieron como resultado un mayor número de hojas, así como un incremento de área foliar total de cada planta. La relación área foliar a 25,0°C fue cerca del doble, que a 15,0°C. Esta observación sugiere, que los efectos térmicos son independientes de la luz, en vista de que las temperaturas diurnas y nocturnas tuvieron efectos similares en este experimento; sin embargo, este efecto fue obtenido con un sólo nivel de longitud del día (12 horas). Este mismo autor hizo otro experimento en el cual las plantas de frijol crecieron en intervalos de longitud del día, desde una hora hasta iluminación continua, y a temperaturas de 15,0 y 25,0°C, encontrándose diferencias significativas en el área foliar total

y en el área de las hojas individuales, así como una relación en un efecto cuadrático con la radiación total recibida por día.

Con respecto a la floración, Box (6) indica que la temperatura más baja con la cual se presenta ésta es de 15,0°C. Por otra parte Viglierchio y Went, citados por Stobbe et al. (82), encontraron que a temperaturas entre 24,0 y 30,0°C el frijol no florecía; este resultado no concuerda con el de Stobbe et al. (82), que sugieren que la temperatura puede estar en interrelación con el fotoperíodo o intensidad de la luz, en cuanto al ciclo reproductivo del frijol se refiere.

Viglierchio y Went, citados por Stobbe et al. (82), indican que la fructificación del frijol de tipo indeterminado es cíclica y que este tipo de fructificación se incrementa conforme la temperatura nocturna también lo hace. Stobbe (82) indica que los ciclos dependen de la temperatura de esta forma, a temperaturas entre 15,5 y 24°C encontraron dos ciclos de 60 días y tres ciclos en temperaturas de 21,0 y 29,0°C. A temperaturas entre 26,5 y 35,0°C no se presentaron ciclos evidentes. Por otra parte, determinaron que el tiempo entre la floración y la cosecha de vainas está influenciado por la temperatura; entre 15,5 y 24,0°C, el subperíodo floración-cosecha se llevó a cabo en 11 días, mientras que con temperaturas de 21,0 a 29,0°C el mismo subperíodo se redujo a 9 días.

Los autores mencionados anteriormente indican que las vainas formadas entre 26,5 y 35,0°C presentaron un porcentaje elevado de granos vacíos. En este caso el fruto era pequeño y deforme, y con poca turgidez. Resulta dos parecidos obtuvo Davis (18), quien encontró que existe una correlación negativa entre la temperatura máxima y el porcentaje de semillas que cuajan. Así por cada grado de temperatura máxima que sobrepasa a 24°C disminuye el

porcentaje de semillas en un 3,24 por ciento.

Por otra parte, la duración del período vegetativo, en relación con la temperatura, además de lo indicado para el subperíodo floración-cosecha, Guerrero (45) indica sobre la prolongación del período vegetativo con la disminución de la temperatura, tanto para variedades precoces, como para las tardías. Las variedades más precoces cuyo ciclo fluctúa en zonas alrededor de 60 días, en zonas de mediana altura alcanza a completar 90 días y en alturas de más de 2000 msnm es necesario más de 250 días.

3.10.1.3 Respuestas hídricas

En relación a los requerimientos hídricos del P. vulgaris, Cardona (13) indica que una buena cosecha se puede obtener con una precipitación de 300 a 400 mm durante el ciclo de la planta. Pudiendo llegar a 200 mm solamente (26). Es necesaria, sin embargo, una buena distribución de la lluvia.

Por otra parte, Cardona (13) indica que una precipitación de 110 a 180 mm entre la siembra y la floración contribuyen a una buena cosecha, y que la precipitación más conveniente durante la época de floración debe estar comprendida entre 20 y 70 mm. Por otra parte también se indica que el rendimiento del frijol se reduce cuando se presentan cortos períodos de sequía 15 días antes de la floración y 15 a 22 días antes de la maduración de las primeras vainas y una vez iniciado el proceso general de maduración.

Los índices agroclimáticos para el frijol con referencia a un balance hídrico durante el ciclo del cultivo son los publicados por García B. (26), los cuales se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Índices agroclimáticos que corresponden a la intensidad de la humedad y la sequía para Phaseolus vulgaris.

Deficiencia de agua mm	Exceso de agua mm	Denominación
100 ⁺	0	Muy seco
20 ⁺ a 100 ⁻	0 a 20 ⁻	Subhúmedo seco
0 a 20 ⁻	0 a 20 ⁻	Subhúmedo
0 a 20 ⁻	20 ⁺ a 70 ⁻	Subhúmedo húmedo
0	70 ⁺	Muy húmedo

Las subdivisiones más adecuadas para el cultivo del frijol son la subhúmeda y la subhúmeda seca pudiéndose desarrollar también bajo las condiciones que imperan en las otras subdivisiones (26).

3.10.1.4 Respuestas edáficas

La mayoría de los autores coinciden en indicar que el frijol requiere suelos fértiles con buen contenido de materia orgánica. Con relación a la textura del suelo también hay concordancia de criterio. En el Cuadro 4 se observan las opiniones de algunos autores.

Por lo general requiere suelos con buena aereación y drenaje, ya que el cultivo tolera bastante mal los suelos compactos y con poca aereación.

Con respecto al pH, los autores indican que por lo general encima de valores de 5,3 se pueden obtener buenos resultados. En el Cuadro 4 se observan diversas opiniones.

Cuadro 4. Texturas de suelo y pH indicados como óptimos para el cultivo del frijol.

Autor	Textura recomendada	pH
Sáenz Maroto (79)	areno-arcillosa	Neutro a moderadamente ácido
Klages (54)	franco	_____
Pinchinat (75)	franco arenosa limo arenosa franco arcillosa	5,8 a 6,5 en áreas húmedas 6,0 a 7,5 en áreas semiáridas y áridas
Vieira (91)	-----	6,0 a 7,5 (en algunos casos buenos rendimientos con pH hasta de 5,0)
Ehompson y Kelly (85)	-----	5,3 a 6,0 en Norfolk 5,5 a 6,0 en Florida

En relación a elementos químicos, Sáenz Maroto (79) indica que el cultivo requiere suelos con buen contenido de fósforo, potasio y calcio. Por lo general es difícil observar síntomas de deficiencia de elementos menores, siendo muy sensible a la presencia de altas concentraciones de aluminio y manganeso soluble.

3.10.2 Estimación de elementos meteorológicos necesarios para el análisis agroclimático. Segunda etapa.

3.10.2.1 Estimaciones térmicas

La estimación de elementos meteorológicos, sobre todo en lo referente a temperatura, se hace necesario para la mayoría de las regiones tropicales debido a la escasez de estaciones observadoras. La elaboración de mapas de isotermas a partir de datos reales, ve menguada su precisión

por la falta de valores observados.

Las técnicas más frecuentemente empleadas para la estimación de la temperatura son:

- 1) Interpolación de isotermas reales
- 2) Cálculo de la temperatura en función de la ecuación altotérmica o gradiente medio
- 3) Cálculo de la temperatura en base al gradiente mediano y a partir de isotermas rectilíneas reducidas al nivel del mar.

Debido a la escasa red termométrica, se desecha el uso de isotermas reales y se procede a efectuar las estimaciones por los otros métodos.

En Costa Rica se han seleccionado 142 estaciones y puestos pluviométricos (Cuadro 5) de los cuales sólo 73 presentaban observaciones de temperatura siendo necesario estimar dicho parámetro a las restantes. Dicho país presenta características geográficas ideales para este tipo de estudio, como son la disponibilidad de dos vertientes definidas por una cordillera central continua de altura adecuada y una cierta densidad de estaciones; que si bien no es muy numerosa tampoco presenta características dramáticas. El modelo de relación altotérmica se estableció por medio de una ecuación lineal entre la temperatura y la altura sobre el nivel del mar para las estaciones previamente agrupadas en regiones climáticas homogéneas: Pacífico Norte, Pacífico Sur, Meseta Central, Atlántico Norte y Atlántico Sur. Asimismo se efectuó el cálculo del gradiente mediano propuesto por De Fina y Sabella (21) para regiones montañosas, la triangulación termométrica de la región en estudio, y el trazado de isotermas rectilíneas al nivel del mar (Figura 2).

CUADRO 5. UBICACION GEOGRAFICA Y ALTURAS INDICES CLIMATICOS Y AEROMETRICOS DE LAS ESTACIONES DE ESTUDIO

Table with columns: Estación, Latitud, Longitud, Altitud, Med. Anual + caliente + frío, Régimen Térmico, Humedad relativa, Precip., Régimen Hídrico, Def. Exc., No. meses con seco, No. meses con Exc., Índice Hidrológico. The table lists 49 weather stations across various geographical locations, providing detailed climatic and hydrological data for each.

Estación	Coordenadas		Regimen Térmico		Humedad Rela-tiva	Regimen Hídrico		Ho. meses Eco- con Def.		Indice Hidrolo-gico		
	Latitud	Longitud	Med. Anual	Med. mes + caliente		Med. mes + frío	Oscila-ción	Precep.	S.P.F. E.T.H.		Def.	Exc.
Moravia de Chirripó	9°51'	83°25'	20,9	21,7	19,5	2,2	2,458	1,048	1048	0	1410	134
Mazata	10°04'	84°36'	25,4	26,2	24,8	1,4	3,279	1,586	1202	384	2077	116
Naranjo	10°06'	84°22'	21,7	22,1	21,3	0,8	2,435	1,305	997	308	1438	96
Naranjo de Lepanto	9°56'	84°57'	26,7	27,1	26,2	0,9	2,281	1,018	1234	684	1043	33
Navarro	9°46'	83°51'	20,0	21,0	18,8	2,2	1,779	1,074	950	124	929	70
Micoya	10°09'	85°27'	27,0	28,6	25,7	2,9	2,262	1,926	1202	737	1061	32
Mievocita	9°33'	82°43'	26,1	26,7	25,2	1,5	2,335	1,556	1555	1	980	50
Nuevito	9°47'	84°16'	22,8	23,4	22,1	1,6	1,970	1,423	1074	349	896	48
Ojo de Agua (P.Z.)	9°37'	83°48'	11,8	13,3	10,3	3,0	1,736	1,472	1061	411	675	29
Ojo de Agua (Sn.R.)	9°58'	82°13'	8,50	23,7	21,7	2,2	2,038	1,150	1063	87	975	80
Orosi (La Maruja)	9°48'	83°51'	20,6	21,7	19,5	2,2	2,402	1,924	1238	686	1164	39
Orotina	9°57'	84°31'	27,2	29,1	26,3	2,8	2,301	1,182	1182	2	1547	131
Paeyas	9°55'	83°42'	17,3	18,1	15,9	2,2	2,727	1,717	1887	216	2224	123
Paeyare	9°49'	83°30'	22,3	24,0	21,5	2,5	3,711	1,703	918	415	1120	65
Palmar Sur	8°57'	83°28'	26,3	27,4	25,3	2,1	2,038	1,333	822	44	786	48
Palmares	10°04'	84°25'	21,6	22,7	20,4	2,3	2,708	1,566	1822	884	876	92
Pandora	9°45'	83°57'	25,3	27,3	24,7	2,6	1,702	884	876	8	828	0
Paraiso	9°50'	83°52'	19,0	19,7	17,8	1,9	2,921	1,277	1297	404	1502	125
Peralta	9°58'	83°37'	36,8	37,6	35,0	1,5	2,824	1,745	1341	404	1502	17
Peralta	9°31'	84°20'	22,8	25,8	24,0	3,6	1,780	1,689	1198	313	1787	120
Peñas Blancas	11°13'	85°38'	88,9	26,7	25,0	1,7	3,178	1,704	1391	313	1787	4
Peñares	9°31'	84°15'	26,0	26,7	24,2	2,4	3,571	1,688	1807	181	2064	116
Pozo Norte	8°37'	83°32'	26,3	27,2	25,2	2,0	1,673	1,983	1220	763	1453	2
Puerto Huma	10°19'	85°22'	11	29,7	28,0	3,7	1,443	1,614	1614	0	2523	157
Puerto Viejo	10°26'	83°59'	89	27,4	25,2	2,4	1,443	1,614	1614	895	1381	13
Puntarenas	9°58'	84°50'	3	28,5	27,7	2,2	2,422	2,106	1211	206	1361	98
Puntarenas	9°51'	84°19'	110,2	21,9	21,3	1,2	4,126	1,603	1528	75	2598	159
Playa Blanca	8°38'	83°27'	3	26,4	25,3	2,1	2,515	1,158	1153	5	1362	117
Playanillo	9°46'	83°33'	88,9	22,7	20,0	2,7	3,698	1,750	1597	153	2101	115
Quebrada Arenas	8°33'	83°00'	4	26,8	24,1	3,4	3,529	1,598	1563	35	1966	170
Quebrada Azul	10°24'	84°28'	83	26,1	24,1	3,4	2,350	1,477	1085	392	1255	122
Quebrada Grande	10°20'	85°30'	400	23,4	22,3	3,4	2,855	1,586	1492	194	2341	144
Quepos	9°28'	84°09'	5	26,3	24,3	1,5	3,833	1,586	1492	112	1756	187
Rancho Redondo	9°57'	83°56'	17,6	19,2	16,0	3,2	2,547	1,503	791	112	1756	7
Repunta	9°18'	83°39'	580	24,3	23,0	2,0	4,267	1,514	1291	223	1376	82
Rincoén	8°41'	83°30'	10	26,4	23,3	2,1	4,120	1,644	1537	107	1583	153
Riño Inca	8°29'	83°01'	18	27,1	25,8	2,1	2,771	1,780	1583	197	1524	179
Riño Macho	9°48'	83°50'	15,2	19,5	16,8	2,7	2,771	1,780	1583	0	1993	320
Riño Naranjo	10°42'	85°07'	23,6	25,0	22,7	2,3	2,133	1,408	1276	132	857	55
Riño Piedras	10°34'	84°59'	22,2	23,2	21,2	2,3	2,740	1,187	1168	29	1591	133
Sábalo	8°20'	83°03'	24	27,3	25,8	2,1	2,905	1,643	1570	273	1335	64
Sanctorio Durán	9°56'	83°52'	237	27,1	24,0	2,1	1,549	1,460	1014	446	535	18
Santa Ana	9°56'	84°09'	909	23,1	22,1	2,4	1,500	1,460	1014	446	535	5
San Clemente	9°49'	82°55'	6	26,0	25,1	1,5	2,934	1,583	1576	7	1358	85
Santa Cruz	10°16'	85°37'	54	27,7	26,6	3,0	1,978	2,060	1169	891	809	13
Sto. Domingo del R.	10°04'	84°09'	1359	29,4	26,4	3,0	3,080	1,034	970	64	2110	200
Sto. Isidro del G.	9°22'	83°42'	704	23,8	23,4	1,2	2,939	1,518	1213	305	1726	102
Sn. Joaquín Flores	10°01'	84°08'	1051	24,6	21,4	2,4	1,203	1,311	985	326	1118	70
Sn. Josécito	10°01'	84°15'	860	23,0	22,1	2,1	1,901	1,551	1013	538	888	36
San José	9°56'	84°05'	172	24,2	22,1	2,1	1,941	1,179	914	265	1027	73
San Marcos Farrasá	9°40'	84°02'	20,8	21,6	19,6	2,0	1,987	1,071	850	221	1137	7
Sn. Miguel Barranca	10°07'	84°41'	140	27,5	26,5	1,5	2,173	2,061	1311	750	862	20
Sn. Rafael de Póas	10°05'	84°29'	1155	21,8	20,0	3,0	3,164	1,206	922	284	2242	172
San Ramón	8°29'	83°00'	1052	21,3	20,7	1,8	1,765	1,334	932	402	833	44
Sn. Vito de Java	8°23'	84°02'	200	22,2	21,6	1,3	4,003	1,181	1175	6	2859	239
Sarapiquí-Magsaysay	10°03'	84°02'	20,8	25,6	23,4	2,2	4,033	1,451	1451	0	2061	178
Siquirres	9°58'	84°28'	28	28,5	23,6	2,0	3,510	1,449	1449	0	2061	142
Socorrito	9°58'	84°42'	60	29,9	27,7	2,2	1,924	2,190	1281	909	643	2
Tacacó	10°03'	84°13'	1950	23,0	21,1	2,1	2,680	1,283	1023	260	1967	7
Tapanti	9°47'	83°48'	1293	23,2	20,3	1,7	2,527	1,110	1078	32	1449	141
Taraca	9°50'	84°06'	1777	22,4	20,3	1,7	2,173	1,817	1737	80	1436	170
Tierra Morena	10°34'	85°03'	660	18,4	16,3	2,1	2,173	1,817	1737	144	956	62
Tullarán	10°28'	84°59'	560	23,7	21,3	4,1	2,330	1,478	1334	227	954	3
Turrialba	9°53'	83°38'	602	22,3	22,2	2,3	2,190	1,458	1231	227	954	56
Turricares	9°58'	84°19'	640	26,3	24,0	2,2	2,403	1,232	1227	5	1176	95
Tres Ríos	9°53'	83°59'	1320	25,0	24,0	2,2	1,821	1,692	1106	586	718	22
Vera Blanca	10°10'	84°10'	1804	19,3	18,0	2,1	3,250	633	633	0	2617	413
Villa Mills	9°34'	83°24'	3096	10,5	9,5	2,0	3,316	1,635	1420	218	1896	108
Volecón Buenos Aires	9°14'	83°27'	450	25,8	26,5	1,1	2,240	916	730	186	1510	154
Zarecero	10°11'	84°24'	1735	18,1	17,6	1,2	3,509	1,544	1444	0	1945	127
Zent	10°02'	83°16'	34	25,7	24,3	1,5						

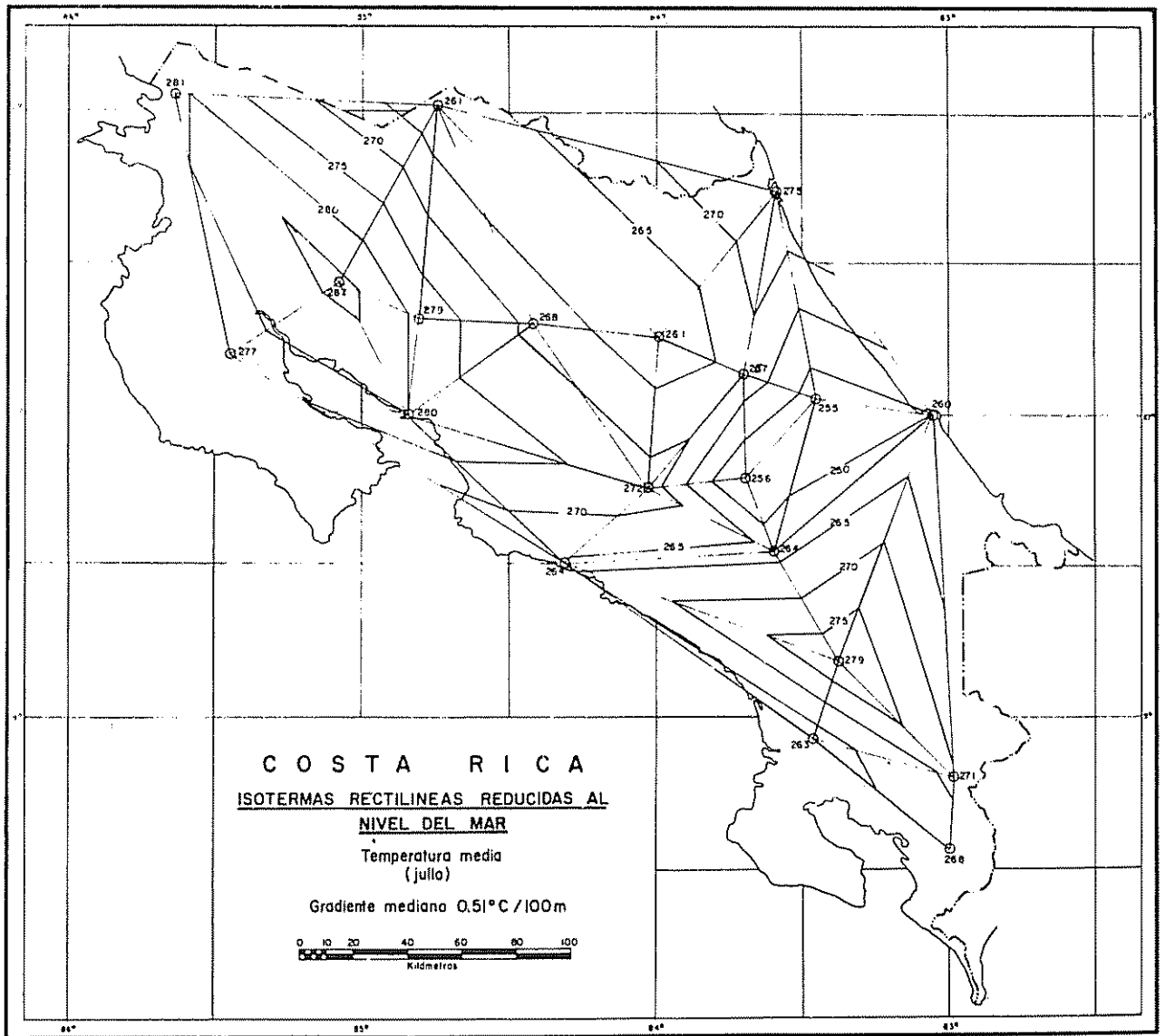


Fig 2 Isotermas rectilíneas reducidas al nivel del mar Temperatura media para julio en Costa Rica

En el segundo caso se seleccionaron para cada una de las macro regiones climáticas cinco estaciones (una rodeada de las otras cuatro), con registros confiables y que representen un amplio rango altitudinal, que suman una distancia en línea recta, desde la estación central á las cuatro restantes menor de 700 km y que, además, las cuatro distancias sean lo más uniforme entre sí. En varios casos, las estaciones seleccionadas fueron comunes a dos macro regiones, por presentarse cerca o sobre el límite de éstas, llegándose de esta manera a emplearse los registros de 20 estaciones en vez de 25.

La comparación entre las temperaturas estimadas y las observadas por ambas técnicas fue analizada por dos métodos estadísticos. Se utilizó el análisis de la variancia para detectar diferencias entre ambos valores y el análisis de regresión para comparar el grado de coincidencia o divergencia en la tendencia entre las parejas de valores observados y estimados. Para la comparación entre ambas técnicas de estimación térmica, se tomó en cuenta el grado de asociación entre los valores observados y estimados en cada uno de los métodos y finalmente se estimó la eficiencia relativa de la técnica primera contra la segunda.

3.10.2.2 Estimaciones de humedad relativa

Como se verá más adelante, durante la etapa del análisis agroclimático, el uso de la fórmula elegida para el cálculo de la evapotranspiración potencial lleva como uno de sus requisitos el conocimiento de la humedad relativa. Es este un elemento del clima poco observado en las estaciones meteorológicas del trópico; además, por lo general, cuando se hacen medidas de este elemento, son deficientes. Sin embargo, tiene en estudios agroecológicos una gran importancia ya que como estimativo del

déficit de saturación hídrica, interviene en el régimen de consumo de agua por las plantas.

La humedad relativa es un parámetro poco conocido desde el punto de vista geográfico, por lo cual su expresión cartográfica es en la práctica muy difícil de realizar. Este elemento varía según las horas del día, la época del año, la latitud y la altitud principalmente.

Según la altura no existen leyes que gobiernen su variación, por lo cual no se pueden establecer gradientes. Según la latitud, sus variaciones son muy irregulares; sin embargo, se sabe que sus variaciones están calcadas a las de la precipitación pluvial, considerando valores generales. Para su distribución a lo largo del año se puede ver que su variación es más o menos intensa dependiendo de las épocas secas o lluviosas. Las variaciones horarias de la humedad relativa dependen de las condiciones micro y macroclimáticas (precipitaciones y efectos térmicos localizados, etc.).

De los puntos citados anteriormente, se puede concluir que las variaciones de la humedad relativa están relacionadas sobre todo con el régimen de precipitaciones, elemento para el cual por lo general se dispone de mediciones. De modo que sería de gran valor desarrollar una técnica que permita estimar la humedad relativa en función del régimen pluvial, en sus variaciones de precipitación total anual, mensual y duración del período ecoseco.

De las estaciones empleadas en el estudio general que aparecen en el Cuadro 5, solamente 13 presentaron registros de humedad relativa (Cuadro 6) encontrándose distribuidas en un amplio rango de alturas y precipitaciones pluviales.

Cuadro 6. Localización, altura sobre el nivel del mar, humedad relativa, precipitación y duración de la estación seca, de las estaciones consideradas.

Estación	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (m)	Humedad Relativa anual (%)	Precipitación anual (mm)	Estación Ecoseca (meses)
Buena Vista (Alfaro Ruíz)	10°17'	84°28'	1090	92	2828	0,0
Cañas (Guanacaste)	10°25'	85°07'	95	74	1537,	5,0
El Alto (Ochomogo)	9°53'	83°57'	1490	83	1800	3,7
El Coco (Alajuela)	9°59'	84°13'	920	79	1798	4,2
La Lola (Siquirres)	10°06'	83°25'	39	89	3501	0,0
Los Diamantes (Guápiles)	10°13'	83°46'	300	88	4280	0,0
Puntarenas (Puntarenas)	9°58'	84°50'	3	79	1414	4,8
San José (San José)	9°56'	84°05'	1172	82	1768	3,9
San Josecito (Alajuela)	10°01'	84°16'	840	75	1819	4,3
Santa Ana	9°56'	84°09'	905	81	1561	4,3
Santa Ana (San Joaquín)	9°56'	84°09'	909	78	1743	4,2
Sarapiquí (Magsaysay)	10°23'	84°02'	200	88	4205	0,0
Turrialba (I.I.C.A.)	9°53'	83°38'	602	88	2436	0,0

Para establecer las relaciones entre las distribuciones mensuales de la precipitación pluvial y de la humedad relativa para cada una de las 13 estaciones consideradas, se ajustó un modelo de regresión lineal.

Para detectar la influencia del período seco y de la precipitación total anual sobre estas relaciones, se estableció la regresión entre estas variables y la pendiente de cada recta. De la misma manera se estableció la regresión entre los mismos parámetros y la ordenada al origen. El período seco fue definido según el principio de Gausson (41). Así se obtuvieron dos ecuaciones, a partir de las cuales se puede estimar el valor de la pendiente y la ordenada al origen de una recta que junto con los valores de precipitación mensual de una localidad, permiten estimar, para ésta, la humedad relativa.

3.10.3 Análisis agroclimático. Tercera etapa.

El análisis agroclimático pretende discriminar las áreas aptas para el desarrollo del cultivo; entre los índices empleados van a figurar un índice térmico y uno hídrico. El índice hídrico o derivado del estudio del régimen hídrico proviene del cálculo de las magnitudes del exceso de agua en el suelo y de la deficiencia de agua en el mismo. Se hizo necesario entonces, estimar la evapotranspiración potencial. Para ello existen una gran cantidad de fórmulas climáticas empíricas más o menos acertadas y precisas que nos permiten solucionar el problema. Entre ellas son pocas las que pueden aplicarse en condiciones tropicales, debido a que fueron generadas en latitudes medias. Los valores estimados en el trópico con dichas fórmulas, presentan una baja correlación y gran distanciamiento de los valores observados de ETP o del tanque A. Es por ello que nos inclinamos en el caso de Costa Rica, a usar la fórmula propuesta por García B.

y López (30), que parece ajustarse mejor en condiciones tropicales (30, 56).

Dicha fórmula tiene la siguiente expresión:

$$ETP = 1,21 \times 10^{\frac{7,45t}{234,7 + t}} \times (1 - 0,01 HR) + 0,21t - 2,3$$

donde:

ETP = evapotranspiración potencial en mm/día

t = temperatura media mensual

HR = humedad relativa media de las horas diurnas

$$\text{aproximadamente } \frac{HR_{0800} + HR_{1400}}{2}$$

Para el cálculo del balance de agua en el suelo se procedió según las normas propuestas por Thornthwaite y Mather (86), excepto que el almacenaje de agua en el suelo se calculó de acuerdo con las propiedades físicas del mismo, para cada localidad de la cual se tenía información, eliminando el uso de tablas que proponen los autores anteriores. Para el cálculo del almacenaje de agua en el suelo se procedió de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\text{Agua útil} \quad a = \frac{CC-PMP}{100} \times da \times P$$

$$\text{Agua total} \quad a = \frac{CC}{100} \times da \times P$$

donde:

a = almacenaje en cm

CC = capacidad de campo en %

PMP = punto de marchitez permanente en %

da = densidad aparente en g/cm³

P = profundidad radicular del cultivo en estudio en cm

En el primer nivel de precisión agroclimática se va a considerar los valores promedio mensuales de la serie de años disponible en cada localidad. De esta manera del balance de agua en el suelo se obtendrán las magnitudes de la deficiencia y al exceso de agua en sus valores promedios, pudiendo ubicar en el transcurso de los meses la época conveniente para el desarrollo del cultivo y detectar si fuera nuestro interés, las fluctuaciones de dichos excesos y deficiencias durante los meses del ciclo.

Se había hablado anteriormente que en el primer nivel de precisión agroclimática era necesario trabajar con una variable que fuera representativa de varias otras de tal manera que con su simple inclusión se obtuviera mejor detalle en la discriminación de las áreas. La variable agroclimática elegida para este caso, es la duración de la época de siembra. Esta variable nos indica el lapso durante el cual se puede sembrar, entendiendo que las condiciones agroclimáticas permiten que pueda efectuarse la cosecha. Para ello es necesario estudiar las acumulaciones de los excesos y deficiencias de agua durante un ciclo posible de acuerdo a los índices agroecológicos del cultivo definidos en la primera etapa y si guiendo normas y advertencias derivadas de la primera etapa:

- 1) La deficiencia de agua acumulada no debe ser superior a 100 mm
- 2) El exceso de agua acumulada no debe ser superior a 100 mm
- 3) De existir deficiencia en el período con posibilidades de siembra esta deficiencia deberá ocurrir al final
- 4) El tipo ideal de ciclo buscado es aquél donde el exceso decrece hacia el final sin perjuicio de que el déficit aumente siempre y cuando no pase del límite establecido.

3.10.4 Análisis fisioedáfico. Cuarta etapa.

Los documentos que tienen información asequible de inmediato para su utilización en los proyectos de zonificación son muy escasos. Los relativos a la descripción de la capacidad de uso o de uso potencial de la tierra se ajustan bien a estos propósitos. Para Costa Rica se ha con-siderado el trabajo de Coto y Torres (16) y el de Plath (77).

En esta etapa hubo necesidad de designar un valor a cada una de las unidades cartográficas de los mapas, en función de su aptitud para el cul-tivo del frijol. Se logró designar tres categorías que son las siguientes: 1) Muy buena, 2) Buena, y 3) Regular. Además, como información adicional, se indicó cuando esto fue posible, el tipo de restricción de cada unidad. Se indicaron las siguientes restricciones: drenaje deficiente (d), pendiente excesiva que requieren prácticas de manejo (e) y suelos de tex-tura pesada (d).

Las categorías anteriores engloban a su vez las siguientes áreas de uso potencial de la tierra:

- I-A Areas planas o casi planas de origen aluvial con suelos livianos de textura franca o franco arenosa; responden bien a la aplicación de fertilizantes, son aptas tanto para cultivos anuales como para cultivos permanentes y ganadería intensiva; requieren el empleo de métodos sencillos de conservación.
- I_{Pa} Areas planas o casi planas de origen aluvial, con suelos livianos de textura franca o franco-arenosa, responden bien a la aplicación de fertilizantes. Son aptos principalmente para cultivos permanentes y ganadería intensiva; requieren el empleo de métodos sencillos de conservación. En estas

tierras, con el uso de los sistemas corrientes de cultivo, no se recomienda la siembra de cultivos anuales en la vertiente Atlántica.

I-P_p Areas planas o casi planas, de origen aluvial, con suelos ligeramente pesados de textura limosa a limo-arcillosa. Son aptos básicamente para cultivos permanentes y ganadería intensiva, teniendo alguna limitación para cultivos anuales. Requieren de facilidades de drenaje y el empleo de métodos sencillos de conservación.

I-P_s Areas de lomcríos bajos, con suelos de ligeramente pesados a pesados de textura arcillosa a arcillo-limosa; requieren el empleo de métodos sencillos de conservación.

3.10.5 Elaboración de mapas de componentes: Quinta etapa.

En esta etapa se expresan cartográficamente las distintas variables analizadas. Para este estudio se emplea una escala cartográfica 1:500.000. El fondo cartográfico empleado corresponde al mapa oficial de Costa Rica.

Los factores o variables para los cuales se elaboran mapas de componentes, varían según el cultivo a zonificar; en el caso del Phaseolus vulgaris fue necesario hacer una selección de variables, teniendo en cuenta la importancia de cada una de ellas, para el establecimiento del cultivo. El número de variables a emplear también depende de la escala cartográfica del trabajo, ya que en el momento de la síntesis cartográfica, que es la etapa posterior, no podrá recargarse el mapa final para permitir una mayor claridad.

El trazado de las isolíneas para la elaboración de los mapas componentes

o variables climáticas y agroclimáticas, presentan las dificultades ya conocidas por los analistas. Es necesario tanto el conocimiento teórico del elemento a analizarse como sus variaciones en el espacio y en el tiempo para la zona en estudio, así como el conocimiento de otros elementos y factores interrelacionados del clima. En este caso las variables más importantes son las hídricas.

Los valores de exceso y deficiencia son unidos mediante isolíneas analizadoras que por proceder del régimen hídrico y depender éste básicamente de las precipitaciones, podrán ser trazadas siguiendo pautas similares a las usadas en el trazado de isoyetas. Se debe utilizar el criterio de la relación estrecha con la forma topográfica (inclinación y extensión de las pendientes) que se opone a las corrientes generales y da lugar a la evolución de circulaciones locales. Estas circulaciones forman sistemas cerrados, dentro de los cuales los valores medios en unos puntos definen el grado de evolución y permiten la interpolación entre los lugares de medición. De esta manera, se establece por medio de los datos, organizados sistemáticamente, la interacción entre la evolución de los procesos atmosféricos y las diversas formas de la fisiografía.

Una vez definida esta interacción, se emplea en la misma forma sobre regiones, de las cuales se conoce la topografía meteorológicamente efectiva, tomando como hipótesis que con formas topográficas semejantes, son semejantes las modificaciones de los procesos (38). Las isolíneas se ciñen a la topografía meteorológicamente efectiva correspondiendo a los fondos y a las cimas la menor precipitación, mientras que en un nivel topográfico intermedio encontramos precipitaciones elevadas. En este nivel intermedio actúan las circulaciones diurnas (lluvias desde las cimas) o las nocturnas

(lluvias desde los fondos hacia las vertientes). Trojer (87) indica que estas tendencias se observan en condiciones tropicales típicas de varios países sudamericanos, y por ende también en Costa Rica.

3.10.5.1 Mapas hídricos

Se elaboran como material básico de ayuda y reconocimiento los mapas de excesos y deficiencias de agua, provenientes del cálculo del ba lance de agua en el suelo.

El mapa hídrico principal o derivado del régimen hídrico empleado en este trabajo fue como se indicó anteriormente el relativo a la duración de la época de siembra. Si bien deriva del régimen hídrico, pues estos valores se obtuvieron contabilizando excesos y deficiencias, el análisis de las isolíneas es más complicado por no ajustarse completamente a las consideraciones antes citadas.

Otro mapa de componentes relacionado con el régimen hídrico, ya que combina parámetros hídricos y térmicos, es el de la duración de la estación ecoseca. En este caso la estación tiene valores inferiores al valor duplicado de la temperatura. Este mapa fue empleado en la síntesis posterior, considerando zonas aptas para el cultivo del frijol, aquellas que tienen más de un mes ecoseco. La razón para emplear la información de este mapa fue que se considera indispensable disponer de una estación relativamente seca para obtener una mejor maduración de los frutos y facilitar la cosecha.

Generalmente existe concordancia entre la duración del período de siembra y la bondad de las condiciones para emprender el cultivo. Esta fue una razón para elegir como representativa del primer nivel de precisión a dicha variable. Las categorías de la duración consideradas son

las siguientes: 1) más de 60 días, 2) 30 a 60 días, y 3) 1 a 30 días.

3.10.5.2 Mapa térmico

Se elaboró empleando las curvas de nivel existentes en los mapas base teniendo en cuenta las relaciones térmico-altitudinales y las estimaciones obtenidas en la segunda etapa. Los valores observados de la temperatura también fueron representados en los mapas para servir de base real en el trazado de las isotermas. Estas corresponden a los índices térmicos definidos para el cultivo en la primera etapa y son 17,0, 20,0, 23,0 y 27,0°C. Estos valores corresponden aproximadamente, por la posición en el tiempo del ciclo del cultivo a la termofase negativa del termoperíodo anual.

3.10.5.3 Mapas de variables fisio-edáficas

De acuerdo con las categorías empleadas en el análisis fisio-edáfico, se elaboró un mapa a escala 1:500.000 donde fueron sustituidas las áreas de uso potencial por su correspondiente número jerárquico aplicable a la zonificación del frijol. Este mapa considera solamente las unidades señaladas en la cuarta etapa, indicando la categoría correspondiente, así como algunas de sus limitaciones. Se indican las limitaciones para que los usuarios del documento de síntesis final tomen en consideración, ya que puede ser un elemento básico en la evaluación de posibles costos para implantar el cultivo.

3.10.6 Síntesis cartográfica. Sexta etapa.

El procedimiento seguido en esta etapa consiste básicamente en la superposición de los mapas. La superposición permite definir primero el área agroclimática general y los límites de adaptación y jerarquización bajo el punto de vista agroclimático; se ha realizado hasta aquí

una zonificación agroclimática. A continuación se efectúa la síntesis del mapa agroclimático con las categorías edáficas para el cultivo, de esta manera se llega a la zonificación ecológica.

El punto de partida fue el mapa térmico que fue sobrepuesto al hídrico. Las áreas que no tuvieron simultáneamente unidades aptas para el cultivo del frijol, desde el punto de vista térmico-hídrico fueron excluidas. El mapa resultante fue sobrepuesto al de duración de la estación ecosca, eliminando nuevamente las áreas que no fueran comunes para el conjunto de variables. Como resultado de estas operaciones, se obtuvo un mapa que define el área agroclimática para el cultivo a nivel del país. En el mapa final esta área se encuentra delimitada por un trazo grueso.

La fase siguiente de la síntesis cartográfica, consistió en delimitar en el interior del área agroclimática general, los sectores que tienen características fisio-edáficas adecuadas para el cultivo.

La simbología empleada se presenta en forma de una fracción en cuyo numerador se encuentran dos cifras, la primera corresponde a la categoría térmica y la segunda a la hídrica. En el denominador se encuentra una cifra que indica la categoría fisio-edáfica con relación a la aptitud para el cultivo, acompañada de una letra minúscula que indica las limitaciones que tiene la unidad en cuanto a drenaje pendiente o textura del suelo.

Es necesario hacer la salvedad, que por la escala cartográfica empleada, algunos sectores con suelos de buena calidad para el cultivo, no fueron delimitados por su pequeña extensión. Para facilitar la utilización de los mapas, las diversas unidades espaciales aptas para el cultivo, fueron agrupadas en una escala que resume de manera general las posibilidades que ofrecen para la producción.

3.11 Zonificación de línea. Segunda aproximación - segundo nivel de precisión

En los apartes 3.4.2 y 3.5.2 se explicó y presentó el segundo nivel de precisión así como sus alcances. La aplicación de este nivel proviene de la necesidad de ampliar los estudios en lo que respecta a precisión en una determinada zona y para un cultivo que su expansión lo requiera. La estructuración básica de las etapas es la misma que en el nivel anterior. Aquí se dió detalle explicativo para aquellas partes que así lo requerían haciendo caso omiso a la explicación de etapas similares.

Para el desarrollo de este modelo se consideró una región dentro de Costa Rica que pudieramos llamar "Meseta Central y alrededores", con un área aproximada de 7000 km^2 , lo cual representa un 14 por ciento del territorio nacional. Se extiende desde los $9^{\circ}40'$ hasta los $10^{\circ}15'$ de latitud norte y entre los $83^{\circ}30'$ y $84^{\circ}30'$ de longitud W. En la región se han seleccionado para su estudio 54 estaciones.

3.11.1 Ampliación de la tercera etapa

Las etapas necesarias para llegar a las conclusiones de este nuevo nivel en la zonificación son las mismas que para la anterior. Solamente el desarrollo de la tercera etapa, presentará cambios sustanciales que dará lugar a que trabajemos en este nivel con diez variables, ocho de las cuales serán nuevas y creadas para este fin. Permanecen inalteradas, la categoría térmica y la categoría del suelo. La mayoría de estas nuevas variables se generan al efectuar una variación en el cálculo del balance de agua en el suelo. En efecto se abandonan los promedios mensuales y se efectúa el cálculo real para cada mes de las magnitudes de las deficiencias y excesos de agua en el suelo. Del análisis exhaustivo de

estos valores podemos determinar:

- 1) Posibilidad de cultivo
- 2) Fecha óptima promedio de siembra
- 3) Fecha comienzo de la época propicia para sembrar
- 4) Época promedio de siembra
- 5) Duración de la época de siembra (número de días)
- 6) Variabilidad relativa de la duración de la época de siembra (CV)
- 7) Variabilidad relativa de la ocurrencia del comienzo de la época de siembra (CV)
- 8) Variabilidad de la fecha de siembra óptima (CV)
- 9) Magnitud de las deficiencias y excesos de agua durante el mejor ciclo para cada localidad (en mm)
- 10) Porcentaje de años negativos (%)
- 11) Variabilidad de la época de siembra (valores extremos)
- 12) Fecha de siembra con más alta probabilidad de éxito (no implica optimización)

En trabajos anteriores García E. (26, 34) presenta bosquejos de la metodología a seguir para detectar dichas variables. Para buscar la variabilidad de fechas de ocurrencia se pueden considerar las fechas como números correlativos o considerar cada una como una magnitud que expresa la distancia entre dicha fecha y un eje arbitrario que pasa por la fecha extrema anterior en la serie de años considerada. Para la obtención de la fecha con la más alta probabilidad de éxito se considera la curva promedio ajustada a la variabilidad de la ocurrencia o frecuencia de las fechas donde se puede sembrar cada año. Si las estaciones presentan un número considerable de años de observación puede ser útil efectuar análisis armónicos

basados en la serie de Fourier (15) de acuerdo al siguiente modelo:

$$y = a_0 + P_1 \cos x + P_2 \cos 2x + \dots + q_1 \sin x + q_2 \sin 2x + \dots$$

en el cual

a_0 = media aritmética de la variable criterio

$P_1, P_2, \dots, q_1, q_2, \dots$ = 1/2 amplitud de las ondas superimpuestas

$x = \frac{it}{P}$ i = número de armónicos t = tiempo y P = período

Cada una de estas variables resulta del promedio obtenido al analizar cada uno de los años de la serie considerada en cada estación. Es decir, se calcula cada variable año por año y se promedian para la serie de años.

3.12 El análisis de factores múltiples "Factor analysis" como método de zonificación (segunda aproximación - segundo nivel de precisión)

El análisis de factores múltiples si bien es una técnica muy conocida en el campo de la investigación socio-económica (46, 47, 51, 52, 74), no ha sido utilizada en la agroclimatología aplicada. Al analizar el desarrollo histórico del Análisis de Factores Múltiples aparecen con frecuencia controversias de su aplicación a la ciencia. No obstante, el uso adecuado de esta técnica puede resolver problemas prácticos de aplicación inmediata y difícilmente resolubles por otros procedimientos. Esta técnica fue usada con éxito en los proyectos sobre regionalización agrícola en Centroamérica (5, 12) y otros países (68, 73).

Las aplicaciones más sobresalientes de la técnica se reflejan: 1) en la combinación de variables de múltiple dimensión para producir un puntaje compuesto, que mide lo común de las variables y aquéllo que produce la máxima variancia entre individuos, 2) la necesidad de reducir la

dimensionalidad de un conjunto de variables haciendo uso de sus intercorrelaciones, y 3) encontrar una forma de identificar dimensiones fundamentales y significativas en un dominio dimensional.

La bondad de la técnica radica en la estimación de ponderación diferencial correspondiente a cada variable que participa en el puntaje general (score). Cuando varias variables muestran básicamente el mismo patrón de variabilidad algunos de ellos son redundantes y no precisan medición, entonces el componente principal es una aproximación al patrón básico. Por lo tanto, la múltiple medición se puede convertir a un simple índice que expresa satisfactoriamente la estructura básica. Esto salva la dificultad cartográfica de representar variables múltiples a través de superposiciones o interpretaciones gráficas aproximadas.

3.12.1 Pasos y cálculos a realizar

Paso 1. Estimación de medias y variancias de cada variable.

Paso 2. Estimación de la matriz de correlación, R.

$$R = \underset{\text{si}}{D}^{-1/2} (X'Y) \underset{\text{si}}{D}^{-1/2}$$

donde:

R = Matriz de correlación estimada

X'X = Matriz de momento

$\underset{\text{si}}{D}^{-1/2}$ = Inversa de la raíz cuadrada de los elementos diagonal de X'X

Paso 3. Estimación de la raíz característica de la matriz

$$|R - \lambda I| = 0$$

resolviendo este polinomio en λ , de orden n se obtienen

las raíces características

Paso 4. Estimación del vector de ponderación asociado con la máxima raíz característica λ_n del sistema estructural. Para ello se resuelve la ecuación

$$(B - \lambda_n I) \underline{a} = 0$$

donde \underline{a} es el vector de ponderación.

Paso 5. Estimación del puntaje compuesto

$$F_c = \underline{a}^t \underline{X}_i = a_1 X_{i1} + a_2 X_{i2} + \dots + a_n X_{in}$$

donde:

\underline{a}^t = transpuesta del coeficiente de ponderación

$X_{i1} = \frac{X_i - \bar{Y}}{S_i}$ = variable normalizada correspondiente a la observación i.

Esta técnica se utiliza en la segunda aproximación y segundo nivel de precisión. El estudio se dividió en tres partes, primero se averiguó el índice de sitio y se efectuaron los cálculos necesarios tomando las ocho primeras variables indicadas en el Cuadro 13 (de X_1 a X_8), es decir, siete agroclimáticas y una fisio-edáfica. Segundo se calculó el índice de sitio para las siete variables agroclimáticas únicamente. En la tercera parte se repitieron los cálculos para obtener el índice integrador de ocho y siete variables pero eliminando las estaciones sin posibilidades para el cultivo.

Posteriormente se efectuó el análisis de las isolíneas que definen la posición en el espacio de los distintos índices de sitio.

3.13 Zonificación de punto (tercer nivel de precisión agroclimática)

El tercer nivel de precisión es el más estricto de todos los discutidos. En este nivel se toman en cuenta básicamente aquellas variables seleccionadas que permitan establecer luego las relaciones existentes entre

clima y rendimiento. Es por ello que las variables agroclimáticas y climáticas que aquí se usan deben tener una relación evidente con los rendimientos. Un estudio agroclimático tradicional detallado (8) pudiera cumplir con los requisitos del tercer nivel. Es necesario establecer ciertas normas y tener como mínimo en cuenta estas tres condiciones indispensables.

- 1) Describir al menos la intensidad y frecuencia de las variables agroclimáticas que tienen incidencia sobre los rendimientos del cultivo, entre los límites de la época propicia para su desarrollo.
- 2) Que las variables agroclimáticas y climáticas tengan un grado de detalle (precisión) adecuado y suficientemente estricto.
- 3) Que la jerarquización de los índices agroclimáticos en que se puede dividir cada variable sea en función de los rendimientos esperados.

Para aplicar el tercer nivel de precisión agroclimática se va a estudiar la fluctuación en el tiempo de las principales variables climáticas y agroclimáticas para dos localidades tradicionalmente agrícolas en Venezuela, que presentan características para cultivar en verano un cultivo anual de ciclo más largo que el P. vulgaris y por su misma condición de ciclo largo presenta al cultivo a todas las fluctuaciones de la época húmeda o lluviosa en dichas localidades. Estas dos localidades que vienen considerándose como homogéneas en cuanto a clima se refiere, están situadas ambas en el Estado portuguesa y son: Araure y Turen, situadas a $9^{\circ}36'N$, $69^{\circ}14'N$ y $9^{\circ}16'N$, $69^{\circ}05'W$.

Las variables estudiadas van a cubrir el período mayo-setiembre,

tiempo en el cual se efectúan los cultivos anuales de "invierno".

3.13.1 Escogencia de las variables agroclimáticas

En el desarrollo de los trabajos aquí realizados para el tercer nivel de precisión agroclimática, se le da al igual que a los otros dos niveles, especial atención al régimen hídrico en sus diferentes variables, sin restarle importancia al régimen térmico, en su concepción general, pero dando menor énfasis al tratar de definir y diferenciar áreas muy similares bajo el punto de vista térmico o que estén situadas a poca distancia.

Para la escogencia de las variables agroclimáticas dentro del régimen hídrico, se tiene que realizar una ponderación que permita dilucidar cuáles son los más importantes o al menos cuáles presentan una relación aceptable estrecha con los rendimientos; dentro de aquellos que sean factibles de obtenerse y sin abandonar la condición segunda enunciada en el aparte anterior.

En un estudio agroclimático específico se pueden estudiar las siguientes variables hídricas excluyendo aquellas ya mencionadas en el segundo nivel de precisión.

- 1) Transcurso de la precipitación total durante el ciclo del cultivo en la serie de tiempo.
- 2) Transcurso de la precipitación mensual durante el ciclo.
- 3) Transcurso de la precipitación diaria o semanal durante el ciclo.
- 4) Número de días con lluvia.
- 5) Promedio de agua caída en cada día con lluvia.
- 6) Altura de la precipitación en el período inmediatamente anterior al período húmedo (entre A_1 y E_1).

- 7) Altura de la precipitación en el período húmedo (entre B_1 y B_2).
- 8) Altura de la precipitación en el mes siguiente de la siembra.
- 9) Altura de la precipitación en el segundo mes siguiente de la siembra.
- 10) Ocasionalmente altura de la precipitación en el tercer mes siguiente de la siembra.
- 11) Altura de la precipitación en el mes de cosecha.
- 12) Altura de la precipitación en el período posthúmedo (entre B_2 y el fin práctico de las lluvias).
- 13) Duración del período húmedo en unidades de tiempo (generalmente décadas).
- 14) Duración del período A_1-B_1 en décadas.
- 15) Deficiencias y excesos del agua totales en cada uno de los meses del ciclo.
- 16) Frecuencia de la ocurrencia de los períodos con deficiencia y exceso de agua dentro del ciclo.
- 17) Frecuencia de ocurrencia de períodos con deficiencia y exceso que sobrepasen valores críticos (específicos para cada cultivo).
- 18) Valores de la deficiencia y exceso de agua en el suelo durante el período de floración.
- 19) Valores de la deficiencia y el exceso de agua en el período de cosecha.

- 20) Probabilidad de encontrar determinados niveles de exceso y deficiencias de agua para cada mes.
- 21) Transcurso de los almacenajes de agua en el suelo.
- 22) Fecha de caída del primer grupo de lluvias en la temporada.

Dentro de las variables aquí enunciadas encontramos variables climáticas simples, variables fenológicas y variables fenoclimáticas, estas dos últimas dentro del marco de las agroclimáticas.

La escogencia de las más importantes parece simple si tenemos en cuenta el moderno concepto agroclimático y las relaciones clima-planta. No cabe la menor duda que aquellas variables fenológicas y fenoclimáticas que consideren también el balance de agua en el suelo, van a ser las más precisas y con las cuales podemos efectuar las relaciones anteriores a través de los rendimientos obtenidos, bien con experiencias directas o simulaciones teóricas y extrapolaciones.

De acuerdo a lo anterior, se seleccionaron las siguientes variables para este nivel de estudio:

- 1) Magnitud de la deficiencia de agua promedio de los períodos con deficiencia durante el ciclo del cultivo.
- 2) Número de períodos con deficiencia en el ciclo.
- 3) Número de períodos con deficiencia >10 m en el ciclo.
- 4) Valor promedio de los coeficientes de variación para los valores de deficiencia dentro de cada mes.
- 5) Probabilidad de obtener distintas magnitudes de deficiencia.
- 6) Deficiencias totales para el período de floración.
- 7) Deficiencias totales para el ciclo del cultivo.

- 8) Magnitud del exceso de agua promedio de los períodos con exceso durante el ciclo del cultivo.
- 9) Número de períodos con excesos en el ciclo.
- 10) Número de períodos con exceso >30 m en el ciclo.
- 11) Valor promedio de los coeficientes de variación para los valores de exceso de agua dentro de cada mas.
- 12) Probabilidad de obtener distintas magnitudes de exceso.
- 13) Excesos totales para el período de floración.
- 14) Excesos totales para el ciclo del cultivo.

Además, para efectuar las comparaciones se toman otras variables más simples como:

- 1) Fecha de ocurrencia del primer grupo de lluvias.
- 2) Fecha de ocurrencia del segundo grupo de lluvias.
- 3) Transcurso de la precipitación mensual durante el ciclo.
- 4) Número de días con lluvia.
- 5) Promedio de agua caída en cada día con lluvia.

3.13.2 El balance hídrico en el tercer nivel de precisión

En este nivel se hace necesario realizar un balance de agua en el suelo que sea al menos semanal. Para los estudios aquí desarrollados se efectuó un balance de agua a nivel diario, con objeto de detectar los períodos de deficiencia o exceso de corto plazo que dan una idea acerca de la marcha del cultivo dentro de las situaciones reales en cuanto al contenido de agua en el suelo. El balance de agua mensual si bien caracteriza el clima mejor que los datos simples de precipitación, no alcanza la suficiente precisión para trabajar en este tercer nivel. En efecto, el balance de agua mensual contabiliza el agua total indicando en valor absoluto

solamente la deficiencia o el exceso. Puede presentarse un mes con altos excesos de agua donde la primera o segunda quincena no llovió en absoluto. El valor del exceso de agua tal y como es considerado en los cálculos tradicionales a un nivel mensual presenta un relativo valor al compararlo con los rendimientos. Al trabajar con un balance de agua en el suelo a nivel diario estamos dividiendo los excesos de agua mensuales en períodos de exceso que se pueden intercalar con períodos de deficiencia, con lo cual podremos lograr un efecto explicativo más sorprendente al conocer con cierta exactitud el número e intensidad de los períodos con deficiencia en el ciclo de la planta a la vez que el número e intensidad de los períodos con exceso. Este es menos importante en cuanto a la explicación de la respuesta de las plantas.

El concepto deficiencia de agua expresa el agua faltante para llevarse a cabalidad el proceso de la evapotranspiración y tiene poca exactitud para indicarnos el agua que deberíamos agregar al suelo con fines de riego. Pretende ser un índice de la mayor o menor gravedad del fenómeno sobre la planta. No obstante, en regiones de precipitación alta donde la alternancia de días con precipitación y sin ella, es regular y constante y los períodos sin lluvia son cortos (en número de días), la deficiencia de agua tal y como es concebida tradicionalmente ($\text{Def.} = \text{ETP} - \text{ETR}$, $\text{ETR} = \text{Precipitación} + \text{Variación de almacenaje}$) no ofrece resultados halagadores, sobre todo para cultivos de ciclo corto. Resulta más práctico y preciso en esos casos trabajar con un almacenaje de agua en el suelo, aún estimado. En efecto partiendo de un suelo saturado son necesarios varios días sin llover para que podamos detectar 'deficiencia' de agua calculada según la metodología tradicional. El suelo va cediendo agua y ésta elimina la diferencia

negativa entre la precipitación y la ETP en períodos secos. Es a partir de cierto valor del almacenaje que comenzamos a detectar "deficiencia". Sin embargo, los estudios demuestran que para los almacenajes donde no había "deficiencia" todavía, hay mermas en los rendimientos (55). En lugares no muy húmedos o donde los períodos sin llover intermensuales son o pueden ser largos, la metodología tradicional y el concepto anterior de deficiencia, pueden aplicarse con cierto éxito.

La intensidad de la deficiencia depende de dos variables principales. Una es la demanda de agua obtenida de la diferencia entre la P y la ETP y la otra es el distinto almacenaje presente en el suelo. A mayor demanda de agua habría mayor deficiencia y ésta variaría para los distintos almacenajes.

$$\text{Deficiencia} = f(D, A)$$

El valor de la deficiencia presenta una relación aproximada, en un suelo con una capacidad de saturación de 125 mm, para las distintas demandas y almacenajes que tienen la siguiente expresión:

$$Y = 17,704 - 0,258X_1 + 0,545X_2$$

Y = deficiencia de agua en mm

X₁ = almacenaje de agua en el suelo en mm

X₂ = demanda de agua en mm (deficiencia climática)

el coeficiente de determinación es del orden del 93 por ciento ($R^2 = 0,93$).

La ecuación anterior se encontró matemmatizando las tablas de Thornthwaite y Matter (86).

Si bien la deficiencia de agua en el suelo es un valor intrínseco al suelo, el exceso no lo es. A través de la deficiencia podemos saber en realidad el agua que teóricamente hizo falta en el suelo, también conocemos

su almacenaje real y por lo tanto podemos establecer relaciones entre las diferentes tensiones de humedad y las cosechas.

Con el exceso de agua solamente se puede saber el agua que "sobra" pero su influencia sobre las plantas va a depender de la velocidad con que esta agua sobrante drena, es por ello que buenos drenajes van a disminuir notablemente los efectos perjudiciales de los excesos de agua.

Para el cálculo del balance de agua en el suelo a nivel diario se sigue exactamente la misma metodología empleada en los niveles de precisión anteriores.

3.13.3 Criterios para detectar la normalidad en el cálculo de probabilidades

La La probabilidad de obtener distintas magnitudes de variables que inciden sobre el cultivo es un valor muy interesante para aplicaciones prácticas en agroclimatología. Los valores de las variables en estudio fueron ajustados a una curva normal; para ello se analizaron los valores agrupados por mes y se trató de examinar su normalidad siguiendo el criterio de Cornu y el método de la disimetría.

El criterio de Cornu relaciona la desviación media e y la desviación estandar σ mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{e}{\sigma} = \frac{2}{\pi} \approx 0,8$$

los límites de confiabilidad para el tamaño de la muestra podemos tomarlos de Geary (42).

El método de la disimetría establece la razón entre la disimetría δ_1 y su error estandar $e_{s\delta_1}$

$$\delta = \frac{1}{n\sigma^3} \sum (X - \bar{X})^3$$

$$e_{s\delta_1} = \left[\frac{6n(n-1)}{(n-2)(n-1)(n-3)} \right]^{1/2}$$

Los valores que excedan esa relación de 1,96 pueden considerarse como no normales al nivel del 55 por ciento de probabilidad. Debido a que el tamaño de la muestra es siempre relativamente pequeña el método de la Kurtosis y el de χ^2 no se aplicaron por la gran variancia en los límites fiduciales.

Generalmente en series precipitacionales o sus derivados, como son en este caso, las deficiencias y los excesos de agua, existen altos valores ocasionales que ayudan a romper la normalidad; para detectar esta influencia se detectó el criterio de Chauvenet (44). Este criterio de la diferencia normalizada que hace que la probabilidad de incidencia de un número determinado es igual a 0,5 o a $\frac{1}{2n}$ para n valores; los valores del criterio anterior los podemos tabular así:

10	20	30	40	50	60
1,96	2,24	2,39	2,50	2,58	2,64

la primera línea es n y la segunda es el valor medio del criterio. Por lo tanto, si en la serie que estamos estudiando la relación \bar{X}/δ es menor que el valor del criterio de Chauvenet que le corresponde para n valores, podemos asegurar que la serie es asimétrica. Un procedimiento para eliminar esta asimetría es tomar el valor de la raíz cuadrada de cada uno de los n valores de la serie y volver a proceder, buscando la normalidad. También empleamos el procedimiento de buscar una transformación sensible de los datos, a través de su conversión logarítmica, siendo ésta la transformación que generalmente presentó mejor aproximación a la curva normal.

4. RESULTADOS

4.1 Zonificación de área. (Primera aproximación - primer nivel de precisión).

4.1.1 Primera etapa. Indices agroecológicos del cultivo

4.1.1.1 Indices térmicos

Con base en el análisis bibliográfico sobre la ecología del frijol y en el método geográfico deductivo se determinaron los índices térmicos. Dichos índices se observan en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Indices térmicos considerados para los estudios de la zonificación del frijol Phaseolus vulgaris.

Denominación	Ponderación	Valor en °C
Optimo	1	20 y 23
Optimo con tendencia al déficit	2	17 y 20 ⁻
Optimo con tendencia al exceso	3	23 ⁺ y 27

En este cuadro los valores asignados como límites máximos extremos parecerán muy elevados, sin embargo, se consideró este valor, teniendo en cuenta que existen variedades que pueden lograr buenos rendimientos en esos niveles térmicos.

4.1.1.2 Indices hídricos

Los índices hídricos que se consideraron en el presente estudio, son aquellos contemplados en el Cuadro 8. Este cuadro es similar al Cuadro 3.

excepto el valor máximo de exceso de agua que se lleva de 70 a 100 mm. Los excesos de agua como se vio anteriormente, tienen un valor relativo en cuanto a la verdadera influencia sobre el cultivo. Se puede tener con este índice cierto margen de flexibilidad, lo que permite actuar en condiciones distintas de suelo y topografía.

Cuadro 8. Índices agroclimáticos que corresponden a la intensidad de la humedad y la sequía para Phaseolus vulgaris considerados para Costa Rica.

Deficiencia de agua	Excesos de agua
100 ⁺	0
20 ⁺ a 100 ⁻	0 a 20 ⁻
0 a 20 ⁻	0 a 20 ⁻
0 a 20 ⁻	20 ⁺ a 70 ⁻
0	100 ⁺

4.1.2 Estimados de elementos meteorológicos

4.1.2.1 Estimados térmicos

En el Cuadro 9 se presentan las ecuaciones ajustadas para la estimación térmica en las cinco regiones estudiadas, y en el Cuadro 10 se observan los resultados del análisis de variancia y de regresión. Se puede apreciar que empleando ambos se obtiene una similitud altamente significativa.

Cuadro 9. Ecuaciones de estimación térmica según las dos técnicas empleadas.

REGION	TECNICA I (medias)		TECNICA II (medianas)	
	No. Estaciones	Ecuación	r^2	No. Estaciones Ecuación
Pacífico Norte	17	$T = -0,0067 h + 27,85$	0,90	5 $T=T_{mm}$ - 0,67 h
Pacífico Sur	6	$T = -0,0046 h + 27,15$	0,95	5 $T=T_{mm}$ - 0,53 h
meseta Central	21	$T = -0,0055 h + 27,75$	0,92	5 $T=T_{mm}$ - 0,53 h
Atlántico Norte	15	$T = -0,0056 h + 26,69$	0,96	5 $T=T_{mm}$ - 0,55 h
Atlántico Sur	15	$T = -0,0046 h + 25,61$	0,97	5 $T=T_{mm}$ - 0,45 h
Todo el país	74	$T = -0,0054 h + 27,07$	0,93	5 $T=T_{mm}$ - 0,53 h

T = Temperatura estimada (°C)

h = Altura de la localidad (m s.n.m.)

T_{mm} = Temperatura al nivel del mar, obtenida por interpolación de isotermas rectilíneas al nivel del mar (°C)

Cuadro 10. Comparación de las temperaturas observadas y estimadas por cada una de las técnicas y eficiencia relativa de las mismas.

Criterio de Comparación	Técnica I	Técnica II
F	455,7**	678,7**
s^2	0,625	0,817
R^2	0,953	0,930
G.L. (desv. del modelo)	71	51
Eficiencia relativa de I vs. II		132%

** = (P .01)

Comparando los resultados obtenidos al ajustar las ecuaciones correspondientes a cada región macro climática y a todo el país, se puede afirmar que en la mayoría de los casos el grado de ajuste de los primeros son superiores a los de los segundos, a juzgar por el coeficiente de determinación R^2 . Esto es de esperar ya que las primeras ecuaciones de predicción consideran características regionales de clima. De este análisis se puede inferir que para la aplicación de ambos procedimientos es más conveniente hacer una subdivisión previa del área de estudio en macro regiones climáticas.

No obstante que las temperaturas estimadas por los dos métodos tienen un alto grado de similitud con las observadas; la primera técnica demuestra un mejor ajuste que la segunda. Sin embargo, es necesario anotar

que para el cálculo de las ecuaciones por la primera se emplearon todos los datos termométricos disponibles para el país (73 estaciones), mientras que con la segunda se emplearon solamente los datos de 20 estaciones.

La estimación de la eficiencia relativa (primera técnica contra segunda) indica que la primera es 32 por ciento más eficiente que la segunda, lo cual quiere decir que se necesitaría emplear siete estaciones más con la segunda para alcanzar una precisión comparable con ambas. En otras palabras, se necesitaría, de ser posible, hacer el análisis con 27 estaciones para conseguir la misma exactitud que con la primera técnica que emplea 73 estaciones.

De este análisis se puede concluir que la técnica de gradiente medio, por su simplicidad, deberá ser empleada en áreas geográficas que dispongan de un volumen de información relativamente grande, mientras que la técnica de los gradientes medianos deberá ser empleada sobre todo en áreas con mayor deficiencia en información termométrica.

Por otra parte, es necesario indicar que por lo general la mayor divergencia entre los valores estimados y las temperaturas observadas se encuentra en localidades situadas en la llanura costera a baja altura sobre el nivel del mar; esto es explicable a los frecuentes fenómenos locales que se presentan en estas posiciones fisiográficas en estas latitudes. Por esta razón las estimaciones térmicas en las bajas latitudes deberán ser tomadas con ciertas precauciones. En resumen se puede afirmar:

- 1) Los ajustes entre temperaturas estimadas por ambos métodos y las observadas indican una similitud altamente significativa.

- 2) Existe una tendencia a mayor precisión cuando se trabaja con las estaciones que corresponden a una macro región climática.
- 3) El método de regresión altotérmica tiene una eficiencia relativa superior al 32 por ciento que el de los gradientes medianos.

4.1.2.2 Estimados de humedad relativa

En el Cuadro 11 se presentan las ecuaciones de regresión que indican las relaciones que existen entre la precipitación mensual y la humedad relativa, en cada una de las 13 estaciones consideradas. En la mayoría de los casos los valores de coeficiente de correlación son altamente significativos ($P < 0,01$). El caso de la estación La Lola (Siquirres, finca comercial del IICA) es necesario analizarlo por separado, ya que presenta una relación pobre a los factores estudiados. Esto estaría indicando al parecer, que existe una deficiencia en los registros de dicha estación, razón por la cual en análisis posteriores se descartó dicha información.

El coeficiente de confiabilidad (R^2) de estas ecuaciones confirma el alto grado de asociación que existe entre la precipitación pluvial y la humedad relativa.

$$HR = A P_m + B$$

$$A = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\Delta HR}{\Delta P_m} = \frac{dHR}{dP_m}$$

El coeficiente de regresión lineal ($A\%/mm$) o pendiente de las rectas ajustadas entre la precipitación mensual y la humedad relativa para cada ecuación se relacionó con el número de meses secos (N) y la precipitación

Cuadro 11. Relaciones entre la precipitación mensual y la humedad relativa para cada una de las estaciones consideradas.

Estación	Ecuación de Regresión	Coefficiente de Correlación	R ²
Buena Vista (Alfaro Ruíz)	HR = 0,0062 P _m + 90,20	0,58*	0,33
Cañas (Guanacaste)	HR = 0,0492 P _m + 68,10	0,82**	0,67
El Alto (Ochomogo)	HR = 0,0224 P _m + 80,05	0,89**	0,80
El Coco (Alajuela)	HR = 0,0450 P _m + 71,83	0,83**	0,69
La Lola (Siquirres)	HR = 0,0062 P _m + 87,51	0,20	0,04
Los Diamantes (Guápiles)	HR = 0,0075 P _m + 85,54	0,42	0,17
Puntarenas (Puntarenas)	HR = 0,0425 P _m + 73,73	0,85**	0,72
San José (San José)	HR = 0,0219 P _m + 78,92	0,89**	0,79
San Josecito (Alajuela)	HR = 0,0693 P _m + 64,57	0,90**	0,81
Santa Ana	HR = 0,0412 P _m + 75,73	0,89**	0,79
Santa Ana (San Joaquín)	HR = 0,0211 P _m + 75,18	0,46	0,21
Sarapiquí (Singsaysay)	HR = 0,0131 P _m + 83,15	0,78**	0,61
Turrialba (I.I.C.A.)	HR = 0,0213 P _m + 83,49	0,91**	0,83

HR = Humedad relativa

P_m = Precipitación mensual

** Significación = < 0,01

* Significación = < 0,05

pluvial total (P_t).

$$A = f(N, P_t)$$

$$1000 A = 7,37N + 1,00 P_t + 6,04$$

$$\frac{\partial A}{\partial N} = 7,3 \quad \frac{\partial A}{\partial P_t} = 1,00 \quad \text{constante} = 6,04$$

La confiabilidad del ajuste (R^2) es de 66 por ciento valor satisfactorio para los propósitos del estudio.

Por otro lado, las ordenadas al origen de cada una de las regresiones calculadas (B%) relacionadas con el número de meses ecosecos y la precipitación total anual ajusta a la siguiente forma funcional:

$$B = -3,863N - 2,152P_t + 93,88$$

$$\frac{\partial B}{\partial N} = -3,863 \quad \frac{\partial B}{\partial P_t} = -2,152 \quad \text{constante} = 93,88$$

con una bondad de ajuste de 80 por ciento.

Utilizando los valores de A (%/mm), B (%) y las alturas de precipitación mensual (P_m) se generó una ecuación que permite estimar la humedad relativa mensual (HR_m) la cual se expresa de la siguiente manera:

$$HR_m = \frac{dHR}{dP_m} P_m + B$$

La prueba de esta ecuación general de estimación dio como resultado que la recta de los valores anuales observados y estimados (promedio de 12 valores mensuales para las 12 estaciones) es prácticamente coincidente con la teórica $y = x$. El grado de asociación entre valores observados y calculados es de 86 por ciento (Figura 3). En el Cuadro 12 se aprecian las divergencias existentes entre valores observados y calculados para la humedad relativa media anual.

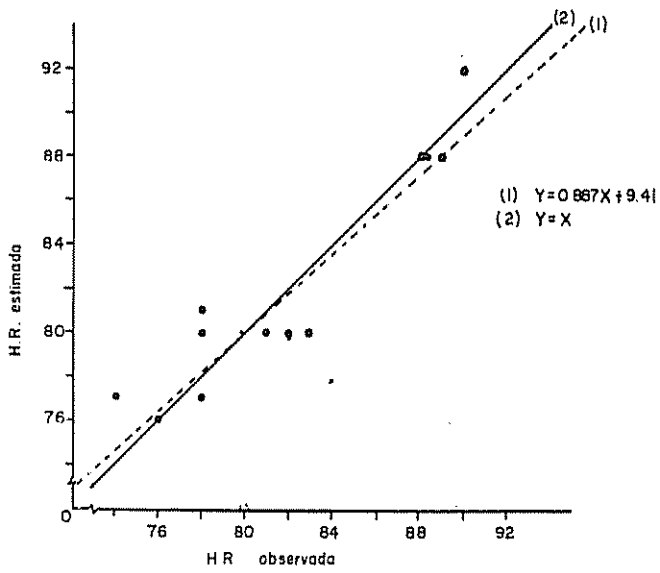


Fig. 3 Valores de humedad relativa observados y estimados, promedio de doce valores mensuales (grado de asociación 86 %)

Cuadro 12. Comparación de los valores de humedad relativa, observados y estimados.

Estaciones	Humedad Relativa Anual (%)			Prueba t para valores ^o mensuales
	Observada	Estimada	Diferencia	
Buena Vista (Alfaro Ruíz)	90	92	+ 2	4,300*
Cañas (Guanacaste)	74	77	+ 3	1,750
El Alto (Ochomogo)	83	80	- 3	6,000*
El Coco (Alajuela)	78	81	+ 3	1,850
Los Diamantes (Guápiles)	88	88	0	0,310
Puntarenas (Puntarenas)	79	77	- 2	2,160
San José (San José)	82	80	- 2	2,490
San Josecito (Alajuela)	76	76	0	0,154
Santa Ana	81	80	- 1	1.370
Santa Ana (San Joaquín)	78	80	+ 2	3.100*
Sarapiquí (Iiagsaysay)	88	88	0	0,355
Turrialba (I.I.C.A.)	89	88	- 1	3.400*

^o 11 grados de libertad en todos los casos.

* Significación < 0,05

Los resultados confirman que el procedimiento propuesto para la estimación de los valores de humedad relativa es confiable, considerando que por lo general el instrumental empleado para la medición de este elemento presenta, según los fabricantes, tolerancia en la precisión de alrededor de un 3 por ciento.

Es lógico tener en cuenta que las estimaciones de la humedad relativa por encima de un determinado valor de precipitación o de cierto número de meses ecosecos, no podrán ser llevadas a cabo ya que las ecuaciones generales fueron establecidas para un rango determinado de valores de estos dos parámetros, por lo cual no pueden extrapolarse fuera de estos límites, a no ser que se efectúen algunas correcciones. Con relación a la precipitación total anual, el límite se localiza en 3.500 mm; así las estaciones que tengan valores superiores al indicado, consideran este valor solamente. Este límite constituye el promedio aproximado de la precipitación pluvial anual de las estaciones empleadas. Por otra parte, el procedimiento propuesto si se toma en cuenta el comportamiento irregular de la humedad relativa en función de variables geográficas, solo deberá ser aplicado en regiones determinadas, es decir, que el procedimiento propuesto tiene valor en un ámbito regional y no podrá ser empleado en otras áreas, donde deberán establecerse las ecuaciones de estimación propias.

4.1.3 Tercera etapa. Estimados derivados del análisis agroclimático

En el Cuadro 5 se pueden observar las estaciones usadas en el estudio con algunos índices climáticos y agroclimáticos, así como sus coordenadas geográficas.

En el Cuadro 13 se encuentran entre otras variables, las duraciones

Cuadro 13. Valores que alcanzan las distintas variables detectadas con el segundo nivel de precisión agroclimática para las localidades en estudio.

	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	
1) Acosta	30	28	9,2	4,5	75	(30-18)	3	0	1	4	21 oct.	5 nov.
3) Alajuela	15	17	2,2	2,6	81	(53-35)	5	0	1	1	1 nov.	4 nov.
6) Atenas	1	19	8,2	4,5	80	(35-114)	6	0	3	3	3 oct.	11 oct.
7) Avance	30	53	3,9	4,2	33	(19-14)	1	0	2	4	11 nov.	24 nov.
15) Cachí	60	46	9,1	7,2	55	(29-55)	5	0	1	4	1 dic.	21 dic.
16) Cairo (no)	0	0	100	100	220	(0-237)	10	66	3	4		
19) Cartago	60	61	6,9	5,8	32	(25-5)	3	0	2	1	26 oct.	26 nov.
26) Coronado	60	54	7,5	7,1	27	(4-0)	1	0	2	4	18 nov.	5 dic.
30) Curridabat	15	22	2,6	2,7	51	(35-98)	6	0	1	1	1 nov.	3 nov.
32) Desamparados	15	23	4,0	3,5	46	(41-73)	5	0	1	3	20 oct.	29 oct.
33) El Alto de Ochomogo	30	33	3,2	3,6	46	(24-72)	5	0	2	4	29 oct.	9 nov.
36) El Coco	1	9	3,3	2,5	124	(53-120)	6	8	1	1	17 oct.	21 oct.

Cuadro 13 (continuación)

	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	
37) El Guarco	50	56	4,8	5,2	30	(11-2)	1	0	2	1	17 oct.	9 nov.
38) El Numo	30	14	1,5	3,3	100	(2-30)	2	36	1	4	2 eno.	11 eno.
40) El Yas	60	50	17,7	16,8	37	(1-54)	2	0	2	4	15 nov.	15 nov.
46) Grecia	1	3	3,1	3,1	176	(92-88)	9	36	3	3	3 nov.	3 nov.
47) Guácimo (no)	0	0	100	100	220	(0-150)10		60	3	4		
51) Jorco	1	4	5,1	4,1	100	(95-10)	7	40	1	4	1 nov.	1 nov.
53) Juan Viñas (no)	0	0	100	100	220	(0-196)10		73	1	4		
55) La Argentina	1	1	1,9	1,9	220	(83-20)	8	31	3	3	1 nov.	1 nov.
57) La Florida (no)	0	0	100	100	220	(0-130)10		66	3	4		
58) La Iberia (no)	0	0	100	100	220	(0-163)10		83	3	4		
61) La Palma de Moravia (no)	0	0	100	100	220	(0-134)10		66	2	4		
62) La Suiza	30	21	9,9	7,3	117	(3-53)	2	33	1	2	23 dic.	8 eno.
66) Lomas (no)	0	0	100	100	220	(0-240)10		89	3	4		

Cuadro 13 (continuación)

	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
67) Los Diamantes (no)	0	0	100	100	220	(0-199)10	89	3	4		
74) Naranjo	1	19	4,1	4,1	62	(101-7)	7	5	3	24 nov.	27 nov.
76) Navarro	45	45	5,6	5,5	45	(15-11)	1	8	2	5 nov.	1 dic.
79) Nuestro Amo	1	15	2,8	0,0	88	(31-107)	6	16	4	6 oct.	15 oct.
81) Ojo de Agua	1	12	2,3	1,9	151	(38-93)	6	20	4	12 oct.	17 oct.
82) Orosi	60	41	5,6	6,7	15	(11-7)	1	5	4	15 nov.	3 dic.
85) Pacuare	15	15	7,1	6,2	90	(2-81)	4	35	4	1 eno.	5 eno.
87) Palmares	1	13	4,1	3,7	90	(69-8)	3	5	4	23 oct.	1 nov.
89) Paraíso	45	29	5,6	3,5	69	(5-15)	1	12	2	1 eno.	19 eno.
90) Peralta (no)	0	0	100	100	220	(0-120)10	60	3	4		
92) Puriscal	15	16	2,5	3,5	95	(41-32)	5	26	4	2 nov.	14 nov.
100) Platanillo	30	16	7,9	3,4	94	(2-40)	2	35	4	23 dic.	5 eno.
105) Rancho Redondo	15	33	4,1	3,5	38	(22-7)	3	0	4	20 nov.	17 dic.
109) Río Macho (no)	0	0	100	100	220	(0-110)10	77	2	4		

Cuadro 13 (continuación)

	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	
114) Santa Ana	15	7	3,3	2,5	132	(45-60)	5	20	1	4	17 oct.	21 oct.
117) Sto. Domingo del Roble	45	17	7,7	6,3	60	(23-0)	3	0	2	4	24 nov.	3 dic.
119) San Joaquín de Flores	15	11	2,9	2,8	123	(31-43)	5	0	1	1	22 oct.	3 nov.
120) San Josecito	1	3	2,0	0,0	167	(44-110)	6	25	1	1	12 oct.	15 oct.
121) San José	30	31	3,5	3,5	46	(20-80)	6	0	1	1	1 nov.	1 nov.
122) San Marcos de Tarrazú	15	7	1,5	2,0	149	(30-7)	3	0	2	4	22 oct.	3 nov.
124) San Rafael de Poás	1	3	0,0	7,4	79	(65-74)	8	41	1	4	3 nov.	3 nov.
125) San Ramón	1	10	4,6	5,0	100	(72-14)	3	6	1	4	22 oct.	1 nov.
128) Siquirres (no)	0	0	100	100	220	(0-195)	10	61	3	4		
130) Tacacori	1	12	3,3	4,0	91	(40-84)	6	17	1	3	8 nov.	18 nov.
131) Tapantí	45	24	4,9	3,7	72	(14-37)	2	20	1	4	15 nov.	27 nov.

Cuadro 13 (continuación)

	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
132) Terbaca	45	36	3,3	4,7	51	(21-0)	3	0	4	23 nov.	6 dic.
135) Turrialba	45	27	6,5	5,0	78	(2-55)	2	20	2	2 eno.	12 eno.
130) Turrucares	1	4	2,7	1,6	33	(78-92)	6	50	1	9 oct.	17 oct.
138) Vara Blanca (no)	0	0	100	100	220	(0-133)10		88	4	4	
141) Zarcero	30	42	2,6	4,0	46	(24-15)	3	0	4	27 oct.	12 nov.

Variable	Significación
----------	---------------

- | | |
|-----------------|---|
| X ₀ | Duración de la época de siembra según el primer nivel de precisión (días). |
| X ₁ | Duración de la época de siembra según el segundo nivel de precisión (días). |
| X ₂ | Variabilidad del comienzo de la época de siembra (CV). |
| X ₃ | Variabilidad de la fecha de siembra óptima (CV). |
| X ₄ | Variabilidad de la duración de la época de siembra (CV). |
| X ₅ | Deficiencias y excesos de agua durante el ciclo e índice jerárquico. |
| X ₆ | Porcentaje de años negativos. |
| X ₇ | Jerarquía térmica, (según la temperatura promedio del ciclo). |
| X ₈ | Jerarquía de suelos. |
| X ₉ | Fecha promedio de comienzo de la época de siembra. |
| X ₁₀ | Fecha promedio de siembra óptima. |

de la época de siembra para el primer nivel de precisión, calculados según las normas descritas en Materiales y Métodos. Debido a que el análisis mensual puede extrapolarse hasta quincenas las duraciones de la época de siembra se expresan en quincenas o múltiplos de 15, excepto para aquellas condiciones extremas en que se indica la duración como 1. Esto indica que dicha duración es al menos inferior a una semana.

Siempre resulta práctico en el análisis agroclimático espacial la determinación de la duración del período seco. Si bien al efectuar el cálculo de las deficiencias de agua en el suelo se puede comprobar dicha duración, es difícil tomar un valor de deficiencia que separe las situaciones verdaderamente secas. Se ha determinado entonces para cada localidad la duración del período seco en función del número de meses ecosecos según el principio de Gaussen (41). Dichos valores se representan en el Cuadro 5 en unidades y décimas.

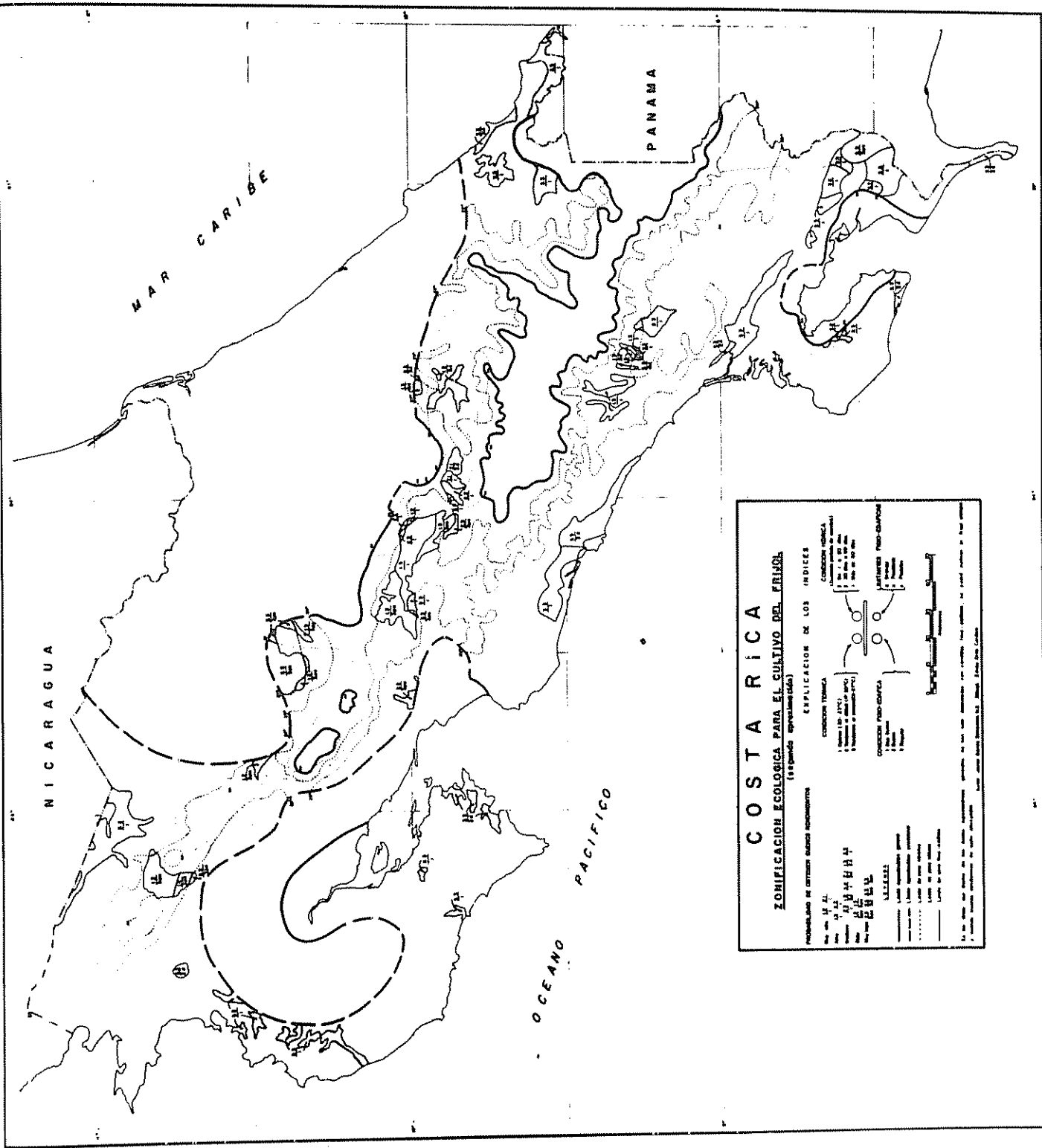
4.1.4 Cuarta etapa. Jerarquización de las categorías de uso potencial de la tierra.

En este nivel de precisión se han considerado tres categorías cuyos equivalentes en las unidades de uso potencial descritos en Materiales y Métodos son:

1	2d	3pe
IA	IP _p	IP _s
IP _a	----	----

4.1.5 Séptima etapa. Mapas finales.

En el Mapa 1 se observa la ubicación de las áreas potenciales



C O S T A R I C A

ZONIFICACION ECOLOGICA PARA EL CULTIVO DEL FRUTO

(segunda aproximación)

POBLACION DE OTROS PAISES ACOMODADOS

100 000	100 000
200 000	200 000
300 000	300 000
400 000	400 000
500 000	500 000
600 000	600 000
700 000	700 000
800 000	800 000
900 000	900 000
1 000 000	1 000 000

EXPLICACION DE LOS INDICES

<p>CONDICION TERRESTRE</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. Zona 1 (100-200) 2. Zona 2 (200-300) 3. Zona 3 (300-400) 4. Zona 4 (400-500) 5. Zona 5 (500-600) 6. Zona 6 (600-700) 7. Zona 7 (700-800) 8. Zona 8 (800-900) 9. Zona 9 (900-1000) 10. Zona 10 (1000-1100) 11. Zona 11 (1100-1200) 12. Zona 12 (1200-1300) 13. Zona 13 (1300-1400) 14. Zona 14 (1400-1500) 15. Zona 15 (1500-1600) 16. Zona 16 (1600-1700) 17. Zona 17 (1700-1800) 18. Zona 18 (1800-1900) 19. Zona 19 (1900-2000) 20. Zona 20 (2000-2100) 21. Zona 21 (2100-2200) 22. Zona 22 (2200-2300) 23. Zona 23 (2300-2400) 24. Zona 24 (2400-2500) 25. Zona 25 (2500-2600) 26. Zona 26 (2600-2700) 27. Zona 27 (2700-2800) 28. Zona 28 (2800-2900) 29. Zona 29 (2900-3000) 30. Zona 30 (3000-3100) 31. Zona 31 (3100-3200) 32. Zona 32 (3200-3300) 33. Zona 33 (3300-3400) 34. Zona 34 (3400-3500) 35. Zona 35 (3500-3600) 36. Zona 36 (3600-3700) 37. Zona 37 (3700-3800) 38. Zona 38 (3800-3900) 39. Zona 39 (3900-4000) 40. Zona 40 (4000-4100) 41. Zona 41 (4100-4200) 42. Zona 42 (4200-4300) 43. Zona 43 (4300-4400) 44. Zona 44 (4400-4500) 45. Zona 45 (4500-4600) 46. Zona 46 (4600-4700) 47. Zona 47 (4700-4800) 48. Zona 48 (4800-4900) 49. Zona 49 (4900-5000) 50. Zona 50 (5000-5100) 51. Zona 51 (5100-5200) 52. Zona 52 (5200-5300) 53. Zona 53 (5300-5400) 54. Zona 54 (5400-5500) 55. Zona 55 (5500-5600) 56. Zona 56 (5600-5700) 57. Zona 57 (5700-5800) 58. Zona 58 (5800-5900) 59. Zona 59 (5900-6000) 60. Zona 60 (6000-6100) 61. Zona 61 (6100-6200) 62. Zona 62 (6200-6300) 63. Zona 63 (6300-6400) 64. Zona 64 (6400-6500) 65. Zona 65 (6500-6600) 66. Zona 66 (6600-6700) 67. Zona 67 (6700-6800) 68. Zona 68 (6800-6900) 69. Zona 69 (6900-7000) 70. Zona 70 (7000-7100) 71. Zona 71 (7100-7200) 72. Zona 72 (7200-7300) 73. Zona 73 (7300-7400) 74. Zona 74 (7400-7500) 75. Zona 75 (7500-7600) 76. Zona 76 (7600-7700) 77. Zona 77 (7700-7800) 78. Zona 78 (7800-7900) 79. Zona 79 (7900-8000) 80. Zona 80 (8000-8100) 81. Zona 81 (8100-8200) 82. Zona 82 (8200-8300) 83. Zona 83 (8300-8400) 84. Zona 84 (8400-8500) 85. Zona 85 (8500-8600) 86. Zona 86 (8600-8700) 87. Zona 87 (8700-8800) 88. Zona 88 (8800-8900) 89. Zona 89 (8900-9000) 90. Zona 90 (9000-9100) 91. Zona 91 (9100-9200) 92. Zona 92 (9200-9300) 93. Zona 93 (9300-9400) 94. Zona 94 (9400-9500) 95. Zona 95 (9500-9600) 96. Zona 96 (9600-9700) 97. Zona 97 (9700-9800) 98. Zona 98 (9800-9900) 99. Zona 99 (9900-10000) 	<p>CONDICION MARITIMA</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. Zona 1 (100-200) 2. Zona 2 (200-300) 3. Zona 3 (300-400) 4. Zona 4 (400-500) 5. Zona 5 (500-600) 6. Zona 6 (600-700) 7. Zona 7 (700-800) 8. Zona 8 (800-900) 9. Zona 9 (900-1000) 10. Zona 10 (1000-1100) 11. Zona 11 (1100-1200) 12. Zona 12 (1200-1300) 13. Zona 13 (1300-1400) 14. Zona 14 (1400-1500) 15. Zona 15 (1500-1600) 16. Zona 16 (1600-1700) 17. Zona 17 (1700-1800) 18. Zona 18 (1800-1900) 19. Zona 19 (1900-2000) 20. Zona 20 (2000-2100) 21. Zona 21 (2100-2200) 22. Zona 22 (2200-2300) 23. Zona 23 (2300-2400) 24. Zona 24 (2400-2500) 25. Zona 25 (2500-2600) 26. Zona 26 (2600-2700) 27. Zona 27 (2700-2800) 28. Zona 28 (2800-2900) 29. Zona 29 (2900-3000) 30. Zona 30 (3000-3100) 31. Zona 31 (3100-3200) 32. Zona 32 (3200-3300) 33. Zona 33 (3300-3400) 34. Zona 34 (3400-3500) 35. Zona 35 (3500-3600) 36. Zona 36 (3600-3700) 37. Zona 37 (3700-3800) 38. Zona 38 (3800-3900) 39. Zona 39 (3900-4000) 40. Zona 40 (4000-4100) 41. Zona 41 (4100-4200) 42. Zona 42 (4200-4300) 43. Zona 43 (4300-4400) 44. Zona 44 (4400-4500) 45. Zona 45 (4500-4600) 46. Zona 46 (4600-4700) 47. Zona 47 (4700-4800) 48. Zona 48 (4800-4900) 49. Zona 49 (4900-5000) 50. Zona 50 (5000-5100) 51. Zona 51 (5100-5200) 52. Zona 52 (5200-5300) 53. Zona 53 (5300-5400) 54. Zona 54 (5400-5500) 55. Zona 55 (5500-5600) 56. Zona 56 (5600-5700) 57. Zona 57 (5700-5800) 58. Zona 58 (5800-5900) 59. Zona 59 (5900-6000) 60. Zona 60 (6000-6100) 61. Zona 61 (6100-6200) 62. Zona 62 (6200-6300) 63. Zona 63 (6300-6400) 64. Zona 64 (6400-6500) 65. Zona 65 (6500-6600) 66. Zona 66 (6600-6700) 67. Zona 67 (6700-6800) 68. Zona 68 (6800-6900) 69. Zona 69 (6900-7000) 70. Zona 70 (7000-7100) 71. Zona 71 (7100-7200) 72. Zona 72 (7200-7300) 73. Zona 73 (7300-7400) 74. Zona 74 (7400-7500) 75. Zona 75 (7500-7600) 76. Zona 76 (7600-7700) 77. Zona 77 (7700-7800) 78. Zona 78 (7800-7900) 79. Zona 79 (7900-8000) 80. Zona 80 (8000-8100) 81. Zona 81 (8100-8200) 82. Zona 82 (8200-8300) 83. Zona 83 (8300-8400) 84. Zona 84 (8400-8500) 85. Zona 85 (8500-8600) 86. Zona 86 (8600-8700) 87. Zona 87 (8700-8800) 88. Zona 88 (8800-8900) 89. Zona 89 (8900-9000) 90. Zona 90 (9000-9100) 91. Zona 91 (9100-9200) 92. Zona 92 (9200-9300) 93. Zona 93 (9300-9400) 94. Zona 94 (9400-9500) 95. Zona 95 (9500-9600) 96. Zona 96 (9600-9700) 97. Zona 97 (9700-9800) 98. Zona 98 (9800-9900) 99. Zona 99 (9900-10000)
---	--

CONDICION MARITIMA

- 1. Zona 1 (100-200)
- 2. Zona 2 (200-300)
- 3. Zona 3 (300-400)
- 4. Zona 4 (400-500)
- 5. Zona 5 (500-600)
- 6. Zona 6 (600-700)
- 7. Zona 7 (700-800)
- 8. Zona 8 (800-900)
- 9. Zona 9 (900-1000)
- 10. Zona 10 (1000-1100)
- 11. Zona 11 (1100-1200)
- 12. Zona 12 (1200-1300)
- 13. Zona 13 (1300-1400)
- 14. Zona 14 (1400-1500)
- 15. Zona 15 (1500-1600)
- 16. Zona 16 (1600-1700)
- 17. Zona 17 (1700-1800)
- 18. Zona 18 (1800-1900)
- 19. Zona 19 (1900-2000)
- 20. Zona 20 (2000-2100)
- 21. Zona 21 (2100-2200)
- 22. Zona 22 (2200-2300)
- 23. Zona 23 (2300-2400)
- 24. Zona 24 (2400-2500)
- 25. Zona 25 (2500-2600)
- 26. Zona 26 (2600-2700)
- 27. Zona 27 (2700-2800)
- 28. Zona 28 (2800-2900)
- 29. Zona 29 (2900-3000)
- 30. Zona 30 (3000-3100)
- 31. Zona 31 (3100-3200)
- 32. Zona 32 (3200-3300)
- 33. Zona 33 (3300-3400)
- 34. Zona 34 (3400-3500)
- 35. Zona 35 (3500-3600)
- 36. Zona 36 (3600-3700)
- 37. Zona 37 (3700-3800)
- 38. Zona 38 (3800-3900)
- 39. Zona 39 (3900-4000)
- 40. Zona 40 (4000-4100)
- 41. Zona 41 (4100-4200)
- 42. Zona 42 (4200-4300)
- 43. Zona 43 (4300-4400)
- 44. Zona 44 (4400-4500)
- 45. Zona 45 (4500-4600)
- 46. Zona 46 (4600-4700)
- 47. Zona 47 (4700-4800)
- 48. Zona 48 (4800-4900)
- 49. Zona 49 (4900-5000)
- 50. Zona 50 (5000-5100)
- 51. Zona 51 (5100-5200)
- 52. Zona 52 (5200-5300)
- 53. Zona 53 (5300-5400)
- 54. Zona 54 (5400-5500)
- 55. Zona 55 (5500-5600)
- 56. Zona 56 (5600-5700)
- 57. Zona 57 (5700-5800)
- 58. Zona 58 (5800-5900)
- 59. Zona 59 (5900-6000)
- 60. Zona 60 (6000-6100)
- 61. Zona 61 (6100-6200)
- 62. Zona 62 (6200-6300)
- 63. Zona 63 (6300-6400)
- 64. Zona 64 (6400-6500)
- 65. Zona 65 (6500-6600)
- 66. Zona 66 (6600-6700)
- 67. Zona 67 (6700-6800)
- 68. Zona 68 (6800-6900)
- 69. Zona 69 (6900-7000)
- 70. Zona 70 (7000-7100)
- 71. Zona 71 (7100-7200)
- 72. Zona 72 (7200-7300)
- 73. Zona 73 (7300-7400)
- 74. Zona 74 (7400-7500)
- 75. Zona 75 (7500-7600)
- 76. Zona 76 (7600-7700)
- 77. Zona 77 (7700-7800)
- 78. Zona 78 (7800-7900)
- 79. Zona 79 (7900-8000)
- 80. Zona 80 (8000-8100)
- 81. Zona 81 (8100-8200)
- 82. Zona 82 (8200-8300)
- 83. Zona 83 (8300-8400)
- 84. Zona 84 (8400-8500)
- 85. Zona 85 (8500-8600)
- 86. Zona 86 (8600-8700)
- 87. Zona 87 (8700-8800)
- 88. Zona 88 (8800-8900)
- 89. Zona 89 (8900-9000)
- 90. Zona 90 (9000-9100)
- 91. Zona 91 (9100-9200)
- 92. Zona 92 (9200-9300)
- 93. Zona 93 (9300-9400)
- 94. Zona 94 (9400-9500)
- 95. Zona 95 (9500-9600)
- 96. Zona 96 (9600-9700)
- 97. Zona 97 (9700-9800)
- 98. Zona 98 (9800-9900)
- 99. Zona 99 (9900-10000)

1. Este mapa fue elaborado con los datos suministrados por el Instituto Geográfico y Catastral de Costa Rica.
 2. Los límites administrativos de las provincias y cantones se indican con líneas discontinuas.
 3. Los límites de las zonas de cultivo se indican con líneas continuas.
 4. Los límites de las zonas de cultivo se indican con líneas continuas.
 5. Los límites de las zonas de cultivo se indican con líneas continuas.

para el desarrollo de P. vulgaris en Costa Rica. Cada unidad está identificada con el quebrado explicado en Materiales y Métodos y en el Cuadro 14. En el Mapa 1 se observa una línea gruesa que corresponde al límite agroclimático general. Teóricamente toda área situada fuera de este límite probablemente no es apta para el desarrollo del cultivo. Dentro de los límites agroclimáticos generales, en las áreas que no han sido delimitadas con variables fisioedáficas, se podrá implantar el cultivo siempre y cuando existan condiciones de suelo adecuadas.

Cuadro 14. Explicación de los índices usados en el quebrado de clasificación para la zonificación del frijol (A_2N_1).

	Optima (1)	Tendencia al Déficit Térmico (2)	Tendencia al Exceso Térmico (3)
Condición térmica	20 ⁺ - 23 ⁻	17 - 20 ⁻	23 ⁺ - 27
	(1)	(2)	(3)
Condición Hídrica (duración período de siembra, en días)	>50	30 a 60	1 a 30
	(1)	(2)	(3)
Condición Fisioedáfica	Muy buena	Buena	Regular
Limitantes fisioedáficos			
d Drenaje			
e Pendiente			
p Pesados			

En el Cuadro 15 se puede observar la distribución en categorías de las unidades de zonificación ubicadas en el Mapa 1 así como su superficie parcial y total.

Cuadro 15. Jerarquización y clasificación de las unidades de zonificación para el cultivo del Phaseolus vulgaris en Costa Rica (miles de hectáreas).

Categoría (probabilidad de obtención de buenos rendimientos)					
(I) Muy alta	(II) Alta	(III) Regular	(IV) Baja	(V) Muy baja	
11/1 =	13/1 = 29,23	22/1 = 1,20	12/3 = 15,32	31/3 =	
12/1 = 0,40	22/1 = 3,42	12/2 = 2,82	13/3 = 25,2	32/2 =	
21/1 = 3,62	31/1 =	11/3 =	21/3 =	23/3 = 2,01	
	11/2 = 5,04	32/1 = 43,75	22/2 =	33/2 = 41,73	
		21/2 = 3,42	31/2 =	32/3 = 17,13	
		13/2 = 3,83	23/2 =	33/3 = 19,35	
		33/1 = 121,16	22/3 =		
Sub- total	4,02	32,66	181,24	40,52	80,23
	4,1%	9,6%	53,51%	11,9%	23,6%
Total 333,68					

El mayor porcentaje de las unidades corresponden a la categoría "regular" con un 53 por ciento del área total. Las tres primeras categorías totalizan un 64 por ciento, lo cual es aceptable, dentro del marco regional

centroamericano, sin embargo, notamos una fuerte ausencia de áreas en la categoría "muy alta" en comparación con otros países centroamericanos.

La ubicación de las áreas zonificadas y mapificadas para el cultivo del frijol, podemos hacerla mediante la superposición con un mapa político-administrativo. Al efectuar esto nos encontramos que existe una amplia coincidencia entre las áreas actuales y las áreas potenciales detalladas en el mapa, así como una concordancia amplia para las zonas marginales actuales con las áreas de probabilidad muy baja de obtener buenos rendimientos.

El primer nivel de precisión agroclimática dentro del marco de la segunda aproximación marca la pauta de la zonificación ecológica de cultivos. Con la aplicación del segundo nivel de precisión, es que vamos a continuar la investigación que nos lleva a solucionar problemas más detallados como sería determinar dentro de las áreas ubicadas anteriormente, cuál sería la fecha óptima de siembra, qué variabilidad presenta esa fecha óptima, cuál sería el porcentaje de años negativos, etc.

4.2 Zonificación de línea (segunda aproximación - segundo nivel de precisión).

Algunas de las variables que detectamos en este nivel hubieran podído lograrse de una manera aproximada en el primer nivel de precisión. Así se hizo con la duración de la época de siembra. La comprobación estadística entre la duración de la época de siembra estimada por el primer nivel con la obtenida por el segundo, arroja un coeficiente de determinación del 78 por ciento (Figura 4). Si bien en general el coeficiente es aceptable, existen para algunas localidades diferencias marcadas y hace creer que hubo un considerable aumento en la precisión con el segundo nivel. Se

realizó la misma comprobación para la fecha óptima de siembra arrojando un coeficiente de determinación del 72 por ciento ($R^2 = 0,72$) (Figura 5).

Las mayores diferencias se encuentran en aquellas localidades donde existen años negativos. A medida que el porcentaje de años negativos aumenta la diferencia es mayor. En estos casos los valores obtenidos con el primer nivel de precisión tienen la tendencia de aparecer antes en el tiempo que los obtenidos por el segundo nivel.

En el Cuadro 13 se pueden apreciar los valores de las principales variables (con asterisco). En el caso de la temperatura y suelo se ha indicado el índice jerárquico de acuerdo con el Cuadro 14.

También en el Cuadro 13 se observa que existe una estrecha relación entre aquellas estaciones cuya duración de la época de siembra es cero y el porcentaje de años negativos. Los valores obtenidos para la fecha óptima y fecha de comienzo de la época de siembra son relativamente bajos en toda la región en estudio. En las localidades sin posibilidades de cultivo, debido a la indeterminación que se obtiene al calcular el coeficiente de variación, se tomó el criterio de darle el valor de 100 para las variables X_2 y X_3 y el de 220 para la variable X_4 . En este caso 220 es el máximo valor observado para el coeficiente de variación de las localidades en estudio.

Las magnitudes de las deficiencias y excesos también están indicadas en un paréntesis con un número al lado que nos indica su jerarquía de acuerdo con el Cuadro 16, donde se indican las combinaciones a obtenerse entre excesos y deficiencias de agua en el suelo. Aquellas localidades donde no es posible desarrollarse en condiciones económicas, también tienen en el Cuadro 13, la magnitud de esos límites hídricos; a éstos se les dio un valor

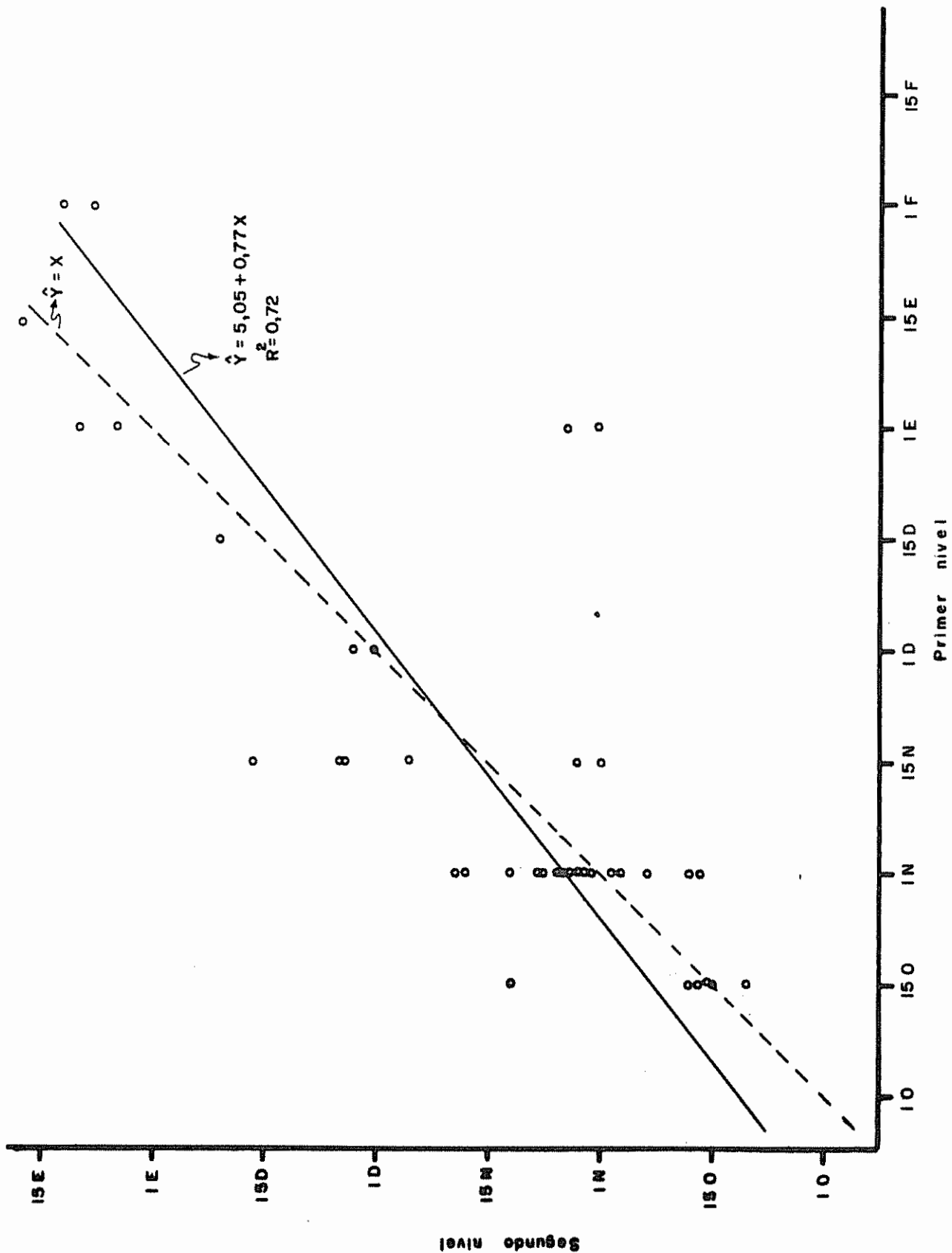


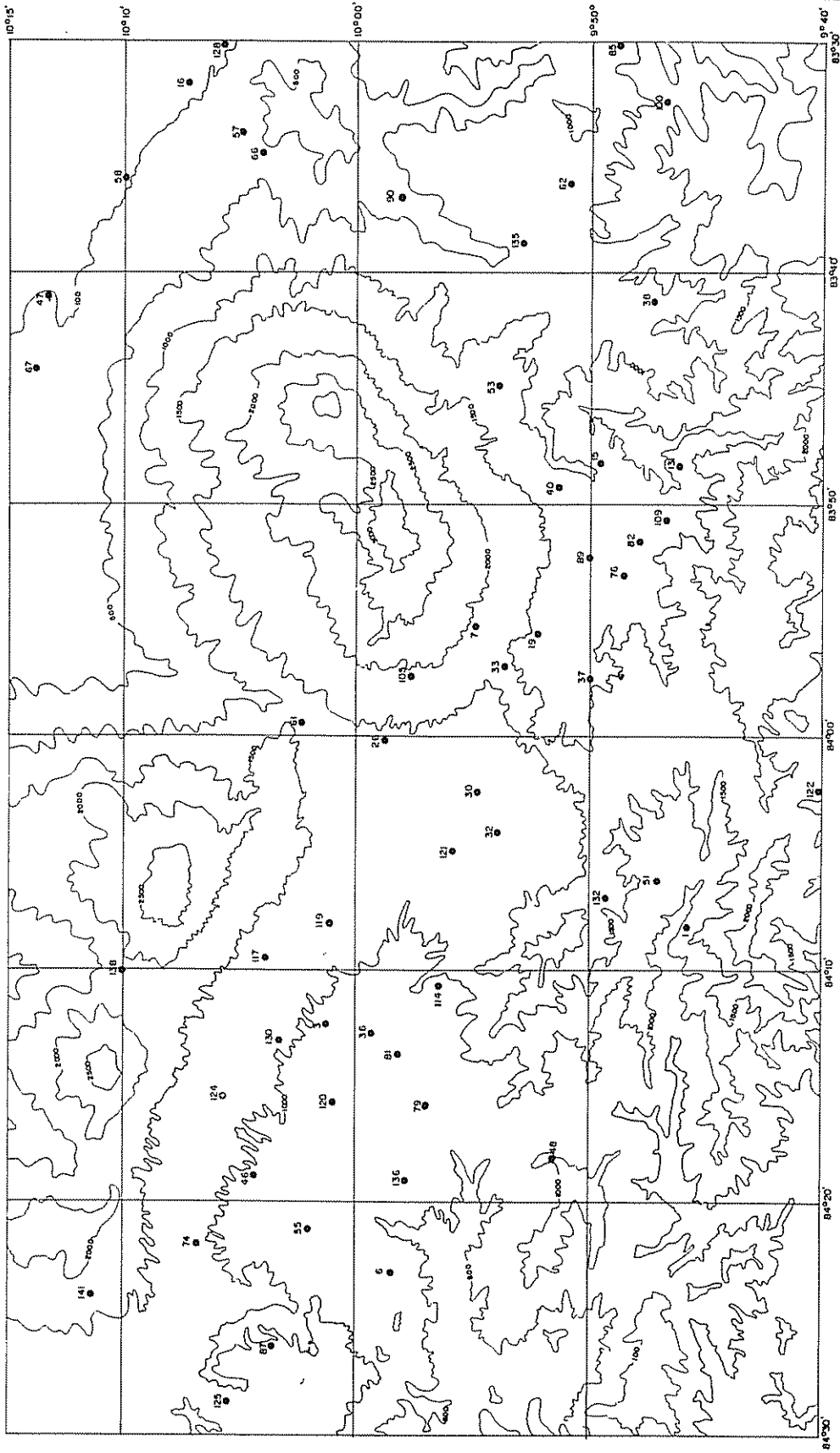
Fig. 5 Epoca de siembra óptima detectada por el primer nivel de precisión contra el segundo nivel de precisión

escalar, para poder integrarlos al análisis discriminatorio. Para los años negativos y para la duración se han usado las escalas jerárquicas del Cuadro 16.

Cuadro 16. Jerarquías para distintas categorías hídricas, de duración de la época de siembra y de años negativos (segunda aproximación -- segundo nivel de precisión).

Deficiencias de agua mm		Excesos de agua mm		Jerarquía
>0 a 20		0 a 20		1
>0 a 20		20 a 80		2
>0 a 20		>80		4
20 a 80		0 a 20		3
20 a 80		20 a 80		5
20 a 80		>80		6
>80		0 a 20		7
>80		20 a 80		8
>80		>80		9

Duración		% años negativos	
Días	Jerarquía	%	Jerarquía
>60	1	0 - 10	1
30 - 60	2	10 - 30	2
15 a 30	3	>30	3
>15	4		



INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA

Proyecto :

Contribución a la Metodología Agroclimática con Aplicación en la Zonificación Ecológica de Cultivos Anuales

Autor : Ing. Javier García Benavides M.S.

Dibujó : Emilio Ortiz Cordero

AREA EN ESTUDIO :

Meseta Central y Alrededores (Costa Rica)

Curvas de nivel y ubicación de estaciones

Escala 1:250.000

MAPA N° 2

4.2.1 Representación cartográfica

4.2.1.1 Mapa de suelos

En el Mapa 3 se han transcrito las distintas unidades de uso potencial de la tierra en la región en estudio. Para aquellas localidades que no estaban ubicadas dentro de una unidad de suelos adecuada para el cultivo del P. vulgaris se asignó un valor de 4 en la escala jerárquica con objeto de efectuar el análisis discriminatorio posterior.

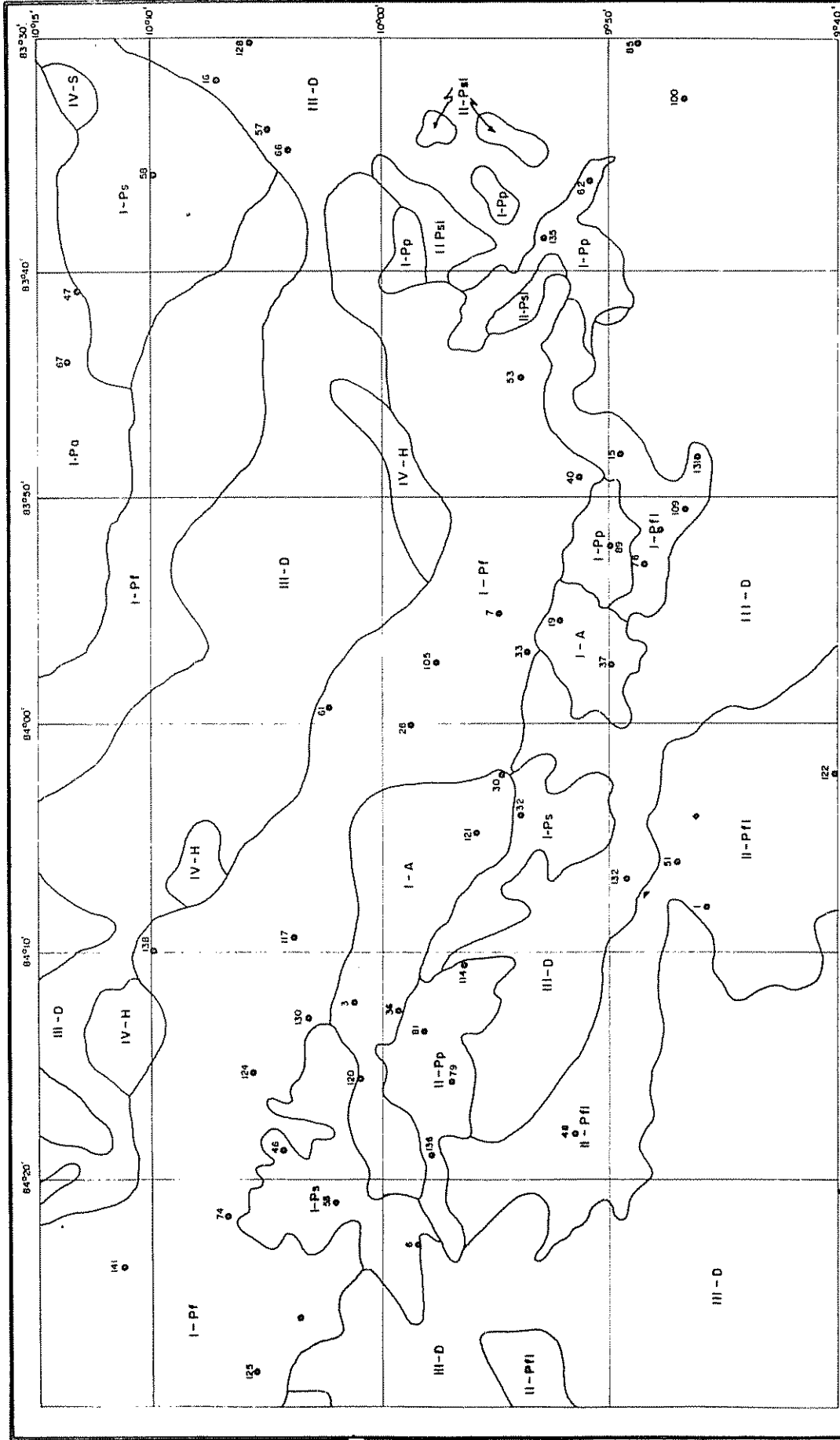
4.2.1.2 Mapas de variables agroclimáticas. Mapa final.

Se efectuaron los análisis para ubicar en el espacio las isolíneas correspondientes a las siguientes variables:

- 1) Térmicas (17, 20, 23 y 27°C)
- 2) Duración de la época de siembra (15, 30, 60 días)
- 3) Porcentaje de años negativos (0, 10 y 30%)
- 4) Excesos de agua durante el ciclo (0, 20 y 80 mm)
- 5) Deficiencias de agua durante el ciclo (0, 20 y 80 mm).

También se efectuaron análisis para ubicar en el espacio los isófanos de siembra correspondientes a la fecha comienzo para sembrar y a la fecha considerada como óptima, a partir de la cual concurren en promedio las mejores condiciones para llevar a éxito el cultivo.

Siguiendo los pasos acostumbrados para la síntesis cartográfica llegamos al Mapa 4, que describe las áreas aptas para el desarrollo del Phaseolus vulgaris; cada área está definida por un valor relativo que va desde el 1 al 58. Estos números fueron dados de tal forma que proceden de la ordenación de las áreas de mejor a peor dentro de las regiones en estudio. Cada área está identificada con un quebrado de cinco índices del tipo TDH/SP donde T, D, H, S y P simbolizan respectivamente, a las jerarquías



LEYENDA

- AREAS I - USO INTENSIVO**
- I-A** Areas planas o con pendientes de origen aluvial, con suelos fértiles de textura franca o franco-arenosa, ricas en materia orgánica y nutrientes. Son aptas para cultivos anuales como permanentes y ganadería extensiva; requieren el empleo de métodos sencillos de conservación.
- I-Pp** Areas planas o casi planas, de origen aluvial, con suelos ligeramente pesados de textura limosa o limo-arcilloso. Son aptas para cultivos permanentes y ganadería intensiva; requieren de facilidades de drenaje y el empleo de métodos sencillos de conservación.
- I-Ps** Areas de lomeríos bajos, de origen aluvial, con suelos de ligeros a pesados de textura arcillosa o arcillo-limosa. Son aptas para cultivos permanentes y ganadería intensiva; requieren el empleo de métodos sencillos de conservación.
- I-Ppi** Areas de lomeríos ocultos, de origen aluvial, de cañales, de cerros y con algunas partes escarpadas, localizadas en su mayor parte de las laderas de los cerros; con suelos de ligeros a pesados de textura arcillosa o arcillo-limosa, ricas en materia orgánica y nutrientes, responden bien a la aplicación de fertilizantes. Son aptas para cultivos permanentes y ganadería intensiva. Los cultivos requieren el empleo de métodos sencillos de conservación. Los cultivos anuales requieren el empleo de una tecnología más desarrollada y de sistemas más refinados de conservación de suelos.

- AREAS II - USO EXTENSIVO**
- II-Psi** Areas de lomeríos bajos, con suelos pesados en proceso de litonización, de textura arcillosa. Son aptas para cultivos permanentes y ganadería extensiva; requieren de algunas prácticas simples de conservación.
- II-Pfi** Areas para cultivos permanentes y ganadería extensiva, requieren de algunas prácticas simples de conservación.
- AREAS III - USO FORESTAL**
- III-D** Areas aptas para el mantenimiento y explotación del bosque natural.
- IV-H** Areas de terrenos escarpados, localizados a una altitud superior a los 2000 metros snm. No son aptas para usos agrícolas.

AREAS IV - USO EXTENSIVO

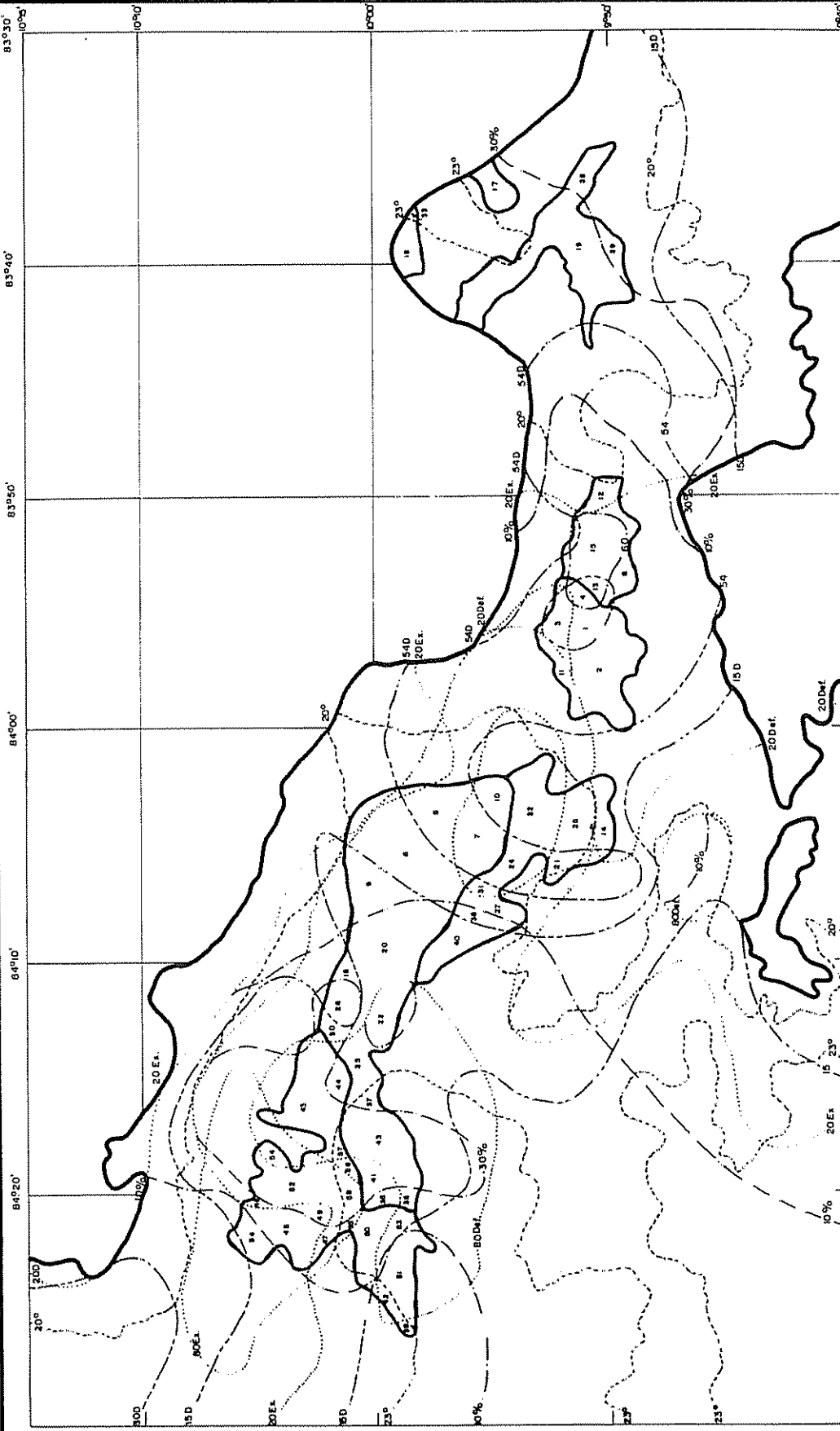
Areas de terrenos escarpados, con suelos pesados, en proceso de litonización y de textura arcillosa. Son aptas para cultivos permanentes y ganadería extensiva, requieren de algunas prácticas simples de conservación.

COSTA RICA
AREA EN ESTUDIO : MAPA Nº 3
Meseta Central y Alrededores

Zonificación ecológica para el cultivo del frijol
(segunda aproximación - segundo nivel de precisión)

Autor : Ing. Javier García Benavides M. S.
Dibujó : Emilio Ortiz Cordero

0 5 10 15
 Kilómetros



IDENTIFICACION, CLASIFICACION Y JERARQUIZACION DE LAS AREAS APTAS PARA EL CULTIVO DE MEJOR A PEOR

1 + 211	7 + 126	13 + 211	19 + 132	25 + 135	31 + 136	37 + 346	43 + 346	49 + 147	55 + 346
11	11	22	22	31	31	12	13	33	32
2 + 221	6 + 135	14 + 231	20 + 145	26 + 135	32 + 136	38 + 135	44 + 346	50 + 345	56 + 345
11	11	31	12	13	31	32	32	32	33
3 + 213	9 + 145	15 + 221	21 + 125	27 + 135	33 + 332	39 + 135	45 + 147	51 + 338	57 + 346
11	11	22	31	31	31	32	32	32	33
4 + 212	10 + 136	16 + 135	22 + 146	28 + 132	34 + 157	40 + 145	46 + 148	52 + 148	58 + 348
12	12	12	12	23	31	32	32	33	33
5 + 125	11 + 225	17 + 132	23 + 146	29 + 132	35 + 145	41 + 148	47 + 148	53 + 346	59 + 346
11	11	22	12	23	12	13	32	32	32
6 + 221	12 + 222	18 + 132	24 + 126	30 + 145	36 + 146	42 + 136	48 + 146	54 + 149	60 + 346
21	21	22	31	13	12	12	33	33	33

Zonificación ecológica para el cultivo del frijol
(segunda aproximación -segundo nivel de precisión)

COSTA RICA

AREA EN ESTUDIO : MAPA Nº 4
Meseta Central y Alrededores

T D H
S P

- T Índice térmico
- D Duración época de siembra
- H Índice hídrico
- S Suebos
- P Porcentaje años negativos

Autor : Ing. Javier García Benavides, M.S.
Dibujó : Emilio Ortiz Cordero



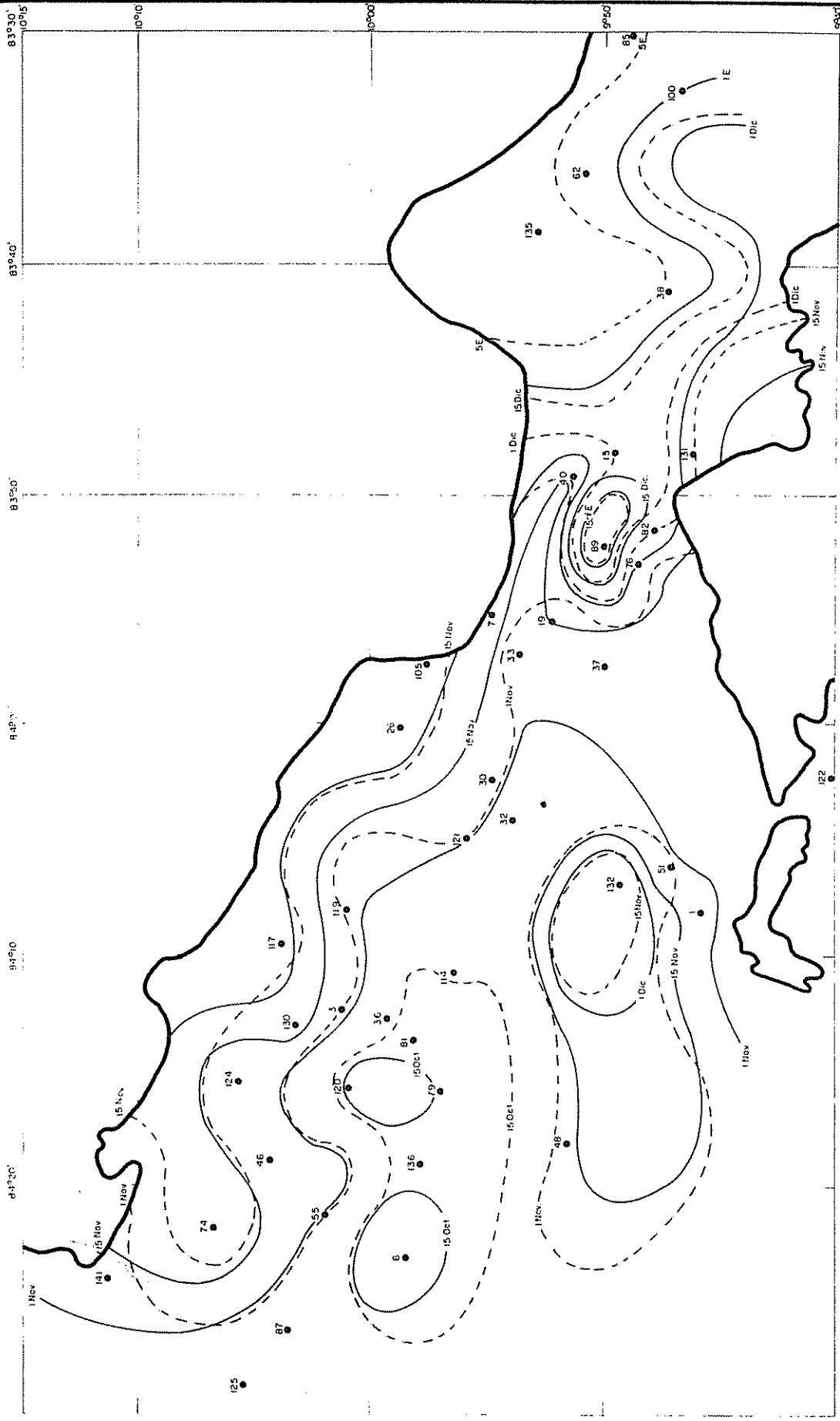
térmicas, duración de época de siembra, hídricas, suelos y porcentaje de años negativos.

En el Mapa 4 se puede observar que la mejor combinación encontrada en la región en estudio fue la 211/11 y la peor 348/33. Tanto la primera como la última están muy cerca o tan inmediatas a los límites óptimos y marginal, respectivamente. Las áreas que quedaron muy pequeñas al efectuar la síntesis cartográfica no fueron tomadas en cuenta para no sobrecargar el mapa, pudiendo fácilmente ser absorbidos por las áreas vecinas de mayor espacio. En dicho mapa se puede ver una línea de trazo grueso que corresponde al límite agroclimático general; fuera de ella posiblemente no se dará el cultivo y dentro de ella podrá darse si existen condiciones edáficas para ello. Si eso ocurriese sería en áreas de muy pequeña extensión que no están consignadas en el mapa de uso potencial pero sí se hace la advertencia para la unidad I-Pf en el mapa correspondiente de suelos (Mapa 3).

4.2.1.3 Mapas adicionales.

Con el objeto de dar una orientación a los usuarios, aún sin contar con el mapa político general de Costa Rica (el cual debe ser usado para sintetizar), en el Mapa 2 se han representado las curvas de nivel y la ubicación de las localidades.

La búsqueda de cualquier punto en dicho mapa es fácil. En el Mapa 5 se representan las isófanos de la fecha comienzo de siembra y la fecha óptima, la primera con un trazo discontinuado y la segunda con trazo continuo. La oscilación en el espacio de dichas fechas de siembra es en términos generales 80 y 90 días. Diferencia considerable si se toma en cuenta la corta distancia geográfica, pero fácilmente explicable bajo el punto



Isofanos del comienzo de la época de siembra y de la fecha óptima de siembra del cultivo

Zonificación ecológica para el cultivo del frijol
(segunda aproximación - segundo nivel de precisión)

- - - - Comienzo época de siembra
- — — Fecha óptima de siembra

Autor Ing. Javier García Benavides M.S.
Dibujo: Emilio Ortiz Cordero

COSTA RICA
ÁREA EN ESTUDIO: MAPA Nº 5
Meseta Central y Alrededores



de vista meteorológico si observamos el caracter de transición de la zona en estudio, perteneciente parte a la vertiente Pacífica y parte a la vertiente Atlántica, con regímenes de circulación bien diferenciados que ocasionan las oscilaciones antes citadas.

4.2.2 Identificación de las áreas por un índice de sitio

El quebrado expuesto anteriormente y que está integrado por cinco variables puede presentar todas las combinaciones posibles entre las categorías de las variables. La ordenación debe ser facilitada por algún procedimiento que permita de una manera simple y a la vez efectiva, detectar las posiciones óptimas y marginales e identificar áreas homólogas en lo que respecta a la obtención de rendimientos, en las distintas regiones.

La ordenación puede realizarse efectuando simples sumas o multiplicaciones de los índices del quebrado. Sin embargo, de esta manera no se puede establecer homología absoluta. Es decir, posiblemente la combinación 113/11 no será igual a la 111/13. Para solucionar el problema se ha desarrollado unos índices equivalentes bajo el punto de vista teórico y aproximados que permiten valorar la importancia de cada uno de los números del quebrado en una escala común (Cuadro 17).

En este caso el primer quebrado anterior valdrá 1,8 (multiplicando) y el segundo 3, inclinándonos por la bondad de la primera zona con respecto a la segunda. Aunque los valores indicados en el Cuadro 17 son tentativos, permiten lograr una mayor aproximación que siguiendo los valores indicados en el quebrado, los cuales servirán para identificar y cuantificar las variables a las cuales pertenecen.

Cuadro 17. Índices equivalentes para la integración del índice de sitio del quebrado zonificador.

Variable	Indice	Indice equivalente aproximado
Térmica	1	1
	2	1,5
	3	2
Duración época de siembra	1	1
	2	1,2
	3	1,4
	4	1,6
Hídrico	1	1
	2	1,4
	3	1,8
	4	2,2
	5	2,6
	6	3,0
	7	3,4
	8	3,8
	9	4,2
Suelos	1	1
	2	2
	3	3
% años negativos	1	1
	2	2
	3	3

4.3 El análisis de factores múltiples "Factor analysis" (segunda aproximación - segundo nivel)

Para la primera y segunda parte de las descritas en Materiales y Métodos, para la aplicación en la zonificación del análisis de factores múltiples los resultados encontrados son muy similares en ambos índices de sitio (Cuadro 18). En la primera parte resultaría difícil efectuar

Cuadro 13. Índices de sitio para cada una de las localidades en estudio de acuerdo al análisis discriminatorio de las siete u ocho variables seleccionadas.

Localidad	Índices de sitio (siete) (ocho)		Localidad	Índices de sitio (siete) (ocho)		Localidad	Índices de sitio (siete) (ocho)	
1	6,18	6,42	55	12,83	13,05	109	18,82	18,02
3	7,10	6,36	57	19,20	19,41	114	8,83	9,05
6	8,91	3,22	58	19,74	19,94	117	7,18	7,42
7	4,59	4,84	61	18,48	18,68	119	7,91	7,18
15	5,78	6,01	62	7,87	7,47	120	9,81	9,07
16	19,21	19,41	66	19,92	20,13	121	6,36	5,63
19	4,91	4,20	67	19,92	20,13	122	8,53	8,76
26	4,62	4,88	74	7,55	7,45	124	9,86	10,05
30	5,77	6,04	76	4,68	4,30	125	7,37	7,60
32	6,43	6,34	79	8,00	8,22	128	19,67	19,88
33	6,71	6,95	81	9,11	9,33	130	8,31	8,20
36	8,55	7,81	82	4,39	4,64	131	6,61	6,85
37	4,46	3,77	85	8,31	8,53	132	6,11	6,36
38	7,74	7,98	87	9,11	7,26	135	6,55	6,46
40	5,68	5,93	89	6,48	6,10	136	10,29	9,57
46	12,67	12,88	90	19,01	19,22	138	20,62	20,83
47	19,01	19,22	98	8,16	8,38	141	5,76	6,00
51	9,82	10,02	100	7,70	7,94			
53	17,97	18,17	105	6,06	6,30			

la separación de áreas por el factor suelo dentro del marco geográfico apto para el cultivo bajo el punto de vista agroclimático. Es por ello que preferimos encontrar un índice común agroclimático mediante esta técnica y efectuar siempre la síntesis cartográfica de él con el mapa de uso potencial

de la tierra con que trabajamos anteriormente.

En la tercera parte se encontraron algunas diferencias entre los índices, aunque no muy importantes. En el Cuadro 18 se puede ver el índice de sitio para cada localidad, involucradas todas ellas y para siete y ocho variables agroclimáticas.

4.3.1 Matrices de correlación

En los Cuadros 19 y 20 vemos las matrices de correlación que expresan la estructura de asociación de las variables, en los casos que se usaron siete u ocho variables. La estructura básica en ambas indica que existen asociaciones de importancia excepto para la variable X_8 y para la combinación X_1-X_7 .

La interrelación de las siete u ocho variables expresadas en la matriz de correlación es el ingrediente fundamental para estimar las ponderaciones de los factores (First Factor Loading) o sea, su participación para discriminar la importancia de los diversos sitios.

Podemos ver que prácticamente todas las variables tienen un alto poder discriminatorio, siendo la principal la X_3 seguida de la X_2 y la X_6 . La de menor valor discriminatorio es la X_7 para el caso de usar siete variables y la X_8 cuando usamos las ocho variables.

Como se indicó, la calificación final de los sitios se hará con el puntaje compuesto logrado a través de todas las variables (siete) que fueron combinadas gracias a las ponderaciones dadas por los componentes del "First Factor Loading." El índice de sitio tiene la siguiente expresión lineal:

Cuadro 19.

a) Medias y desviación estandar de las variables.

Variable	Medio	Desviación estandar
X ₁	10.21818	17.37677
X ₂	25.53814	39.42873
X ₃	25.17088	39.59741
X ₄	111.63636	69.42739
X ₅	5.40000	3.10190
X ₆	26.32727	29.27677
X ₇	1.74545	0.85744
X ₈	3.29000	1.15479

b) Matriz de correlación que expresa la estructura de asociación de las variables usadas en el estudio (ocho).

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈
X ₁	1,000							
X ₂	-0,525	1,000						
X ₃	-0,527	0,999	1,000					
X ₄	-0,307	0,809	0,808	1,000				
X ₅	-0,769	0,763	0,768	0,822	1,000			
X ₆	-0,712	0,860	0,868	0,839	0,782	1,000		
X ₇	-0,270	0,620	0,619	0,512	0,516	0,551	1,000	
X ₈	-0,225	0,330	0,335	0,316	0,210	0,327	0,240	1,000

c) Variancia común (communality) y estimado del primer factor de ponderación (Factor Loading).

Variable	Variancia común (R ²)	1 ^{er} Factor Loading
X ₁	0,541	-0,736
X ₂	0,878	0,937
X ₃	0,862	0,939
X ₄	0,831	0,912
X ₅	0,749	0,865
X ₆	0,849	0,921
X ₇	0,391	0,626
X ₈	0,135	0,368

Cuadro 20.

a) Medias y desviación estandar de las variables.

Variable	Media	Desviación estandar
X ₁	13.21818	17.37677
X ₂	25.53814	39.42873
X ₃	25.17088	39.59741
X ₄	111.63636	69.42738
X ₅	5.40000	3.10190
X ₆	26.32727	29.27677
X ₇	1.74545	0.85744

b) Matriz de correlación que expresa la estructura de asociación de las variables agroclimáticas y derivadas usadas en el estudio (siete).

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
X ₁	1,000						
X ₂	-0,525	1,000					
X ₃	-0,527	0,999	1,000				
X ₄	-0,807	0,809	0,808	1,000			
X ₅	-0,769	0,763	0,768	0,822	1,000		
X ₆	-0,712	0,866	0,868	0,839	0,782	1,000	
X ₇	-0,270	0,620	0,619	0,512	0,516	0,551	1,000

c) Variancia común (communality) y estimado del primer factor de ponderación (Factor Loading).

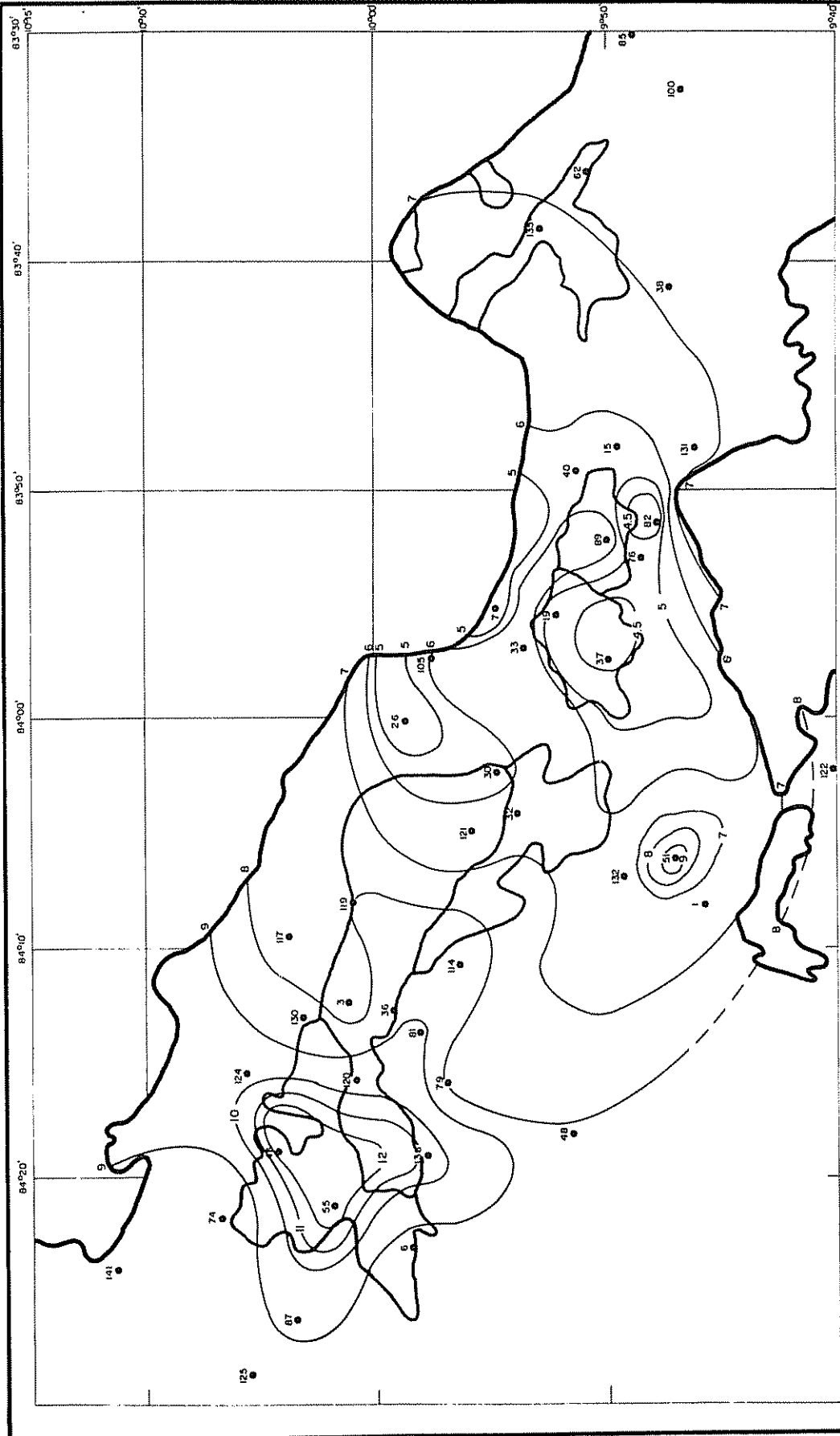
Variable	Variancia común (H ²)	1 ^{er} Factor Loading
X ₁	0,550	-0,741
X ₂	0,878	0,937
X ₃	0,880	0,938
X ₄	0,833	0,912
X ₅	0,744	0,880
X ₆	0,848	0,921
X ₇	0,387	0,622

$$I_s = -0,741 \left(\frac{X_1 - 18,2}{17,3} \right) \times 0,937 \left(\frac{X_2 - 25,5}{39,4} \right) \times 0,938 \left(\frac{X_3 - 25,1}{39,5} \right) \times 0,912 \left(\frac{X_4 - 111,6}{69,4} \right) \\ \times 0,88 \left(\frac{X_5 - 5,4}{3,1} \right) \times 0,921 \left(\frac{X_6 - 26,3}{29,2} \right) \times 0,622 \left(\frac{X_7 - 1,7}{0,85} \right)$$

En el Mapa 6 se indica el análisis de las isolíneas del índice de sitio. En él se han identificado las localidades por su índice compuesto y analizado dichos índices uniéndolos mediante isolíneas con valores que oscilan entre 4,5 y 12, e intervalos de 0,5. Se observa que se realizó la síntesis con el factor fisio-edáfico dando como resultado el mapa que consideraremos final para esta técnica.

Efectuando la regresión entre el índice de sitio calculado por el "Factor Analysis" y el derivado del quebrado procedente de la síntesis cartográfica se obtuvo un coeficiente de determinación del 61 por ciento ($R^2 = 0,61$).

La observación del Mapa 4 y su comparación con el Mapa 6 nos indica inmediatamente una fuerte asociación entre las distintas categorías indicadas en ambos en las áreas aptas para el desarrollo del Phaseolus vulgaris y en lo que respecta a posición, es decir, de mejor a peor. Si bien los límites de esas áreas en los dos mapas no son coincidentes, bien debido a la diferencia entre rangos, bien debido al matiz personal del analista al trazar las isolíneas, bien a que en el quebrado zonificador se totalizó cinco variables y el índice de sitio integró 7 variables, bien a que en el método de síntesis cartográfica todas las variables tienen el mismo efecto discriminatorio, es decir, presentan una discriminación discreta y no continua. mientras que el análisis discriminatorio toma en consideración



**Isolíneas del índice de sitio de acuerdo al "Análisis de Factores Múltiples"
(a menor índice corresponde mejor área)**

Zonificación ecológica para el cultivo del frijol
(segunda aproximación-segundo nivel de precisión)

COSTA RICA
AREA EN ESTUDIO: MAPA Nº 6

Autor: Ing. Javier García Benavides M.S.
Dibujó: Emilio Ortiz Cordero

Meseta Central y Alrededores



la continuidad, no obstante los puntos geográficos centrales de las categorías establecidas en el Mapa 6 coinciden con su correspondiente punto geográfico ubicado en un área identificada por un número equivalente en el rango usado en el Mapa 4.

4.4 Zonificación de punto (tercer nivel de precisión agroclimática)

4.4.1 Variables complementarias

4.4.1.1 Temperatura

Aunque la temperatura no figura entre las variables clasificadas anteriormente, introducimos a modo de orientación las condiciones generales de su distribución. Los registros termométricos en la década 61-70 presentan valores ligeramente más altos para la localidad Turen al compararlos con Acarigua. En el Cuadro 21 se expresan los valores mensuales de la temperatura promedio en °C. Las diferencias térmicas entre ambas localidades son poco significativas agroclimáticamente hablando. Es de hacer notar que las temperaturas promedios de Turen fueron calculadas en base a compuestos horarios y bihorarios en cambio las de Acarigua responden a la fórmula: $t_m = (t_{max} + t_{min})/2$, con la consiguiente diferencia entre ambos procedimientos de computo.

4.4.1.2 Transcurso de la precipitación mensual durante el ciclo

En el Cuadro 21 se pueden observar los valores promedios de la precipitación mensual para el período mayo-setiembre así como sus totales.

La precipitación en Turen para el período en estudio presenta también valores ligeramente más altos que en Acarigua pero no van a presentar en ninguna jerarquización agroclimática diferencias significativas. Al estudiar, sin embargo, los coeficientes de variación para las precipitaciones de cada mes en la serie de años, encontramos que la diferencia se

inclina hacia Acarigua donde ese elemento presenta mayor variabilidad (Cuadro 21).

Cuadro 21. Algunos valores de las variables complementarias usadas en el desarrollo del tercer nivel de precisión agroclimática.

		M	J	J	A	S	Total
Temperatura	Turen	27,7	26,4	25,1	26,4	26,7	
	Acarigua	26,6	25,7	25,3	25,3	26,0	
	Dif.	1,1	0,7	0,8	0,6	0,7	
Precipitación total	Turen	198	235	232	225	174	1114
	Acarigua	195	242	234	198	155	1024
Coeficiente de variación	Turen	32,9	26,3	22,4	34,8	45,4	%
	Acarigua	40,3	35,2	19,6	35,6	46,8	
Número de días con lluvia	Turen	17,5	23,2	24,5	21,8	16,9	104,0
	Acarigua	17,3	22,5	22,1	20,3	17,2	99,3
Promedio de agua caída en cada día con lluvia		11,6	12,2	9,6	10,3	10,1	\bar{X} 10,3
		11,7	10,7	10,7	9,8	9,1	10,4

El coeficiente de variación promedio para las precipitaciones mensuales dentro del ciclo (5 meses) es del orden del 37,5 por ciento para Turen y de 36,8 por ciento para Acarigua. Sin embargo, considerando la variabilidad de estos coeficientes de variación para las precipitaciones mensuales dentro del ciclo, nos encontramos con valores de 23,5 por ciento

para Turen y de 44,3 por ciento para Acarigua. No cabe duda que las precipitaciones son más variables en esta última localidad y pueden presentar posiciones diferentes en una jerarquización racional.

Las precipitaciones extremas mensuales para el período 1955-70 en Turen son de 394 y 72 mm. En Acarigua toman valores de 446 y 52 mm.

4.4.1.3 Número de días con lluvia y promedio de agua caída

en cada día con lluvia en mm.

En el Cuadro 21 se expresan también el número promedio de días con lluvia y la cantidad en mm de agua promedio caída en cada día con lluvia. La analogía entre estos índices para las dos localidades es casi perfecta. Si bien el estudio promedio del agua caída en cada día con lluvia no es muy completo, ya que nada nos dice de la incidencia de altas precipitaciones y de su frecuencia, nos da una idea general que puede complementar el estudio de otras variables.

4.4.1.4 Concordancia de las precipitaciones en ambas localidades

En la Figura 6 hemos representado los valores totales de precipitación durante el ciclo del cultivo para Turen y Acarigua en el eje de ordenados y abcisas respectivamente. No existe prácticamente ninguna relación entre las precipitaciones durante el ciclo de "invierno" en ambas localidades. El coeficiente de determinación es del orden del 12,2 por ciento ($r^2 = 0,122$).

Pudiéramos decir que años que presenten buenas condiciones hídricas en una de las localidades, pueden presentar malas condiciones en la otra localidad. La concordancia es muy pobre.

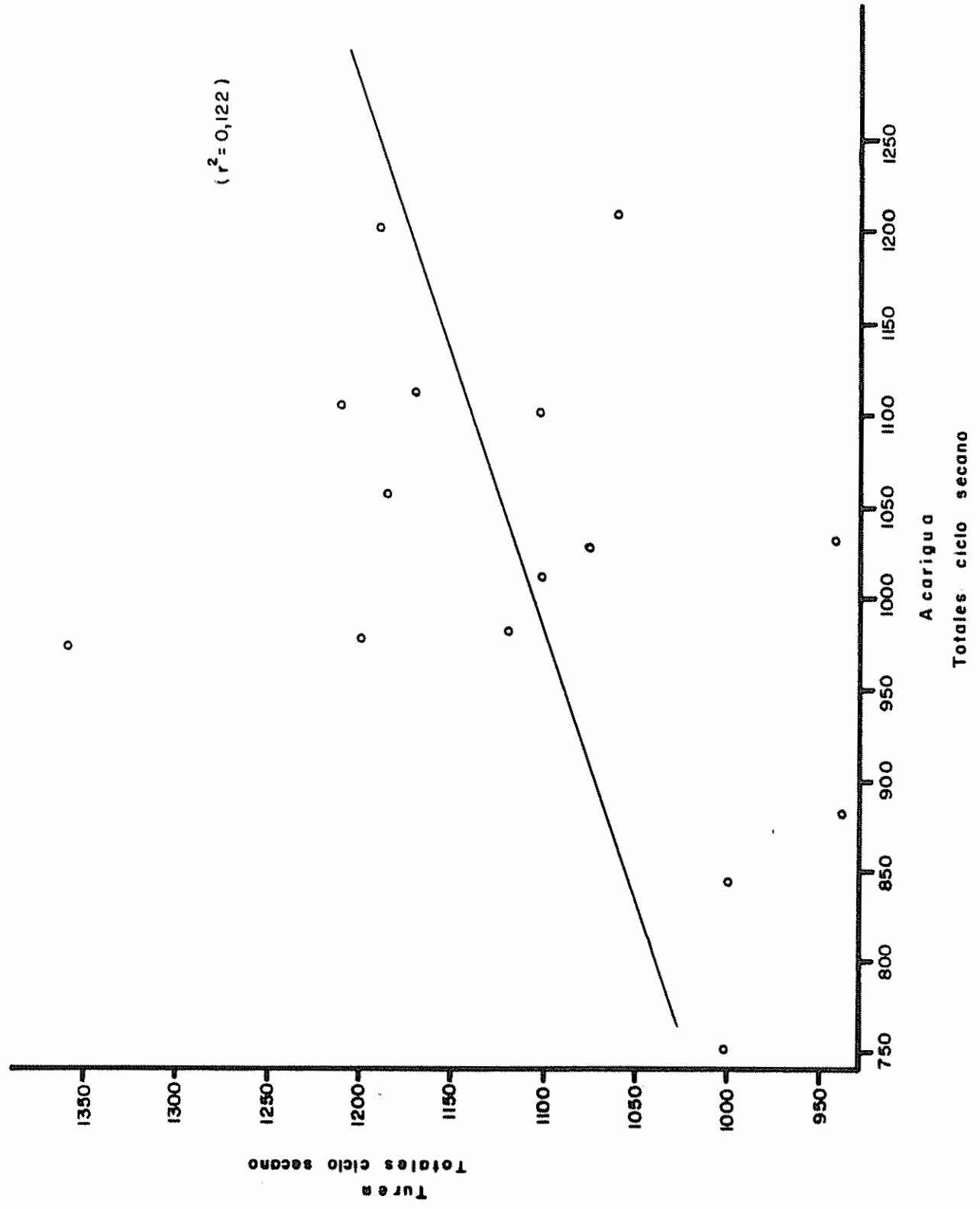


Fig. 6 Valores de precipitación total durante el ciclo (Turen vs. Acarigua)

4.4.1.5 Fechas de ocurrencia del primero y segundo grupo de lluvias para el ciclo (mayo-setiembre)

Durante la serie de años estudiada, las fechas promedio para el primero y segundo grupos de lluvias en Turen corresponden al 7 de mayo y 15 de mayo, respectivamente. Las fechas pertenecientes a Acarigua son el 3 y el 15 de mayo.

En ambas localidades existe una perfecta simultaneidad de la ocurrencia del primero y segundo grupos de lluvias, a partir de las cuales se efectúan las labores agrícolas que conducirán a la siembra del cultivo. Las Figuras 7 y 8 presentan la gráfica de la serie de las fechas de ocurrencia de los grupos de lluvia en ambas localidades. La correlación entre ambos valores, tanto para el primer grupo como para el segundo, presenta valores del coeficiente de determinación superiores al 90 por ciento ($r^2 = 0,902$).

4.4.2 Variables agroclimáticas

4.4.2.1 Balance hídrico

La importancia del uso del balance hídrico ya fue suficientemente explicado en los niveles de precisión agroclimática anteriores, así como la necesidad de efectuar en el tercer nivel un balance de agua a nivel diario.

Como ilustración general en las Figuras 9 y 10 presentamos la distribución de la precipitación y de la evapotranspiración potencial, ésta última calculada por el método de García E. y López (30) que parece ajustarse mejor a condiciones tropicales (30,56). En estos gráficos están representados los puntos de definición S , B_1 y B_2 . S representa el punto teórico de siembra promedio y se calcula a partir de la consideración que en

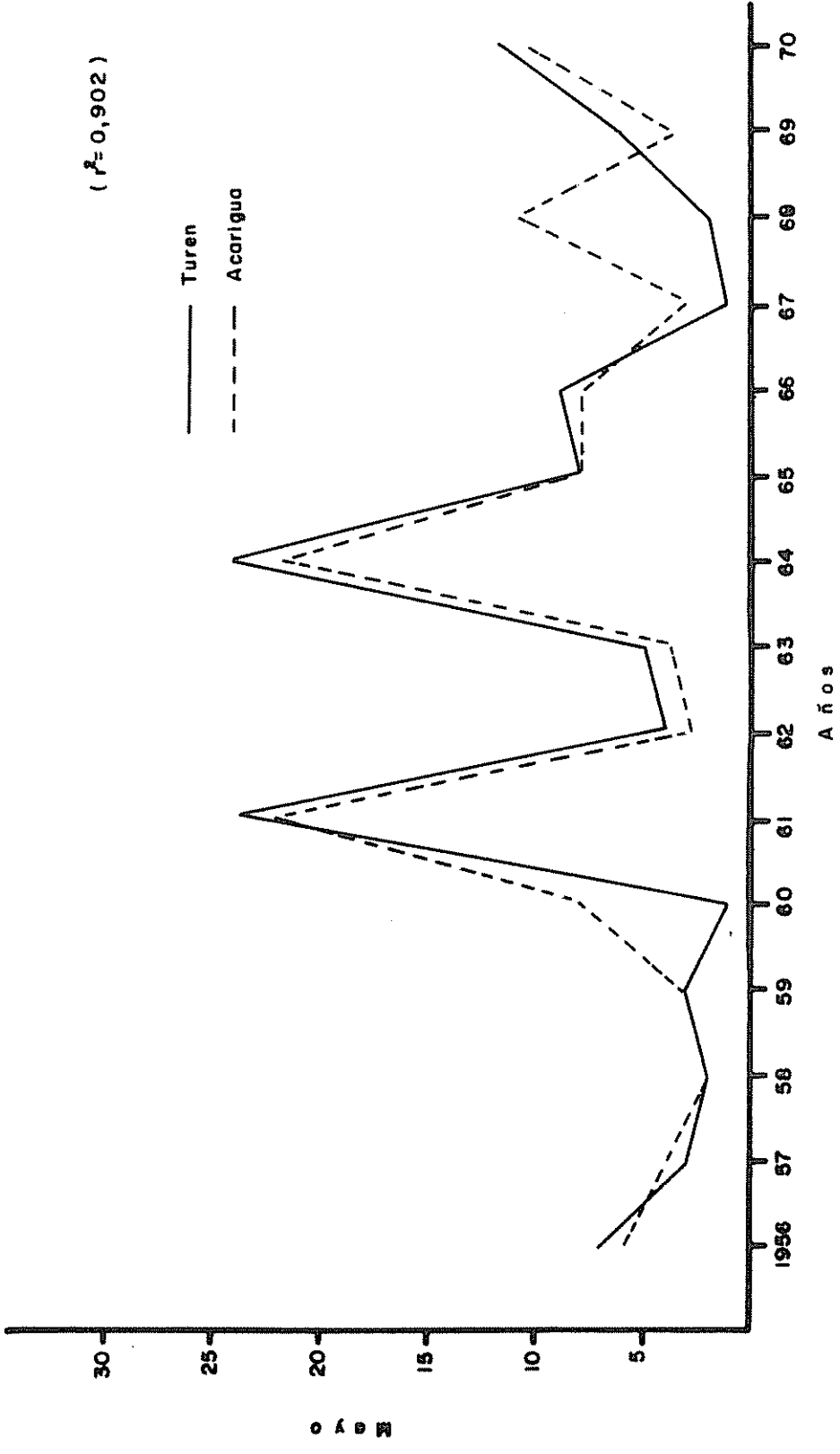


Fig. 7 Fechas de ocurrencia del primer grupo de lluvias en mayo

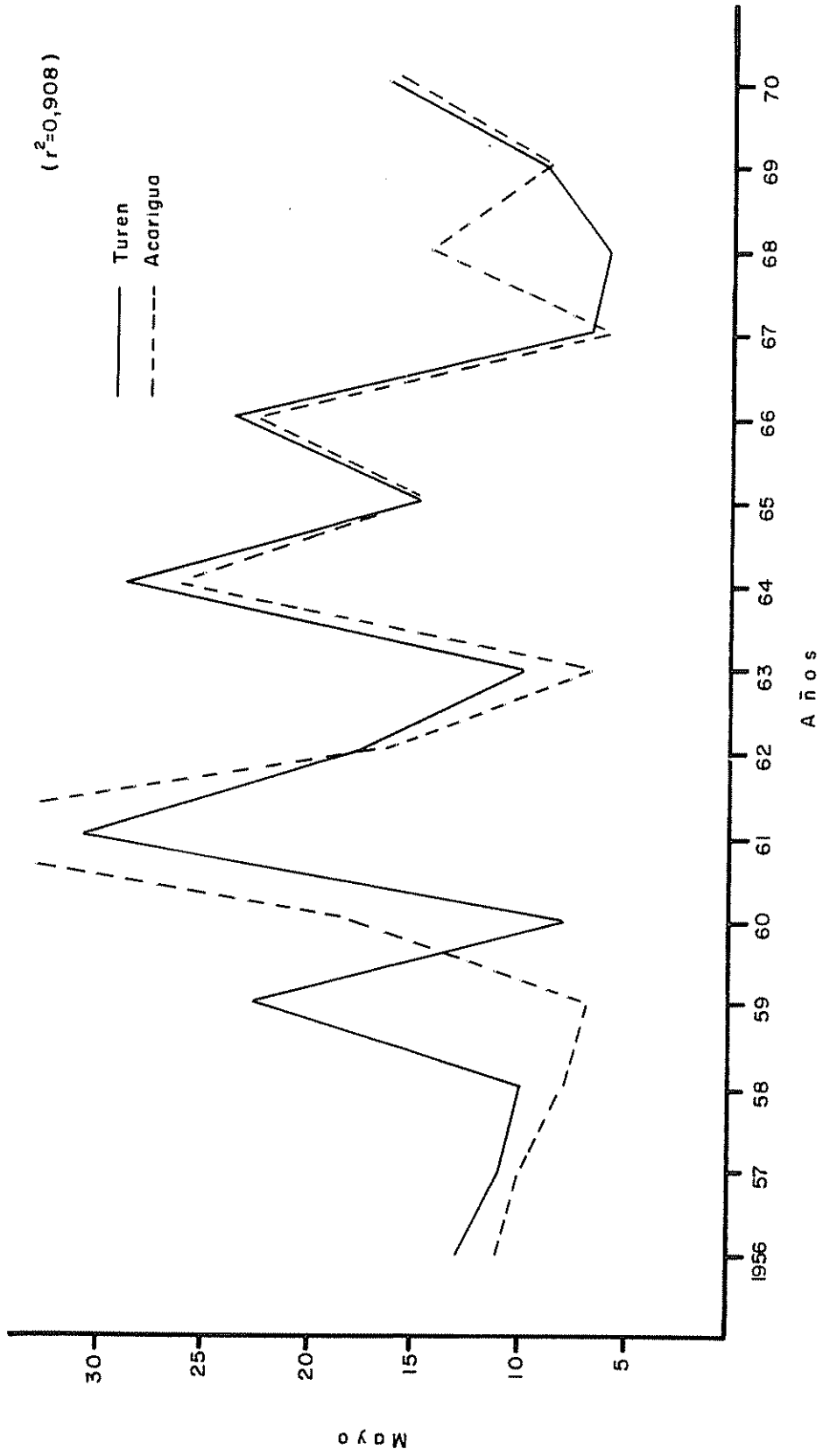


Fig. 8 Fechas de ocurrencia del segundo grupo de lluvias en mayo

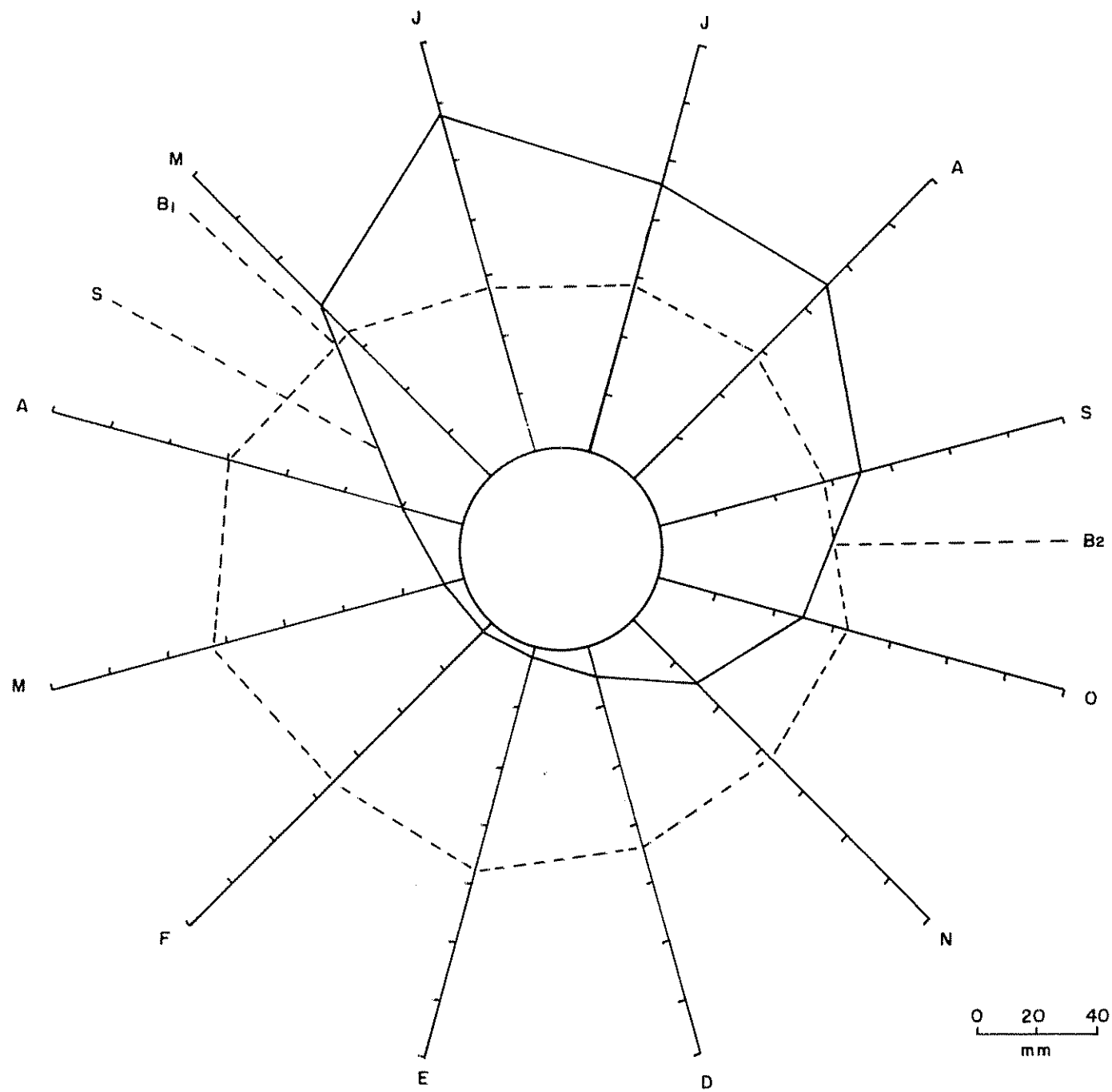


Fig.9 Distribución de la precipitación (—) y la evapotranspiración potencial (---) en Turen

S = Punto teórico de siembra

B₁ y B₂ = Comienzo y final del período húmedo

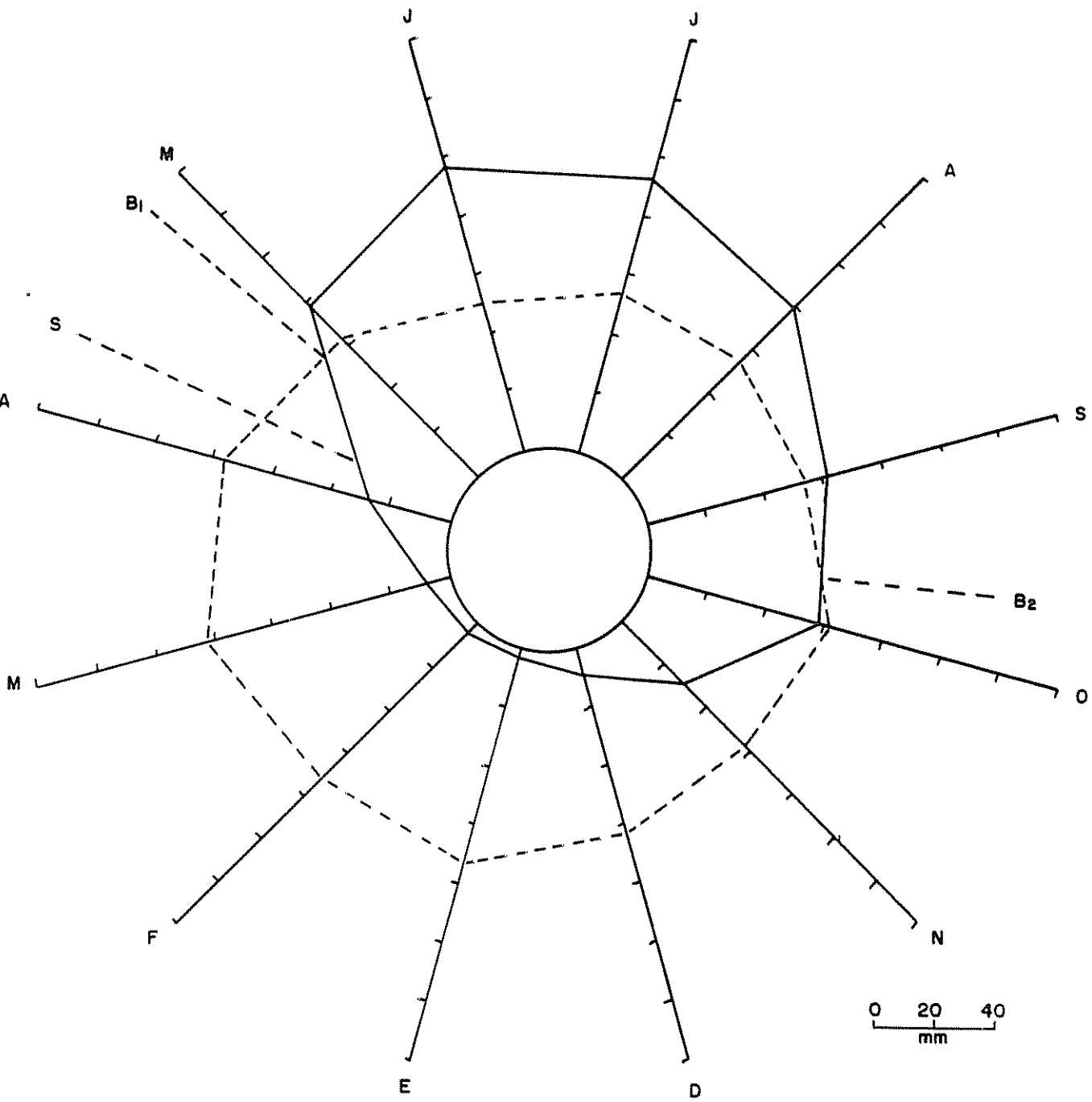


Fig. 10 Distribución de la precipitación (—) y la evapotranspiración potencial (---) en Acarigua

S = Punto teórico de siembra

B1 y B2 = Comienzo y final del período húmedo

él, la precipitación es igual a la mitad de la evapotranspiración potencial. B_1 corresponde al punto donde da lugar el comienzo del período húmedo y B_2 representa el fin del período húmedo. Los puntos D_1 , comienzo de las lluvias y C_1 , término de las mismas no tenía significación representarlos.

El intervalo A_1, B_1 se conoce como período prehúmedo y el intervalo B_1, B_2 como período húmedo.

El punto teórico S ocurre más tardíamente en Turen como el punto B_1 , así mismo el punto B_2 se presenta primero en Turen. La duración del período húmedo es también menor. La duración del período S- B_1 es ligeramente inferior en Turen sin llegar a tener una diferencia jerárquica agroclimática apreciable. Por poseer temperaturas ligeramente superiores Turen tiene una evapotranspiración potencial más elevada que Acarigua.

También como dato ilustrativo, se presentan los valores de las magnitudes promedios de los excesos y deficiencias de agua para el período 55-79, según el primer nivel de precisión agroclimática, lo cual hacemos a continuación:

		mayo	junio	julio	agosto	setiembre	Total
Turen	Def.	0	0	0	0	0	0
	Ex.	0	55	93	83	31	262
Acarigua	Def.	0	0	0	0	0	0
	Ex.	0	30	101	60	17	208

Como se ha explicado anteriormente, este tipo de cálculo no debe ser válido para operar en el tercer nivel de precisión.

4.4.2.2 Magnitud de la deficiencia promedio de los períodos con deficiencia durante el ciclo del cultivo.

Como ya se ha dicho, al efectuar el balance de agua a nivel diario podemos detectar períodos con deficiencia de agua que pasarían desapercibidos al seguir la metodología del cálculo del balance de agua mensualmente. La distinta magnitud de estos períodos con deficiencia van a depender de la demanda de agua y del almacenaje de agua presente en el suelo.

Las magnitudes en mm de estos períodos con deficiencia en promedio para cada mes y en el ciclo los presentamos de inmediato:

	mayo	junio	julio	agosto	setiembre	\bar{X}
Turen	11,3	2,2	1,0	2,1	4,8	4,3
Acarigua	12,4	3,1	1,7	2,6	3,6	4,7

Prácticamente se puede concluir que en cuanto a valores medios no existen diferencias entre las dos localidades para los períodos con deficiencias.

4.4.2.3 Número de períodos con deficiencia en el ciclo

La variable anterior por sí sola ayuda poco por ser simplemente una medida de posición. Con el conocimiento de la frecuencia de ocurrencia de períodos con deficiencia o el número de ellos que ocurren en promedio por mes, se va formando una imagen más real y significativa. De seguido se presentan dichos valores:

	mayo	junio	julio	agosto	setiembre	Total
Turen	4,0	1,2	1,2	2,5	2,7	11,6
Acarigua	4,4	2,1	1,3	2,1	3,1	13,0

Las diferencias son pequeñas también, haciendo que en Acarigua haya una ligera tendencia a ocurrir mayor número de períodos con deficiencia.

4.4.2.4 Número de períodos con deficiencia >10 mm en el ciclo

Se hace necesario determinar un límite que nos permita separar situaciones que presenten características de mayor gravedad. Como valor tentativo hemos considerado el de 10 mm de diferencia. A simple vista parece en realidad una pequeña deficiencia, pero como se dijo en otra oportunidad, el valor de ella no representa el agua que deberíamos añadir al suelo con fines de riego sino es un índice de la mayor o menor gravedad del fenómeno sobre la planta. Así, para un almacenaje de agua en el suelo de 125 mm (capacidad de campo), necesitaríamos una demanda de agua de 65 mm para alcanzar esos 10 mm de deficiencia, lo que equivaldría a 14-15 días sin llover. Para un almacenaje de 90 mm se alcanzan 10 mm de deficiencia con una demanda de 33 mm aproximadamente que equivalen a 7-8 días sin llover. De esta manera se encontraron con que ambas localidades presentan un número promedio igual de períodos con deficiencia >10 mm, siendo los valores los siguientes:

	mayo	junio	julio	agosto	setiembre	Total
Turen	1,46	0,06	0,00	0,06	0,5	2,1
Acarigua	1,3	0,33	0,06	0,06	0,33	2,1

También se presenta el porcentaje de años en los cuales ocurrió al menos un período con deficiencia mayor de 10 mm:

	mayo	junio	julio	agosto	setiembre
Turen	87%	6%	0%	6%	33%
Acarigua	87%	27%	6%	6%	27%

Se hizo esta distinción porque los valores indicados primero se encontraron analizando el total de períodos ocurridos. Así, en un mes de determinado año pueden ocurrir varios y en el mismo mes de otro año ningún período con deficiencia.

El análisis de los valores anteriores, tampoco nos ayuda mucho a diferenciar las localidades, ambas se presentan como muy homogéneas para estas variables. No obstante, se observa una ligera tendencia hacia Acarigua de tener más períodos con deficiencia >10 mm.

4.4.2.5 Valor promedio de los coeficientes de variación para los valores de deficiencia dentro de cada mes

Analizando el coeficiente de variación para los períodos con deficiencia que ocurren en cada mes y calculando su promedio tenemos un índice bastante aproximado de la variabilidad presentada por dichos períodos. Se presentan los valores a continuación:

	mayo	junio	julio	agosto	setiembre	\bar{X}
Turen	91,3%	64,7%	58,1%	50,5%	37,7%	67,6%
Acarigua	79,6%	63,4%	63,3%	63,4%	79,7%	73,9%

La variabilidad general es ligeramente superior en Acarigua, igual se había detectado al analizar los simples valores de precipitación donde Acarigua demostraba mayor variabilidad.

4.4.2.6 Probabilidad de obtener distintas magnitudes de deficiencia

Los Cuadros 22 y 23 presentan las probabilidades de obtener una determinada deficiencia para cada uno de los meses del ciclo en Turen y Acarigua, respectivamente.

Cuadro 22. Probabilidad de encontrar distintos niveles de deficiencia en Turen.

Nivel mm	mayo	junio	julio	agosto	setiembre
5	0,56	0,01	0,05	0,04	0,32
10	0,29	0,0	0,0	0,0	0,02
15	0,16				0,003
20	0,10				0,0
25	0,07				
30	0,05				
35	0,03				
40	0,02				
50	0,01				
60	0,006				
70	0,0				
75	0,0				

Cuadro 23. Probabilidad de encontrar distintos niveles de deficiencia en Acarigua.

Nivel mm	mayo	junio	julio	agosto	setiembre
5	0,52	0,30	0,27	0,12	0,26
10	0,27	0,08	0,11	0,01	0,08
15	0,16	0,03	0,05	0,00	0,03
20	0,10	0,01	0,02		0,01
25	0,06	0,00	0,01		0,006
30	0,04		0,00		0,00
40	0,02				
50	0,01				
60	0,006				
70	0,00				

En estos últimos cuadros se puede apreciar que Acarigua presenta mayores probabilidades de obtener deficiencias sobre todo en los meses intermedios de junio, julio y agosto.

4.4.2.7 Deficiencias totales promedio para el período de floración

El período de floración ya sea calculado a partir de la fecha promedio teórica de siembra o teniendo en cuenta las variaciones anuales de presentación de la época óptima para efectuar la siembra, ocurre generalmente en un lapso de tiempo que abarca la última quincena de junio y la primera de julio. Las variables agroclimáticas relacionadas con una fase fenológica suelen explicar frecuentemente la marcha del cultivo en

cuanto a rendimientos.

Se consideró en valor promedio las deficiencias totales ocurridas en estos meses, cuyos valores se expresan aquí:

	junio	julio	Total
Turen	4,4	2,5	6,9
Acarigua	9,7	3,9	13,6

Los valores son superiores para Acarigua, duplicando prácticamente a los de Turen.

4.4.2.8 Deficiencias totales para el ciclo del cultivo

Durante el período mayo-setiembre Turen presenta deficiencias promedio totales del orden de 68 mm y Acarigua de 74. No se podría decir que las diferencias para esta variable sean tan considerables que permitan variar alguna posición en una escala jerárquica.

4.4.2.9 Magnitud del exceso promedio de los períodos con exceso durante el ciclo del cultivo

Al igual que para la deficiencia se ha realizado el mismo tratamiento para los excesos. Por haber efectuado el balance de agua a nivel diario se han podido detectar los períodos con excesos intermensuales. El valor promedio para los excesos de esos períodos se representan en mm, de seguido:

	mayo	junio	julio	agosto	setiembre	\bar{X}
Turen	6,7	23,1	22,0	24,2	16,0	19,4
Acarigua	8,1	23,1	25,9	25,2	13,5	19,1

Los valores a la vez que en situaciones anteriores son prácticamente iguales, no hay variación apreciable que implique hablar de dos categorías.

4.4.2.10 Número de períodos con exceso en el ciclo

Este valor ayuda a complementar el valor promedio anterior. En él aquí se expone el número de períodos con exceso:

	mayo	junio	julio	agosto	setiembre	Total
Turen	0,4	4,2	4,7	3,1	2,5	14,9
Acarigua	0,5	3,5	4,0	2,5	1,9	12,4

El valor es ligeramente superior para Turen con 15 períodos aproximadamente con exceso para el ciclo contra 12 para Acarigua. Sin embargo, se necesita otra indicación para caracterizar los excesos y ésta se indica a continuación:

4.4.2.11 Número de períodos con excesos mayores de 30 mm en el ciclo

Este valor es arbitrario y similar a las deficiencias mayores de 10 mm de que se hablaba anteriormente. En estudios realizados con ajonjolí (32, 33) se encontró que pequeñas deficiencias afectaban más los rendimientos que pequeños excesos. En aquella ocasión se explicaba diciendo que para ocurrir pequeños excesos ya el suelo había pasado por la capacidad de campo, o por humedades óptimas que favorecen los rendimientos. No así en los períodos con deficiencia, donde no se llegó al óptimo de humedad requerido. Se escogió el valor de 30 mm como límite de cierta gravedad y se exponen el número de períodos donde ocurren excesos de inmediato:

	mayo	junio	julio	agosto	setiembre	Total
Turen	0,1	1,3	1,1	1,1	0,6	4,2
Acarigua	0,2	1,1	1,0	1,0	0,4	3,7

Los valores son muy similares efectuando la corrección al número entero; los valores son iguales para ambas localidades.

4.4.2.12 Valor promedio de los coeficientes de variación para los valores de exceso

Se presentan dichos valores así:

	mayo	junio	julio	agosto	setiembre	\bar{X}
Turen	0,0%	78,9%	81,4%	88,3%	62,8%	77,9%
Acarigua	0,0%	78,0%	83,4%	88,9%	73,7%	81,0%

De la misma manera que para las deficiencias la variabilidad para los excesos es ligeramente superior en Acarigua.

4.4.2.13 Probabilidad de obtener distintas magnitudes de exceso

Los Cuadros 24 y 25 indican dichas probabilidades. También en este caso de excesos de agua existe mayor posibilidad de encontrarse con un determinado valor de exceso de agua en Acarigua que en Turen.

4.4.2.14 Excesos totales promedio para el período de floración

Al igual que para las deficiencias durante este período se considerarán los excesos totales promedios de los meses de junio y julio.

Cuadro 24. Probabilidad de encontrar distintos niveles de exceso de agua en Acarigua.

Nivel mm	mayo	junio	julio	agosto	setiembre
5	0,91	0,82	0,85	0,91	0,85
10	0,73	0,63	0,66	0,73	0,61
15	0,57	0,50	0,51	0,56	0,44
20	0,45	0,39	0,40	0,44	0,32
25	0,35	0,32	0,32	0,34	0,24
30	0,29	0,27	0,26	0,27	0,18
40	0,19	0,19	0,18	0,17	0,11
50	0,13	0,15	0,13	0,12	0,07
60	0,09	0,11	0,10	0,09	0,04
70	0,06	0,08	0,07	0,06	0,03
80	0,04	0,07	0,06	0,04	0,02
90	0,02	0,05	0,04	0,03	0,00
100	0,01	0,04	0,03	0,02	
110	0,00	0,03	0,01	0,02	
120		0,03	0,005	0,01	
130		0,02	0,00	0,01	
140		0,01		0,01	
150		0,009		0,009	
160		0,003		0,003	
170		0,00		0,00	

Cuadro 25. Probabilidad de encontrar distintos niveles de exceso de agua en Turen.

Nivel mm	mayo	junio	julio	agosto	setiembre
5	0,56	0,87	0,80	0,83	0,84
10	0,33	0,77	0,71	0,69	0,59
15	0,22	0,52	0,60	0,56	0,56
20	0,11	0,41	0,49	0,45	0,44
25	0,04	0,33	0,38	0,34	0,33
30	0,01	0,26	0,27	0,25	0,26
40	0,00	0,18	0,11	0,15	0,13
50		0,13	0,03	0,08	0,06
60		0,10	0,00	0,04	0,03
70		0,07		0,02	0,01
80		0,05		0,00	0,00
90		0,04			
100		0,03			
110		0,01			
120		0,00			

Se definieron dichas variables en mm a continuación:

	junio	julio	Total
Turen	121	104	225
Acarigua	93	97	190

Turen presenta valores más altos que Acarigua, pero no es significativa la diferencia bajo el punto de vista agroclimático.

4.4.2.15 Excesos totales para el ciclo del cultivo

Durante el ciclo del cultivo y como valor promedio para la serie de tiempo 1955-70, se encontró que Turen tiene un exceso de agua del orden de 349 mm contra 316 mm para Acarigua.

4.4.2.16 Almacenajes de agua en el ciclo del cultivo

Los almacenajes de agua en el suelo suelen presentar una estrecha relación sino perfecta al relacionarla con los rendimientos. La mayor o menor explicación de los rendimientos para estas variables suelen radicar si hay influencias ajenas por otra variable que represente la intensidad de algún elemento atmosférico. En condiciones de no encontrarse con situaciones extremas (lluvias de muy alta intensidad, golpes de sol, vientos extremos, etc., o bien incidencia alta de plagas y enfermedades), las variables relacionadas con el almacenaje, la succión o la tensión de la humedad en el suelo son las mejores.

Aquí se han considerado dos de ellas y una tercera que si bien no pertenece al grupo, está íntimamente ligada. Estas son: promedio de los almacenajes más bajos durante cada mes, almacenaje más bajo por mes y número de días con saturación cada mes.

El promedio de los almacenajes más bajos para cada mes es inferior en Acarigua que en Turen y se señalan en mm de inmediato:

	junio	julio	agosto	\bar{X}
Turen	110	111	107	111
Acarigua	101	109	107	106

Sin embargo, dichas diferencias son pequeñas. Representa, no obstante, entre un 8 y 12 por ciento del agua útil. A continuación se observa el valor del almacenaje más bajo en mm para cada mes:

	junio	julio	agosto	\bar{X}
Turen	99	99	95	98
Acarigua	78	101	94	91

Estos valores son bastante parecidos. El número de días con saturación fue el siguiente:

	junio	julio	agosto
Turen	6	7	3
Acarigua	6	7	4

Siendo en ambas localidades prácticamente iguales ese número de días.

La variabilidad es también en este caso, superior en Acarigua donde se encuentran valores extremos de almacenaje de 35, 58 y 66 mm para los tres meses anteriores, respectivamente, mientras que para Turen esos valores fueron de 50, 86 y 85 mm.

4.4.3 Jerarquización de las Variables Agroclimáticas e Índices relacionados con los rendimientos.

Las distintas magnitudes de las variables agroclimáticas van a repercutir en los rendimientos; es a veces conveniente, para facilitar los estudios, proceder a su jerarquización al igual que se realizó en estudios

posteriores (10, 11, 25, 26, 27, 31, 32, 40).

En aquellos casos al tratar sobre tipos agroclimáticos de diferentes cultivos, se procedió a ordenar los índices y a darles una denominación. Ahora se debería efectuar lo mismo y tratar de encontrar para cada tipo un número correlativo que a partir del 1, que sería el mejor, permita cuantificar su posición en cuanto al rendimiento que pudiera obtenerse. Mientras no se hayan realizado los ensayos individuales para cada cultivo y se tenga una gran experiencia sobre las relaciones clima-rendimiento, las escalas a realizarse basadas en extrapolaciones tendrán que ser todavía algo objetivas.

Como ilustración, en el Cuadro 26 se expresan los tipos agroclimáticos tentativos que corresponden al número de períodos (frecuencia) con deficiencia mayor de 10 mm para el ciclo del cultivo.

De la misma manera se podría trabajar con las otras variables agroclimáticas hasta obtener el esquema general que permita identificar, mediante números jerárquicos, las posiciones que ocupan cada una de las localidades estudiadas, de manera similar a como se trabajó en el segundo nivel de precisión agroclimática.

Cuadro 26. (Ejemplo). Tipos agroclimáticos tentativos que corresponden al número de períodos (frecuencia) con deficiencia mayor de 10 mm para el ciclo del cultivo.

Indice agroclimático (No. de períodos pro medio mayores de 10 mm de deficiencia en el ciclo)	Clasifi- cación Jerár- quica	Denominación
0-0,9	1	Sin o con deficiencias graves raras
1-1,9	2	Con deficiencias graves poco frecuentes
2-2,9	3	Con deficiencias graves media- namente frecuentes
3-3,9	4	Con deficiencias graves fre- cuentes
4-4,9	5	Con deficiencias graves muy frecuentes
>5	6	Marginal

5. DISCUSION

En regiones tropicales no existe una técnica estandar y completamente elaborada para efectuar una zonificación de cultivos; en la mayoría de los casos las técnicas empleadas se rigen por criterio estrictamente climatológico. Normalmente el perfil climático se describe con base en variables primarias tal como plantea el método de Holdridge (48) o de una forma un tanto más elaborada como lo presenta Papadakis (70).

La zonificación del frijol realizada por Aguirre y Salas (1), de acuerdo con la metodología propuesta por Holdridge (48) presenta resultados diferentes a los obtenidos en este trabajo. Es de suponer que al trabajar con datos primarios como temperatura media anual, precipitación total promedio anual, etc., se está en realidad efectuando una clasificación climática para tratar de relacionarla con las exigencias del cultivo, o sea, se trata de definir unidades climáticas para averiguar su aptitud agrícola. Las áreas delimitadas de esta manera, son expresiones del tipo climático reinante que definen en forma general, las zonas de vida, como tal no necesariamente tienen que coincidir con el área específica para el desarrollo de un cultivo en particular. El cultivo anual, debido a su ciclo corto, es difícil ajustarlo dentro del alcance y definición que proveen las variables como precipitación total anual y otros similares. Se necesita un mayor detalle y conocimiento de las fluctuaciones climáticas a corto período de tiempo.

El Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas viene realizando desde 1965 grandes esfuerzos para mejorar la técnica de la zonificación ecológica para varios cultivos. Este proyecto tiene como meta el delimitar

la base física de las áreas de desarrollo agropecuário. Dichos estudios tienen la finalidad de desarrollar esquemas que perfeccionen los trabajos basados en el uso de variables climáticas primarias al considerar el suelo como factor importante para lograr una zonificación ecológica. Así se habla de distintas aproximaciones de acuerdo si se considera el clima solamente, se le adicione el factor suelo o se efectúen estudios detallados de este último. A pesar del perfeccionamiento del método con la introducción del suelo como variable criterio no se logró aumentar apreciablemente la confiabilidad del estudio, probablemente debido al poco refinamiento de esas variables climáticas.

En la zonificación ecológica de cultivos es conveniente trabajar con variables agroclimáticas y al realizarse para cada cultivo separadamente debe incluir variables agroclimáticas específicas logradas mediante el estudio de los tipos agroclimáticos del cultivo propuestos por Burgos (9) u otro estudio a ese nivel. Es decir, se trata ahora de detectar qué áreas sirven para un cultivo determinado y su clasificación, no simplemente qué cultivo se adapta mejor en una unidad climática. Teniendo en cuenta este criterio en los proyectos realizados por el IICA para el área Centroamericana y Panamá en los años 1970-71 y 72, se incluyó al estudio general el uso de variables agroclimáticas.

El estudio se había dividido para su mejor realización en etapas que comprenden técnicas de análisis agroclimáticos avanzados. No obstante, a lo anterior y a la precisión y éxito logrado, quedaban por resolver una serie de problemas que requerían tratamientos especiales sobre todo en cultivos anuales; así mismo los planificadores exigen una mayor precisión y la inclusión de variables que indiquen la calendarización de actividades:

así como posibles rendimientos a obtenerse. Para la detectación de esto y basados en el análisis bastante completo del balance de agua en el suelo, se introducen los niveles de precisión agroclimática, con el objeto de determinar los parámetros que permitan clasificar y jerarquizar las áreas de acuerdo con el establecimiento del gradiente marginal-óptimo y de la eliminación de la discretización a medida que el nivel de precisión sea más estricto. Los niveles de precisión agroclimática, al asociarse a las aproximaciones se acomodan a las distintas exigencias. En condiciones netamente tropicales es lógico darle al balance hídrico importancia primordial. El régimen térmico presenta en estas regiones características menos variables al igual que el régimen fotoperiódico. Los valores centrales de estos regímenes ayudan a efectuar una discriminación, no así el régimen hídrico donde se deben efectuar los estudios necesarios para establecer las distintas dimensiones en el transcurso del tiempo.

En el desarrollo de las investigaciones llevadas a cabo en este estudio se presentan zonificaciones de área, línea y punto que corresponden dentro del esquema metodológico de aproximaciones y niveles de precisión a las alternativas A_2N_1 , A_2N_2 y A_3N_3 , desglosando esta última y presentando solamente N_3 .

En la primera o zonificación de la macrounidad espacial (Costa Rica) (A_2N_1) se realizó una Segunda Aproximación con un primer nivel de precisión. Esta alternativa es la más simple a realizarse bajo el punto de vista ecológico dentro de la metodología aquí presentada y es un punto de partida básica para efectuar comparaciones entre metodologías.

En ella se detectaron áreas aptas para el desarrollo del cultivo y se clasificaron y jerarquizaron con base en la productividad esperada, de

acuerdo al patrón de índices establecido previamente. Aquí el gradiente marginal-óptimo es todavía muy discreto, es decir, los límites no están definidos con mucha precisión. Sin embargo, se ajusta a las dificultades que se encuentran al trabajar dentro de una macrounidad espacial con material primario bastante deficiente.

Al comparar el trabajo anterior y la depuración lograda con los estudios basados en clasificaciones climáticas de que se hablaba anteriormente se puede apreciar que se llega a una mayor precisión: 1) los límites son específicos para el cultivo, 2) se combina el factor suelo, 3) se establecen categorías a través de grupos de índices, 4) la discretización tiende a reducirse, y 5) se indican las posibilidades de obtener buenos rendimientos. La bibliografía no hace alusión a una metodología que en conjunto lleve a obtener resultados más concisos así como la elaboración de mapas de resultados a ese nivel de precisión.

En la segunda zonificación o de macrounidad espacial (Meseta Central de Costa Rica) se siguen en principio las mismas etapas, pero recién a partir del análisis agroclimático (tercera etapa) se determinan una serie de variables que permiten definir fechas óptimas de siembra, porcentaje de años negativos, duración de la época de siembra, variabilidad, etc.

Todo esto englobado dentro del segundo nivel de precisión agroclimática, donde al trabajar con los valores mensuales individualmente de las variables, se está en capacidad de detectar las fluctuaciones reales de esos fenómenos y cuantificarlos sobre lugares delimitados por la zonificación de área, para llegar a detectar un complejo de variables que dan una idea de la estructura y adecuación del lugar en estudio. Se entra entonces en un principio de continuidad que define de una manera clara el gradiente

marginal-óptimo, ayudados por la gran cantidad de variables. El doble efecto repercutivo está que algunas de esas variables ayudan a definir si tuaciones de calendarización y de otras aplicaciones prácticas. Aquí la marginalidad puede dividirse en grados y se puede establecer si ella es o no corregible. Se faltaría entonces, de una marginalidad real o accidental.

La cartografía se realiza de igual manera y al ser la escala propia da se visualiza la nueva clasificación obtenida. No se ha encontrado en la bibliografía tampoco para esta zonificación (A_2N_2) resultados ni cartografía semejante en cuanto a la metodología. La zonificación del tipo (A_2N_2) presenta, sin embargo, una desventaja y es que el número de variables adicionadas al primer nivel de precisión traen como consecuencia aná lisis complejos de isolíneas y la determinación de un número grande de áreas clasificadas. Para solucionar este problema se pensó en la inclusión del análisis discriminatorio utilizando la técnica de 'Factor Analysis' para determinar las áreas de mejor a peor, poder incluir más variables y eliminar la síntesis cartográfica. Esta técnica si bien se usa frecuentemente en análisis de regionalización no se ha hecho extensiva su aplicación en problemas agrometeorológicos o agroecológicos.

Los resultados obtenidos fueron halagadores y comparables con los en contrados por la otra técnica seguida. Se debe hacer la salvedad que los valores obtenidos para el índice de sitio que define cada localidad no son comparables si el estudio se realiza desglosando el área principal en sub-áreas. Se deberá trabajar, entonces, toda el área simultáneamente, como un conjunto sin divisiones regionales.

El desarrollo del tercer nivel de precisión (N_3), siguiendo técnicas

agroclimáticas complejas y precisas (entre ellas podemos destacar cálculos diarios del almacenaje de agua en el suelo, etc.) permite cuantificar el producto e indicar el rendimiento a obtenerse mediante simulaciones y extrapolaciones a través de las relaciones entre variables específicas y el rendimiento.

A partir de aquí se pueden hacer pronósticos y estimados. Pronósticos a través de estudios climáticos cuando la serie de registros es suficientemente larga, a través de períodos de retorno que nos darán apreciaciones aproximadas de tipo más bien cualitativo y estimados con suficiente confiabilidad basados en el conocimiento cuantitativo de las relaciones entre clima y rendimiento. Se repetiría en todo caso, el concepto de gradiente anterior pero esta vez de la apreciación cualitativa (pronóstico) a la cuantitativa (estimado).

En conjunto y partiendo de la base de que se dispone de una adecuada información básica, con la investigación realizada se llega a afirmar que con la metodología propuesta, se está en capacidad de establecer las bases ecológicas en cuanto a las posibilidades de establecer áreas agrícolas con capacidad de desarrollar. Se trata aquí de introducir como complemento estudios adicionales con variables socioeconómicas que presenten en conjunto la estructura necesaria para darle al problema de la planificación del desarrollo, un poderoso elemento de juicio para acciones futuras.

6. CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo permiten derivar las siguientes conclusiones:

- 1) La zonificación de área (A_2N_1) presenta los elementos de juicio necesarios para la clasificación preliminar de áreas aptas para el desarrollo de un determinado cultivo.
- 2) La ventaja del método de área se refleja en la confiabilidad de la delimitación dentro del nivel menos exigente de los tres propuestos. Quizás su principal desventaja radica en la marcada discretización del gradiente marginal-óptimo.
- 3) La zonificación de línea (A_2N_2) tiende a eliminar la discretización al introducir en el análisis mayor número de variables criterios.

Esta zonificación conduce a una mayor precisión y ayuda a una mejor descripción del gradiente marginal-óptimo.

- 4) La zonificación de línea se ve robustecida por la introducción de variables específicas que pueden ser usadas en la calendarización de actividades.
- 5) Como parte de la zonificación de punto (A_3N_3), el tercer nivel de precisión agroclimática (N_3) convenientemente aplicado puede conducir al pronóstico y estimación de cosechas.

- 6) Para lograr la zonificación de punto o máxima expresión en precisión, debe incluirse en la unidad homogénea agroclimática, el estudio detallado de variables fisioedáficas.

7. RESUMEN

El presente trabajo trata de establecer las pautas a seguir para mejorar la zonificación de cultivos anuales. Los objetivos de esta investigación fueron:

- 1) Desarrollar una metodología que permita obtener mayor precisión en la zonificación ecológica de cultivos anuales
- 2) Aplicar los modelos de zonificación de punto, de línea y de área, tomando como ejemplo el frijol (Phaseolus vulgaris)

Los modelos de zonificación son tratados convenientemente y proceden de la necesidad de establecer distintos niveles de precisión.

La zonificación de área o aquella perteneciente a la macrounidad espacial se realizó para Costa Rica y tomando como ejemplo numérico el Phaseolus vulgaris. Esta zonificación fue desarrollada siguiendo etapas secuenciales que permiten un desglosamiento de las actividades a seguir mediante un criterio estrictamente agroclimático. Los resultados finales permiten determinar las áreas aptas para el desarrollo del cultivo y su clasificación y jerarquización de mejor a peor. En esta zonificación de área se tuvieron en cuenta tres variables, siendo una de ellas derivada del estudio agroclimático que involucra excesos y deficiencias de agua, por lo que podemos hablar de cuatro variables.

La zonificación de línea como paso avanzado en la metodología incluye un número mayor de variables: térmicas, hídricas (excesos y deficiencias), porcentaje de años negativos, duración de la época de siembra

y el factor edáfico. En realidad permite esta zonificación una revaloración de las áreas detectadas en la zonificación de área. Como unidad espacial se eligió la Meseta Central y alrededores en Costa Rica. Los resultados finales se consignan igual que anteriormente en material cartográfico adecuado que permite establecer comparaciones entre las distintas categorías encontradas así como la localización de las áreas zonificadas. De la misma manera se pueden detectar a este nivel de zonificación, variables que permiten establecer la calendarización de actividades.

La zonificación de punto se desglosó en uno de sus componentes, el tercer nivel de precisión agroclimática, para realizar un análisis agroclimático detallado de más de 30 variables con objeto de establecer las bases y relacionar el clima con el rendimiento, con tal fin se eligió en la investigación las localidades venezolanas de Turen y Acarigua, ambas situadas en el Estado Portuguesa, en las cuales se realizó un análisis agroclimático exhaustivo a nivel diario para lograr detectar más de 30 variables que pudieran incidir sobre cultivos anuales de secano.

7a. SUMMARY

The present work was done in order to establish a proper method to improve zoning of annual crops with the following purposes:

- 1) To develop a methodology to obtain a better precision in the ecological zoning of annual crops
- 2) Apply zoning models of point, line and area using as an example the common bean (Phaseolus vulgaris)

The zoning models are conveniently treated, originated from the need of establishing different levels of precision.

The area zoning or that pertaining to spacial macrounit was carried out for Costa Rica using Phaseolus vulgaris as a numerical example.

This zoning was developed following sequence steps which permit itemizing the activities to be followed with a strict agroclimatic criteria. The final results will permit determine the convenient areas for the development of the crop and its hierarchical classification from the best to the worst.

In this area zoning three variables were taken into account and one of them derived from the agroclimatic study that involves excess and water deficiencies so we can speak of four variables.

The line zoning as an advanced step in this methodology includes a greater number of variables: thermics, hydrics (excess and deficiencies), percentage of negative years, duration of the planting season and the soil factor. This zoning permits a reevaluation of the detected areas in the area zoning. As a spacial unit the Meseta Central and neighboring places in Costa Rica were selected. The final results are consigned as before

in proper cartographic material which permit to establish comparisons between the different categories found, as well as the localization of zoned areas. In the same way, variables that permit to establish the programming of activities, can be detected at this level of zoning.

The point zoning was separated in one of its components, the third level of agroclimatic precision, in order to carry out a detailed agroclimatic analysis of more than 30 variables in order to establish the basis and relate the climate with yield. For this purpose, the venezuelan localities of Turen and Acarigua were selected in this research, both located in the Portuguese State, where exhaustive agroclimatic analysis were carried out at a daily level in order to detect more than 30 important variables for annual crops in dry unirrigated land.

8. LITERATURA CITADA

1. AGUIRRE, J. A. y SALAS, J. Zonificación del cultivo del frijol en Centroamérica y Panamá. Turrialba 15(4):300-306. 1965.
2. ALLARD, P. W. y ZAUMAYER, W. J. Responses of beans (*Phaseolus*) and other legumes to length of day. U. S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 867. 1944. 24 p.
3. ALVIM, P. de T. Correlação entre clima, temperatura, produção do cacauero. In Conferencia Interamericana de Cacao, 6a., Salvador, Bahía, Brasil. Instituto do Cacao, 1957. pp. 133-136.
4. AZZI, G. Ecología agraria. Barcelona, Salvat, 1959. 449 p.
5. BLANCO, E. Regionalización agrícola de Nicaragua. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 514 p.
6. BOX, J. H. M. Leguminosas de grano. Barcelona, Salvat, 1961. 550 p.
7. BRASIL. Instituto de Pesquisa Agropecuaria do Norte. Zoneamento agrícola de Amazonia. No. 54 janeiro 1962. Belém, Brasil. pp. 153.
8. BROWN, L. H. y COCHEME, J. A study of the agroclimatology of the highlands of Eastern Africa. Rome, FAO, 1969. 330 p.
9. BURGOS, J. J. Agroclimatic classifications and representations (Report on the application value of climatic and agroclimatic classifications for agricultural purposes). Varsovia, WMO Commission for Agricultural Meteorology, 1958. (CagM-II/Doc. 18).
10. _____. Aptitud agroclimática y planificación de siembra de papa simiente (*Solanum tuberosum*) en la región andina venezolana. *Agronomía Tropical* (Venezuela) 15(1-4):193-212. 1965.
11. _____ y REYES, H. Tipos agroclimáticos mundiales del cacaotero. *Agronomía Tropical* (Venezuela) 15(1-4):169-231. 1965.
12. CACERES, M. A. Regionalización agrícola de Honduras. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1970. 145 p.
13. CARDONA, C., CAMACHO, L. H. y OROZCO, S. H. Diacol Nima, variedad mejorada de frijol. Colombia, Ministerio de Agricultura. Boletín de Divulgación No. 8. 1959. 24 p.
14. COCHEME, J. y FRANQUIN, P. A study of the agroclimatology of the semi-arid area south of the Sahara in West Africa. Rome. FAO, 1967. 325 p.

15. CONRAD, V. y POLLACK, L. W. Method in climatology. 2nd. ed. rev. and enl. Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1950. 459 p.
16. COTO, J. A. y TORRES, J. E. Uso potencial de la tierra, Costa Rica. San José, Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1970. Escala 1:750.000.
17. DALE, J. E. Leaf growth in Phaseolus vulgaris. Annals of Botany (U.S.) 23(114):293-308. 1965.
18. DAVIS, J. F. The effect of some environmental factors on the set pots and yields of white pea beans. Journal of Agricultural Research 70:237-249. 1945.
19. DEAN, L. A. Relationships between rainfall and coffee yields in the Kona district, Hawaii. Journal of Agricultural Research 59(3):217-222. 1939.
20. DE FINA, A., GIANNETTO, F. y SABELLA, L. Difusión geográfica de cultivos índices en la Provincia de San Juan y sus causas. Buenos Aires, INTA, 1962. 23 p. (Publicación 80).
21. _____ y SABELLA, L. J. Cálculo de las temperaturas medias de localidades montañosas carentes de observaciones termométricas. Revista de la Facultad de Agronomía (La Plata) 35(2):127-145. 1955.
22. DOS SANTOS, R. S. B. Fitoclimograma esquemático da videira no Brasil. Revista Brasileira de Geografía 28(2):113-127. 1966.
23. FORSYTHE, W. H. y PINCHINAT, A. M. Tolerancia de la variedad de frijol '27-R' a la inundación. Turrialba 21(2):228-231. 1971.
24. GANCOPADHYAYA, M. y SARKER, R. P. Curvilinear study on the effect of weather on growth of sugar cane. Indian Journal of Meteorology and Geography 15(2): 1964.
25. GARCIA B., J. Clima agrícola del cafeto (Coffea arabica) y zonas potenciales en los Andes de Venezuela. Agronomía Tropical (Venezuela) 18(1):57-84. 1968.
26. _____. Zonificación de Phaseolus vulgaris en función de su régimen hídrico. Agronomía Tropical (Venezuela) 19(3):197-203. 1969.
27. _____. Clima agrícola de Citrus sinensis. Agronomía Tropical (Venezuela) 21(2):71-89. 1971.
28. _____. Relación entre el balance de agua en el suelo y el rendimiento del café (Coffea arabica) en Turrialba, Costa Rica. Agronomía Tropical (Venezuela) 1972.

29. _____, GUERRA, A. y ANDRADE, V. Método para compensar registros climatológicos heterogéneos. Venezuela, Ministerio de Agricultura y Cría, 1968. 35 p. (Boletín Técnico No. 15).
30. _____ y LOPEZ, D. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15°N-15°S). *Agronomía Tropical* (Venezuela) 20(5):335-345. 1970.
31. _____ y MANRIQUE, L. P. Zonificación bioclimática para la ganadería bovina de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 17 p. (Mimeografiado).
32. _____ y NAZZANI, B. Relación entre el balance de agua en el suelo y el rendimiento del ajonjolí. II. *Agronomía Tropical* (Venezuela) 1972 (en prensa).
33. _____, NAZZANI, B. y SAINZ, J. M. Relación entre el balance de agua en el suelo y el rendimiento del ajonjolí (Sesamum indicum). *Agronomía Tropical* (Venezuela) 21(1):49-57. 1971.
34. _____ y MONTOYA M., J. M. Determinación de la duración, variabilidad y fecha óptima de siembra en cultivos anuales; estudio de un caso: Phaseolus vulgaris en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. *Turrialba* 21(3):300-303. 1971.
35. _____ y MONTOYA M., J. M. Un procedimiento para estimar la humedad relativa, con fines agroecológicos, en medio tropical. Turrialba 21(1):116-119. 1971.
36. _____ y MONTOYA M., J. M. Relación entre el balance de agua en el suelo y en el rendimiento del cacao Theobroma cacao en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Tropical* (Venezuela) 22(1):57-66. 1972.
37. _____ y MONTALDO, A. Exigencias hídricas de la yuca o mandioca (Manihot esculenta). *Agronomía Tropical* (Venezuela) 21(1):25-31. 1971.
38. _____ y PINCHINAT, A. Epocas de siembra para el frijol (Phaseolus vulgaris L.) en Turrialba, Costa Rica. (en prensa).
39. _____ y SAINZ, J. M. Comparación de balances de agua calculados y humedad medida en el suelo. *Agronomía Tropical* (Venezuela) 21(4):295-298. 1971.
40. _____ y SANCHEZ, C. J. Zonas climáticas para la palma datilera (Phoenix dactylifera) en Venezuela. *Agronomía Tropical* (Venezuela) 17(3):195-206. 1967.
41. GAUSSEN, H. Théories et classification des climats et micro-climats. In Congrès International de Botanique, 8ème. Paris, 1954. s.n.t. Sect. 7-8. pp. 125-130.

42. GEARY, R. C. *Biometrika* (27):310-317. 1935.
43. GESLIM, R. La caracterisation des climats locaux. In Conference de de Pédologie Méditerranéenne, Alger-Montpellier, Paris, 1957. Comptes Rendus. s.l. L'Association Française pour L'Etude du Sol. s.f. pp. 37-84.
44. GRIFFITHS, J. F. Proceedings. In Symposium on Tropical Meteorology. Nairobi, 1958.
45. GUERRERO, E. R. Relación entre el ciclo vegetativo del frijol con la altura y la temperatura media; Apuntes del Curso de Cultivos Anuales. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1968. 1 p.
46. HAGOOD, M. J. Statistical method for delineation of regions applied to data on agriculture and population. *Social Forces* 21:288-297. 1943.
47. _____ et al. An examination of the use of factor analysis in the problem of subregional delineation. *Social Forces* 6:216-233. 1941.
48. HOLDRIDGE, L. R. Determination of world plant formation from simple climatic data. *Science* 105:367-368. 1947.
49. _____. Life zone ecology. San José, Costa Rica, Tropical Science Center, 1967. 206 p.
50. INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS. Informe sobre el proyecto de zonificación ecológica de cultivos de consumo básico y tradicionales de exportación para los países del Mercado Común Centroamericano. Turrialba, Costa Rica, Centro Tropical de Enseñanza e Investigación y Dirección Regional para la Zona Norte, 1971. 59 p.
51. ISARD, W. Factor analysis with particular reference to regional delineation. In _____. *Methods of regional analysis, an introduction to regional sciences.* Cambridge, MIT Press, 1960. pp. 293-305.
52. JONES, B. G. y GOLDSMITH, W. W. Studies in regional development a factor analysis approach to subregional definition in Chenango, Delaware and Otsego counties. Ithaca, N. Y., Cornell University, 1965. 115 p.
53. KIMBALL, H. H. y BROOKS, F. A. Plant climates of California. *California Agriculture* 13(5): 1959.
54. KLAGES, K. H. W. *Ecological crop geography.* New York, MacMillan, 1942. 416 p.

55. LEGARDA, L. Influencia de la succión máxima del agua y del espacio del suelo sobre la producción de la variedad "27-R" de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 120 p.
56. _____ y FORSYTHE, W. Estudio comparativo entre la evaporación calculada por varias fórmulas y la evaporación del tanque en tres lugares tropicales. Turrialba 22(2): 1972 (en prensa).
57. LEUWERS, A. Pluviometric et culture cotonniere au Nord Cameroun. Cot. et Fib. Trop. 12(2): 1963.
58. McFARLANE, W. L. Some factors affecting growth and yield of coffee. Tesis Mag. Agr. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1949. 47 p.
59. MacGILLIVRAY, J. H. Vegetable production. New York, Blakiston, 1953. 397 p.
60. MANRIQUE, L. P. Zonificación bioclimática para la ganadería bovina de los países Centroamericanos. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1972. 75 p.
61. MARICATO, A. T. Alguns fitoclimogramas tropicais. Revista Brasileira de Geografía 23(1):3-12. 1966.
62. _____. Alguns fitoclimogramas de produtos temperados. Revista Brasileira de Geografía 28(3):76-82. 1966.
63. MARTIN, J. H. Climate and sorghum - (From Climate and Man) Yearbook of Agriculture, USDA, 1941.
64. MAXIMOV, N. A. The plant in relation to water. McMillan, N. Y., 1929.
65. MONTOYA H., J. H. Zonas ecológicas para frijol en América Central, una metodología. In Reunión Técnica sobre Programación de Investigación y Extensión en Frijol y Otras Leguminosas de Grano para América Central. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969. pp. 26-34.
66. _____, GARCIA B., J. e ICAZA, J. Metodología para la zonificación ecológica del frijol (*Phaseolus vulgaris*) en Centroamérica. In Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos Alimenticios, Panamá, 1971. s.n.t. 31 p.
67. _____ y GARCIA B., J. Comparación de dos técnicas para estimar temperaturas medias, con fines agroecológicos, en localidades carentes de registros. Turrialba 21(1):112-115. 1971.

68. PAEZ, G. Aspectos metodológicos de la medición del desarrollo de la región cacaotera - Bahía - Brasil. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 28 p. (multigrafiado).
69. PAPADAKIS, J. Ecología de cultivos. Buenos Aires, Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1954. 461 p.
70. _____. Climates of the world and their agricultural potentialities. Buenos Aires, Juan Papadakis, 1966. 170 p.
71. _____. Crop ecological survey of West Africa (Liberia, Ivory Coast, Ghana, Togo, Dahomey, Nigeria). Roma, FAO, 1966. 2 v.
72. PASCALE, A. J. y DAMARIO, E. A. Agroclimatología del cultivo del trigo en la República Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de Buenos Aires 15:3-119. 1961.
73. PEÑAHERRERA, H. G. Influencia de los factores biofísicos y socio-económicos en la producción de café en el Ecuador. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1971. 119 p.
74. PERRY, B. J. L. A method for deriving multifactor uniform regions. Przegląd Geograficzny 33:263-282. 1961.
75. PINCHINAT, A. M. Factores limitantes en el cultivo del frijol en Centroamérica. In Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos Alimenticios, Panamá, 1965. s.n.t. 69 p.
76. _____. El cultivo del frijol en Centroamérica. Extensión de las Américas (Costa Rica) 11(2):27-32. 1966.
77. PLATH, C. V. y VAN DER SLUIS, A. Uso potencial de la tierra del Istmo Centroamericano. Parte VII. Roma, FAO, 1968. 29 p.
78. ROBINSON, J. B. D. y HELVILLE, A. R. The effect of rainfall and other factors on coffee production and yields in Kenya 1947-55. Monthly Bulletin Coffee Board of Kenya 21(244):96-98. 1956.
79. SAENZ MAROTO, A. El frijol común. San José, Universidad de Costa Rica, 1962. 108 p.
80. SANCHEZ, C. J. y GARCIA B., J. Regiones mesoclimáticas en el centro y oriente de Venezuela. Agronomía Tropical (Venezuela) 18(4): 429-440. 1969.
81. SILVA, H. Contribuição para o estudo das causas da variação anual da produção do café. Revista do Café Portugues 3(10):13-28. 1956.

82. STOBBE, E. H., ORMEROD, D. L. y WOOLLEY, C. J. Flossoming and fruit set patterns in Phaseolus vulgaris L. as influenced by temperature. Canadian Journal of Botany 44(6):813-819. 1966.
83. SUAREZ DE CASTRO, F. Relaciones entre las lluvias y la producción de café. Boletín Informativo, Instituto Salvadoreño de Investigaciones del Café 7:11-20. 1961.
84. SYLVAIN, P. G. El cafeto en relación al agua. Turrialba, Costa Rica, IICA (Materiales de Enseñanza de Café y Cacao No. 11), 1959. 46 p.
85. THOMPSON, H. y KELLY, W. Vegetable crops. New York, McGraw Hill, 1957. 611 p.
86. THORNTHWAITE, C. W. y MATHER, J. R. Instructions and tables for computing evapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, Publication in Climatology 10(2):184-311. 1957.
87. TROJER, H. Algunas características agroclimáticas del trópico americano. Reunión Internacional sobre Problemas Agrícolas de los Trópicos Húmedos de América Latina. Lima, Perú, 1966. 22 p.
88. _____. Influencias climatológicas en el cultivo del café. In Reunión Técnica Interamericana de Café, la., Bogotá, 1960. Documento No. 3. 19 p.
89. VIDAL, P. Croissance et nutrition minérale des Mils (Pennisetum) cultivés au Sénégal. Agrom. Trop. 18(6-7): 1963.
90. VIEIRA, C. O feijao comun e sua lvaoura. Boletim de Agricultura (Brasil) 8(1-2):19-31. 1959.
91. _____. A cultura do feijao. Boletim de Agricultura (Brasil) 10(1-6):19-45. 1961-62.