

46003



Ciencias Naturales

*Agua, suelo, tecnologías*

**REVISTA DE LA  
UNIVERSIDAD  
DE CUENCA**  
a n a l e s



TOMO I - AGOSTO 1999

E. G. ...  
A 20 000  
16883-1  
050  
VUSA  
m/92869



REVISTA DE LA  
UNIVERSIDAD  
DE CUENCA  
a n a l e s

CIENCIAS NATURALES



m/92869



T O M O 1 - A G O S T O 1 9 9 9



**REVISTA DE LA  
UNIVERSIDAD  
DE CUENCA**  
a n a l e s

**CIENCIAS NATURALES**

**Rector:**

Gustavo Vega-Delgado

**Vicerrector:**

Jaime Astudillo Romero

**Directora del Departamento de  
Información y Cultura:**

María Augusta Vintimilla



T O M O 1 - A G O S T O 1 9 9 9

---



REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA  
ANALES  
CIENCIAS NATURALES  
TOMO 1

**Editor:**

Carlos Rojas Reyes

**Director:**

Felipe Cisneros Espinosa

**Consejo Editorial:**

Bert de Bievre  
Patricio Carpio  
George Loaiza  
Gerd Dercon

**Ilustraciones:**

Bernarda Toledo

**Diseño y diagramación:**

Eugenia Washima

**Impresión:**

Talleres Gráficos de la Universidad de Cuenca

<http://www.ucuenca.edu.ec>



© REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA  
ANALES  
CIENCIAS NATURALES  
TOMO 1

Primera edición  
Agosto 1999  
Impreso en Ecuador

ISSN No. 0041-8390

**Diseño original:**  
Diego Jaramillo Paredes

**Correspondencia y canje:**  
Departamento de Información y Cultura  
Universidad de Cuenca  
Casilla N° 168  
Teléfono: 831-688 (ext. 272)  
Fax: 835-197  
Cuenca-Ecuador

email: revista@ucuenca.edu.ec.

## Contenido

### EDITORIAL

Carlos Rojas Reyes/Felipe Cisneros Espinosa ..... 9

### Ingeniería y manejo de agua y suelo

Jan Feyen Phd. .... 13

### • AGUA Y SUELO

El PROMAS: Investigación integral en el campo de los recursos agua y suelo.

Felipe Cisneros, Jan Feyen, Bert de Bièvre ..... 17

Zonificación agroecológica del austro ecuatoriano. Una herramienta para la planificación sostenible de las relaciones espaciales: cuenca hidrográfica-ciudad.

Gerd Dercon, Bea Bossuyt, Bert de Bièvre, Felipe Cisneros, Josef Deckers ..... 29

SURDEV: un software para diseño, operación y evaluación de riego por escurrimiento superficial en la parcela.

J. Feyen, R. Jurriëns, D. Zerihun, H. Boonstra, R. Kselik ..... 41

Análisis cuantitativo de la performance de riego por surcos en el austro ecuatoriano, en pendientes mayores al 12%

Felipe Cisneros, Esteban Pacheco, Jan Feyen ..... 65

Estrategias modernas para la gestión ambiental de cuencas.

Jorge Faustino ..... 87

Gestión sostenible de microcuencas andinas en el Perú: el caso de la CCTA.

Juan Torres Guevara ..... 113

### • INFORMATIVO

II Encuentro de las Aguas. .... 123

Eventos ..... 129



## • CIENCIAS NATURALES • ARQUITECTURA

Combustion of volatile organic compounds over mixed-regime catalytic membranes  
Silvana Salamea. .... 133

Construir un lugar para la memoria en la periferia: el cementerio de Igualada/Arqs. Miralles y Pinós  
Augusto Samaniego ..... 139

**E**n el Ecuador, y particularmente en la región de la sierra, la disponibilidad de agua tiene marcada influencia en la vida diaria. Los ríos, fuentes naturales de captación, fluyen desde los Andes, las comunidades dependen del agua de esos ríos para todos sus usos: doméstico, generación hidroeléctrica, irrigación. Cualquier aprovechamiento de los ríos aguas arriba o abajo de los sitios de uso automáticamente causa conflictos con otros usos competitivos. La situación actual comienza a ser crítica ya que los períodos de alta precipitación son seguidos por estiajes prolongados (la precipitación anual tiene valores tan bajos como 500 mm a altos como 2000 mm) y los requerimientos de agua para el sector energético, la industria y las compañías del agua potable son altamente crecientes, causando una alta presión sobre el sector agrícola para que use del agua con más eficiencia. Recientes estudios revelan que los proyectos de dotación de agua para la agricultura en el Ecuador son en promedio exageradamente ineficientes.

Por otro lado el cultivo intensivo de la tierra con pendientes mayores al 12% ha producido una erosión severa, poniendo en riesgo la vida útil de los almacenamientos creados en los ríos con fines de generación de energía eléctrica. El daño potencial de la erosión en la provincia del Azuay es estimado en más de 40 Ton/Ha, mientras se puede considerar que una cantidad menor a 10 Ton/Ha es aceptable para no afectar a la productividad del suelo.

Para reducir la erosión se debe hacer un ajuste drástico de las prácticas agrícolas en los terrenos de alta pendiente, o el cultivo debería restringirse a zonas con más favorable topografía simultáneamente con medidas de agroforestación y conservación que deberían implementarse en las zonas críticas.

Adicionalmente se observa que la competencia en el uso del agua por parte de diferentes sectores de la sociedad en la provincia del Azuay se incrementa paulatinamente. Se espera que en la ciudad de Cuenca la demanda de agua potable y para uso industrial se incrementa de 1.400 l/S a 4.000 l/S en el año 2.030. Un incremento más alto todavía en el sector rural es probable, cuando se solucione el acceso de la población rural a los sistemas de agua potable. Se considera un incremento en el consumo de energía del estimado actualmente en 1.000 MW a una cantidad doble en el transcurso de 10 años. De la presente área de irrigación solamente unas pocas hectáreas están equipadas con una infraestructura física, esperándose el desarrollo de nuevos proyectos de irrigación a construirse en el futuro. Diferentes estudios indican que se necesita doblar la superficie con irrigación en los próximos 15 años y probablemente triplicarse hasta el año 2.025. Esa expansión es necesaria para permitir a la comunidad rural un desarrollo socioeconómico en armonía con la expansión de otros sectores de la sociedad. Por otro lado la población rural continuará migrando hacia las ciudades.

Sintetizando, no es exagerado decir que el desarrollo, manejo y preservación de los recursos hídricos en el futuro está sujeto a una severa presión. En cuanto a la calidad del recurso también está amenazada porque la

evacuación de aguas residuales solamente existe en las ciudades de magnitud así que se produce una contaminación incontrolada por descarga de efluentes en los ríos; por tanto, es deseable que los entes administrativos públicos, los semipúblicos y las empresas privadas desarrollen y manejen los recursos hídricos regionales, de tal manera que: (I) la totalidad de la población tenga acceso al agua potable de calidad adecuada; (II) las aguas residuales sean adecuadamente recolectadas y tratadas antes de ser reintegradas a los sistemas hidrológicos; (III) el sector agrícola reciba y cubra sus necesidades de agua para su desarrollo económico sostenible; (IV) la industria y las compañías de electricidad sean abastecidas de agua en forma continua de tal manera de lograr su completo desarrollo económico y abastecer de energía a los diferentes sectores de la sociedad. Adicionalmente el desarrollo regional debería ser cambiado de tal manera que la erosión y la polución del medio ambiente sean altamente considerados a largo plazo en el manejo adecuado de los recursos hídricos y mantenidos bajo control.

El Programa para el manejo del agua y del suelo, de la Universidad de Cuenca, actualmente se encuentra ejecutando varios proyectos de investigación que pretenden de una manera sistemática iniciar la resolución de los problemas anotados, en efecto, el tratamiento del problema se inicia con el proyecto "Métodos de riego y control de erosión en suelos andinos", actualmente en ejecución dentro del programa FUNDACYT - BID, signado con el número P-BID-130, el que contempla el manejo del agua **a nivel de parcela**. Con el ánimo de enfrentar la problemática a una mayor escala se ha formulado y actualmente se encuentra en ejecución el proyecto "Investiga-

ción para el manejo día a día de sistemas de riego", financiado por el Consejo Interuniversitario Flamenco de Bélgica; este proyecto pretende manejar el agua **a escala de proyecto** de riego, dado que el programa contempla el manejo del agua y del suelo, se ha formulado y actualmente se encuentra en plena ejecución el proyecto "Diagnóstico y soluciones para la degradación de suelos en el Austro Ecuatoriano", el mismo que maneja los suelos **a escala regional**.

Este esfuerzo que la Universidad de Cuenca viene realizando deberá ser multiplicado en los próximos años con acción conjunta, lo que redundará en el logro de las soluciones más adecuadas a los problemas, esto implicará que la producción de trabajos de investigación se incrementen significativa-

mente. En este contexto se inscribe la presente revista que trata de coadyuvar en la difusión de las actividades de investigación que se vienen ejecutando y que se ejecutarán; al mismo tiempo, pone a la disposición de los técnicos nacionales e internacionales una vitrina desde donde se pueda compartir las experiencias y lograr una mejor comprensión de los problemas y dar las soluciones más adecuadas a estos.

El Editor y el Director de la Revista de la Universidad de Cuenca, ANALES, Ciencias Naturales se encuentran sumamente complacidos de poder ofrecer a los lectores este primer número y hacemos un llamado para que participen en el futuro con aportes que sin duda darán mayor fuerza a lo que la Universidad de Cuenca intenta llevar adelante.



Carlos Rojas Reyes  
Editor

Felipe Cisneros Espinosa  
Director



ING. JAN FEYEN PHD.

Presidente del Consejo de Revisión  
Científica de PROMAS  
Director del Institute for Land and  
Water Management de la Katholieke  
Universiteit Leuven

**I**ngeniería y Manejo de Agua y Suelo son cada vez más importantes para el futuro de la humanidad. Existen por lo menos dos razones para esta creciente importancia.

Primero, se acepta generalmente que el uso inteligente de agua y suelo, aparte de varios recursos más, jugarán un papel clave en la provisión de suficientes alimentos para las generaciones futuras. A pesar de todo tipo de programas y políticas, la población global de nuestro planeta sigue incrementándose y probablemente lo hará por lo menos por medio siglo más, lo que significa que se necesitarán más alimentos y fibras. Al mismo tiempo la demanda de alimentos cambia en lo que se refiere al tipo y a la calidad. Sin duda existe un incremento en la demanda de alimentos de alta calidad y variedad. Ambos efectos traen la preocupación de un mejor uso de la tierra y de un mejor manejo del agua en la agricultura, con miras a cubrir los requerimientos futuros de alimentos.

Segundo, la demanda tierra para diferentes usos en las zonas rurales, muchas veces llamados espacios verdes, está aumentando rápidamente especialmente en los países industrializados. Sin embargo, es obvio que también los países en vías de desarrollo tienen que prestar atención a este aspecto, así tenemos un instrumento de uso de tierras para vivienda, industria, infraestructura, recreación, paisaje y conservación de la naturaleza. El aumento del uso de la tierra para desarrollo urbano es un resultado di-



recto del aumento de la población. La preocupación para la conservación de paisajes y naturaleza es resultado de un mejor entendimiento de su papel vital en zonas rurales sostenibles. La agricultura como usuario principal del espacio en zonas rurales tiene que cambiar, se deberá utilizar métodos en los cuales los recursos naturales suelo y agua no sufran degradación.

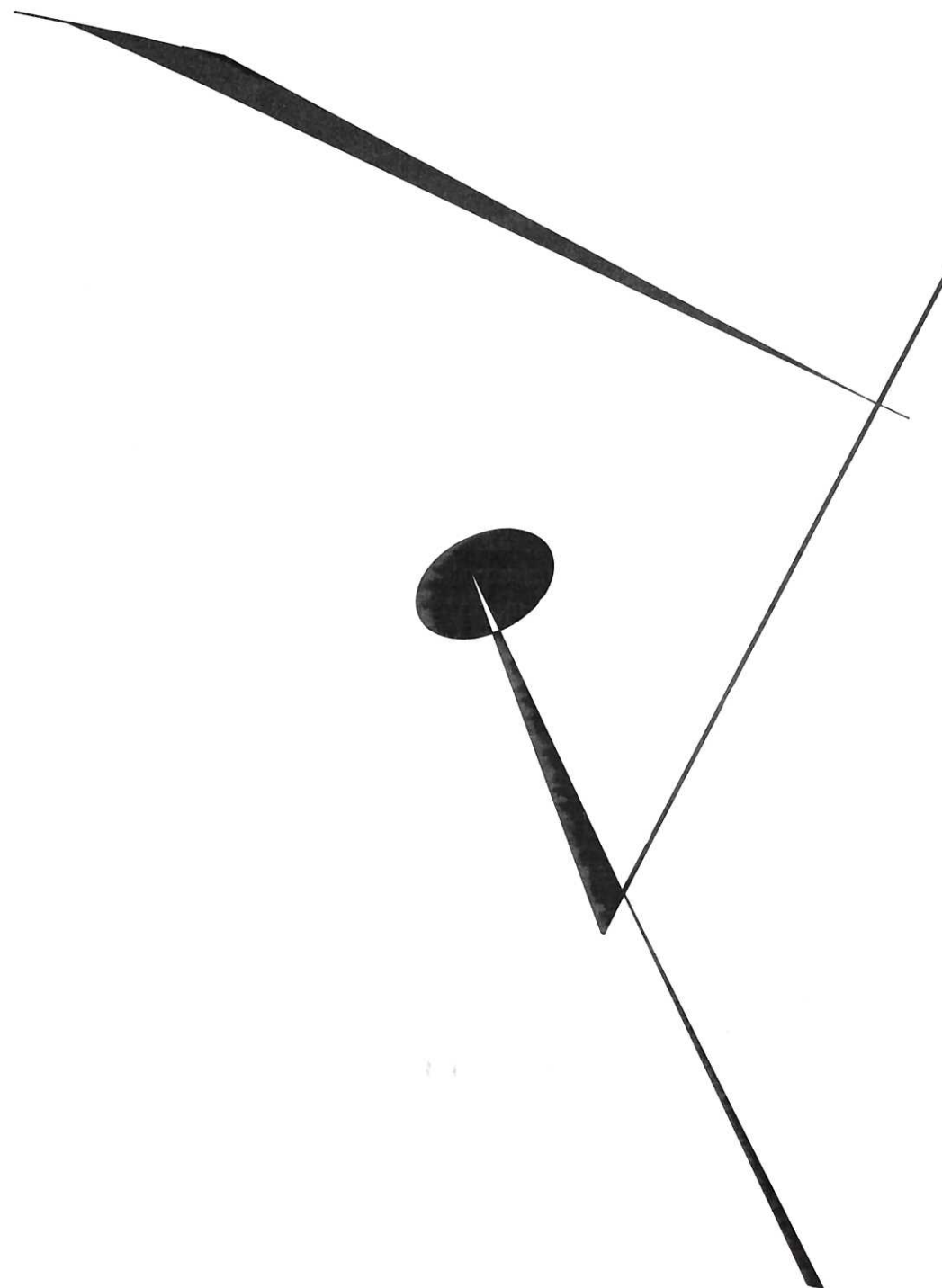
Adicionalmente, en los actuales momentos la sociedad ha comprendido que la protección de la naturaleza es fundamental para el planeta y para la humanidad a largo plazo. La protección y rehabilitación de áreas naturales, la planificación de áreas naturales nuevas, el diseño de corredores ecológicos, el rediseño y mejoramiento de paisajes son temas que surgen, por lo tanto el reto para los ingenieros de agua y suelo y otros profesionales involucrados es encontrar buenos equilibrios entre las diferentes demandas.

Las condiciones naturales de la Zona Andina en general y del Austro Ecuatoriano en particular hacen que su ecosistema tenga una extrema fragilidad. Las características topográficas, geológicas y de variabilidad del clima complican el manejo sostenible de los recursos naturales, especialmente agua y suelo.

La investigación científica corre el riesgo de que sus resultados no sean implementados por falta de una adecuada difusión. Para evitar esto y para someter los resultados de la investigación a un control de calidad externo, es importante que la investigación sea resumida en textos que cumplen con las normas de publicación en revistas nacionales e internacionales. El mejor criterio internacional de control de calidad es que los artículos sean acep-

tados para presentación en congresos científicos o para publicación en revistas internacionales con selección científica. La publicación internacional es entonces un mecanismo de control esencial para comprobar si las actividades de investigación locales tienen tal calidad que se puedan comparar con el estado del arte en la investigación internacional. Sin embargo el riesgo existe que equipos de investigación locales dirigen sus esfuerzos únicamente hacia un reconocimiento internacional, dejando de lado informar a la sociedad local. Para asegurar que la comunidad y el mundo académico local se informen sobre las actividades de investigación en ejecución, la Universidad de Cuenca y su Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) han decidido impulsar la publicación de esta revista bianual y semicientífica, en la que se presentan trabajos de investigación en el campo de la Ingeniería de Agua y Suelo y de las Ciencias Naturales en general. A través de esta revista el PROMAS espera mejorar aún más sus contactos con la sociedad académica local y con los usuarios de sus productos. Los Investigadores también tienen que dar testimonio a la sociedad del uso que se ha dado a los fondos recibidos de instituciones locales e internacionales. La publicación de esta revista ayudará a cumplir este objetivo. Si adicionalmente la comunidad a la que está dirigida esta revista tiene la valentía de proporcionar retroalimentación, se ayudará a los investigadores a mantener la investigación enfocada hacia los problemas de la vida real produciendo soluciones adecuadas y sostenibles y evitando descarrilamiento de la investigación hacia la curiosidad académica sin mayor aplicabilidad.

TRADUCCION:  
ING. BERT DE BIÈVRE



*Bert de Bièvre*  
3-2-1978



## RESUMEN

Dados los desafíos que se vienen con el siglo 21, tal vez la más importante consideración en la planificación y manejo de los recursos suelo y agua será la necesidad de poner mucha más atención en la sostenibilidad del uso de estos recursos por la sociedad. En este contexto, el presente artículo entrega una breve esbozo de las presiones que se ejercen sobre el suelo y el agua alrededor del mundo y específicamente en el Ecuador. El artículo comenta también sobre las limitaciones existentes en el diseño de ingeniería y la necesidad de considerar soluciones con enfoque sistémico como base de la sostenibilidad. Finalmente se comenta sobre el establecimiento del PROMAS, un programa de investigación científica de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Cuenca del Ecuador, cuyo objetivo final es el de encontrar soluciones ingenieriles, en el campo de los recursos suelo y el agua, con enfoque sistémico. El artículo concluye con una descripción del enfoque del PROMAS, modo de operación, y logros alcanzados en el campo de la Docencia, Investigación y extensión.

## ABSTRACT

Given the challenges of the 21st Century, perhaps the most important consideration in the planning and management of land and water resources will be the need for a much greater focus on the sustainability of the use of these resources by the society. With respect to the previous, this paper gives a brief outline of the pressures on land and water resources worldwide and locally in Ecuador. The paper comments also briefly on the constraints in many engineering designs, and the need to consider solutions in a systems approach as a basis for sustainability. The latter has lead to the establishment of PROMAS, a program within the University of Cuenca of Ecuador, with the ultimate goal to bring engineering solutions, in the field of land and water resources, in a systems approach. The paper concludes with a description of PROMAS approach, mode of operation and realizations in the field of training, research, consulting and extension.

<sup>1</sup> PROMAS, Programa Para el Manejo del Agua y del Suelo, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Ecuador

<sup>2</sup> Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium

**Introducción**

Se ha demostrado que el análisis desde el punto de vista técnico y económico para la solución de los problemas, como se ha venido aplicando en décadas pasadas, no es suficiente. La sociedad presiona cada día más para que se logren soluciones a los problemas que sean adecuadas y sostenibles. Para que una solución a los problemas sea sostenible es menester que esta se encuentre en armonía con las características sociales y culturales de los pueblos. La sociedad está a punto de encontrarse con una situación tal que la demanda de alimentación y bienestar económico excedan la capacidad natural disponible.

**Perspectiva Mundial**

En las próximas décadas la sociedad estará gobernada por las siguientes fuerzas:

- Presión poblacional y seguridad alimentaria
- La equidad
- La sostenibilidad
- Los asuntos medioambientales

**Presión poblacional y seguridad alimentaria**

De acuerdo a estudios realizados, hacia fin de siglo se tendrá un déficit de 50 millones de Tm de cereales, en el año 2.020 el déficit será de 245 millones de Tm de cereales.

Período		1.950-1.990	1.990-2030
Incremento de población	hab/periodo (billones)	2.8	3.6
	hab/año (millones)	70	90
Incremento de producción de cereales	Tm/periodo (billones)	1.15	0.369
	Tm/año (millones)	28.75	9.23

(Bonte-Friedman y Sheridam, 1997)

**La Equidad**

- En el presente solo 1/4 de la población mundial vive en los países desarrollados, quienes tienen el control y consumen la mayoría de los recursos disponibles
- En las grandes ciudades se tiene el fenómeno de migración de la población del campo que en general engrosan los cinturones de miseria y pobreza extrema

- La migración se produce por la presión ejercida sobre el recurso suelo que deviene improductivo, por otro lado el crecimiento poblacional presiona para uso en zonas con difícil agroecología para agricultura

**La Sostenibilidad**

- El área que deberá ser cultivada para cubrir las necesidades del

crecimiento poblacional crecerá en los próximos años, esto incrementará la presión sobre los recursos hídricos.

- La consecuencia directa de lo anterior es que la presión sobre los dos recursos básicos de la tierra suelo y agua, escale y sobrepase los límites de la sostenibilidad.
- La industrialización de los procesos tendientes a incrementar la productividad requiere de serias manipulaciones químicas que tienen que ver con la viabilidad de estas tecnologías a largo plazo, por la degradación del medio ambiente
- Los impactos negativos de la interferencia humana y en particular de la agricultura en los recursos suelo y el agua serán únicamente detenidos si la agricultura y otros desarrollos se vuelven sustentables.

**Las preocupaciones medioambientales**

- El uso intensivo de productos químicos es una de las mayores preocupaciones relativas a la degradación del medio ambiente, estos están contaminando los ríos y lagos necesarios para el abastecimiento de agua potable,
- La agricultura moderna está deteriorando la fertilidad de los suelos,
- La transformación de zonas forestales en zonas de producción agrícola es otra preocupación medioambiental.

**La Situación en el Ecuador**

La República del Ecuador es un país andino con 270.670 Km<sup>2</sup> ubicado en la costa norte de la América del sur en el océano Pacífico sobre la línea ecuatorial, limita al norte con Colombia y al sur con el Perú.

El país está dividido en tres regiones: La costa que corresponde a la llanura occidental, La Sierra enclavada en los Andes y el Oriente comprende parte de la selva este de la cuenca alta del río Amazonas

El Ecuador tiene una población de 11.9 millones de habitantes con una densidad poblacional del 44.1 hab/Km<sup>2</sup>, el 49% vive en las tierras bajas de la costa, el 47% en los Andes y los restantes en el Oriente

Las mismas fuerzas referidas en la situación mundial están presentes en el Ecuador.

La población está concentrada en las tierras altas de los Andes y en la zona costanera, la presión poblacional sobre la tierra es particularmente alta en la sierra y en algunos casos ya ha excedido la capacidad natural de soporte.

Conforme esta presión avanza, los campesinos son forzados a ocupar cada día más las tierras altas y se ven obligados a realizar cultivos en terrenos con pendientes pronunciadas (>12%) La productividad de estos suelos no solamente es baja sino que son adicionalmente susceptibles al fenómeno de erosión, la cual cada día crece significativamente, esta situación produce un fenómeno muy fuerte de migración hacia las grandes ciudades y también al extranjero (EE.UU.)

Además del problema de la erosión, en las zonas altas el agua es escasa, llevando en muchos casos a disputas por el líquido vital creando conflictos de uso y manejo

El mayor uso del agua en el Ecuador es para la agricultura, seguido del uso para generación de energía y el uso doméstico

No solamente la cantidad del agua es un problema en los actuales momentos, su calidad ha sido también afectada por el uso indebido de los recursos por parte de los habitantes.

Los problemas de calidad de agua tienen relación con: Turbidez, eutrofización y uso de pesticidas y otros productos químicos, estos problemas están relacionados con la erosión. Estos problemas han sido agravados en 1998 por la devastadora presencia del fenómeno del Niño, el que ha descubierto en cierta medida las deficiencias en el tema.

#### **Deficiencias en los diseños ingenieriles en el campo del agua y del suelo**

Para cubrir la demanda de alimentos que la humanidad requiere, el hombre ha hecho que los recursos requeridos estén disponibles, para lo cual ha manipulado los suelos por siglos. Del mismo modo para el desarrollo de diferentes actividades económicas el hombre ha desarrollado y utilizado los recursos necesarios sin restricciones. Para citar algunos ejemplos: se construyen vías, se fertilizan y drenan los terrenos, se quita la vegetación, se cultivan y cortan árboles, sin embargo, las intrincadas interacciones entre diferentes componentes del ecosistema se producen efectos secundarios "no explicados" que no están siendo considerados. Desafortunadamente, las fallas y/o los diseños inapropiados de las obras de ingeniería generalmente aceleran estos procesos negativos.

#### ■ **Algunas deficiencias en proyectos en el campo del manejo del agua y del suelo:**

- Los diseños se basan en datos insuficientes y/o los datos son de mala calidad.
- Los diseños se realizan utilizando métodos antiguos, o los métodos utilizados no son los apropiados.

- Los métodos actuales utilizados no tienen el suficiente desarrollo y todavía no se considera la complejidad de los problemas y sus posibles interacciones con el medio ambiente.
- Los diseños se realizan para resolver problemas específicos (una planta hidroeléctrica o un sistema de riego) sin considerar los posibles impactos de esos diseños en otros aspectos.
- La selección de la alternativa óptima es basada en muchos casos solo en análisis de costo antes que en análisis de costo / beneficio incluyendo el análisis de los costos de remediación de los daños al medio ambiente.
- Los errores no son solo atribuibles a la fase de diseño, también están de por medio las fases de construcción, operación y mantenimiento de los proyectos, en donde también se han cometido errores graves que deberán ser corregidos en este contexto.

#### **Enfoque sistémico para el manejo del agua y del suelo**

El concepto del enfoque Sistémico data de 1971 (Chorley y Kennedy), el paradigma fue desarrollado por los geógrafos para estudiar los procesos a diferentes escalas: micro, meso y macro, estudiando especialmente el medio natural.

En los últimos tiempos los estudios se realizan independiente de la escala incluyendo el análisis holístico entre la sociedad y el medio ambiente (Hutchinson, 1986).

El concepto es adoptado gradualmente por diferentes disciplinas bajo la presión de las preocupaciones sociales por el medio ambiente.

La consecuencia de esto es que en

poco tiempo el diseño de un embalse, por ejemplo, será basado no solo en el volumen de agua necesario para determinada actividad y sus características geotécnicas, sino también se deberán examinar las posibles interacciones de esta obra con la sociedad y el medio ambiente.

#### **Algunos conceptos del enfoque sistémico:**

- El enfoque sistémico da prioridad a la aprensión de conjunto, establece leyes de relación, integración de visión global, realiza aproximaciones interdisciplinarias.
- Para el manejo sustentable del agua y del suelo es aconsejable el enfoque a nivel de cuenca hidrográfica como unidad de planificación y de finca como unidad de análisis.
- El manejo sustentable de una cuenca hidrográfica de acuerdo a lo expresado por Falkenmark y Lindh (1993) debe tener las siguientes condiciones básicas.
  - El agua subterránea debe ser apta para el consumo humano, el suelo productivo y los peces comestibles
  - La diversidad biológica debe ser conservada, y;
  - Los recursos renovables deben ser salvados en el largo plazo

#### **Concepción del Programa para el manejo del agua y del suelo PROMAS**

El Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, PROMAS es un programa de investigación científica de la Facultad de Ingeniería y del Instituto de Investigaciones IDIUC de la Universidad de Cuenca de la República del Ecuador.

El PROMAS, nace como una necesidad de dar respuesta a los acuciantes problemas de manejo del agua y del suelo en la región Austral del Ecuador en 1992.

La mayoría de las universidades Ecuatorianas tienen como principal propósito y actividad la docencia, la Universidad de Cuenca ha iniciado un importante proceso de cambio hacia una universidad que además de la docencia tenga como actividad principal la Investigación científica, PROMAS es el reflejo de este proceso.

En él se ha establecido un importante programa de investigación científica que se intenta llevar adelante con la aplicación del enfoque sistémico a fin de cubrir todos los aspectos necesarios con miras a encaminar a la región en el desarrollo sustentable.

El PROMAS, arranca como un experimento de la escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, elaborando pequeños proyectos de consultoría aislados, lo cual le permite iniciar sus actividades sin mayores requerimientos de fondos de la Universidad.

Desde sus inicios el PROMAS aplica el criterio del trabajo conjunto, y utiliza las pequeñas utilidades de su trabajo para crear la infraestructura necesaria, del mismo modo se aplica este criterio con los estudiantes de los últimos años de las Facultades que participan en él, haciéndolos trabajar juntos a ingenieros civiles, agrónomos, sociólogos, economistas, etc., con miras a formar equipos interdisciplinarios.

Desde que el PROMAS realiza sus primeros trabajos gradualmente se adopta el concepto del estudio de los problemas técnicos en un contexto

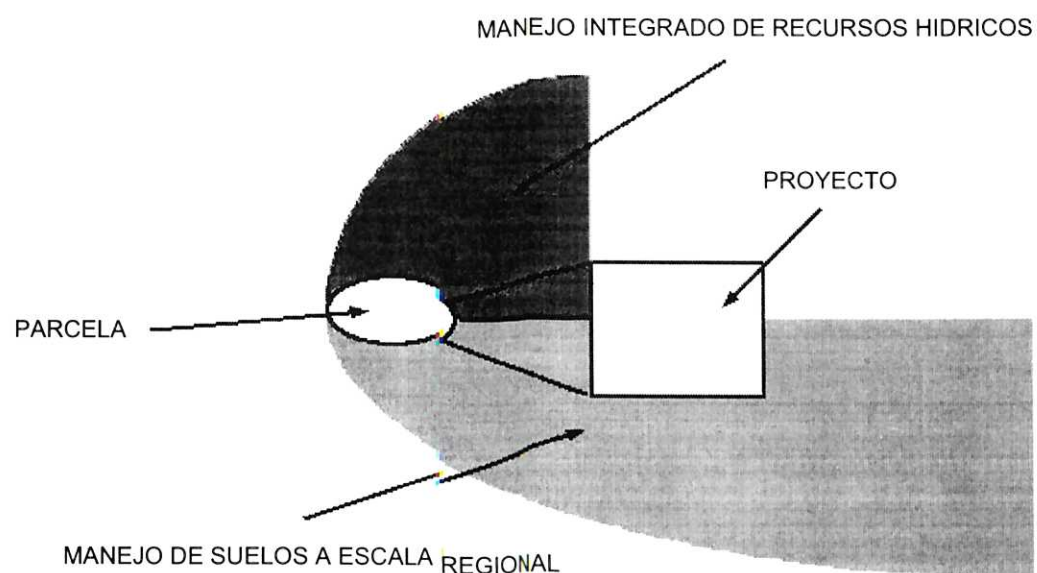
holístico, así, se estudia el problema dentro de los límites del sistema teniendo en consideración todas las posibles interacciones del sistema estudiado con el sistema exterior incluyendo las interacciones con la gente.

Por otro lado el PROMAS así mismo desde sus inicios ha tratado de llevar adelante los proyectos con participación de las comunidades a las cuales se les está ayudando a resolver sus problemas, esto ha hecho que el PROMAS se gane la confianza de ellas, esto contrasta con las prácticas normales de actuación de las instituciones en el Ecuador y otros países en vías de desarrollo, donde la administración local, diseña y construye los

proyectos sin considerar la opinión de la comunidad.

Lograr enmarcar el análisis de los problemas en el enfoque sistémico, requiere la evolución del manejo de las actividades del tipo Consultoría /Extensión a los proyectos orientados en el ámbito de la Investigación. Los tres proyectos que actualmente se llevan adelante en el PROMAS, abarcan en el ámbito regional los relevantes problemas relacionados con el manejo del agua y del suelo en un contexto holístico, teniendo en consideración la interacción entre las soluciones ingenieriles, la comunidad y el medio ambiente.

**Filosofía del PROMAS  
MANEJO TOTAL DE CUENCA HIDROGRAFICA**



**Operación del PROMAS**

La operación del PROMAS está basada en la renovación constante de proyectos tipo Consultoría/Extensión que le dan ingresos.

La segunda fuente de ingresos corresponde a los tres proyectos de investigación científica que se encuentran en plena ejecución dentro del programa y que son financiados por la cooperación internacional como la ABOS de

Bélgica y el BID-FUNDACYT del Ecuador.

La tercera fuente de ingresos corresponde a la organización de cursos de postgrado de corta y larga duración.

El PROMAS funciona bajo el paraguas del Instituto integrado de investigaciones de la Universidad de Cuenca, el que funciona independiente de las Facultades y escuelas administrando los trabajos de consultoría e investigación científica.

La mayor ventaja del PROMAS consiste en que su labor se desempeña independiente de la evolución del manejo de las Facultades que normalmente es inapropiado para este tipo de actividades.

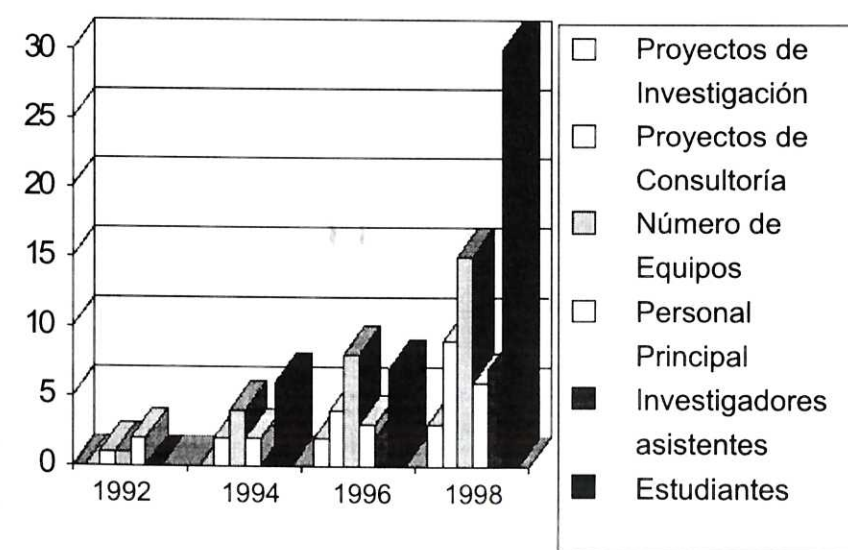
A base de un óptimo manejo de sus recursos el PROMAS tiene hoy en día, un Staf de 40 personas de los cuales 15 son profesores a tiempo completo de la Universidad de Cuenca, los 25 restantes son egresados de las diferentes escuelas de las Facultades, de

los primeros, 3 son cooperantes internacionales expertos en ingeniería civil, ciencias del suelo y SIG. El PROMAS recluta estudiantes de diferentes facultades y escuelas a saber: Facultad de Ingeniería, escuelas de Ingeniería Civil y de Sistemas, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Ciencias Económicas, Ciencias Sociales, etc., las que contribuyen para el enfoque multidisciplinario del equipo para resolver los problemas ingenieriles integralmente.

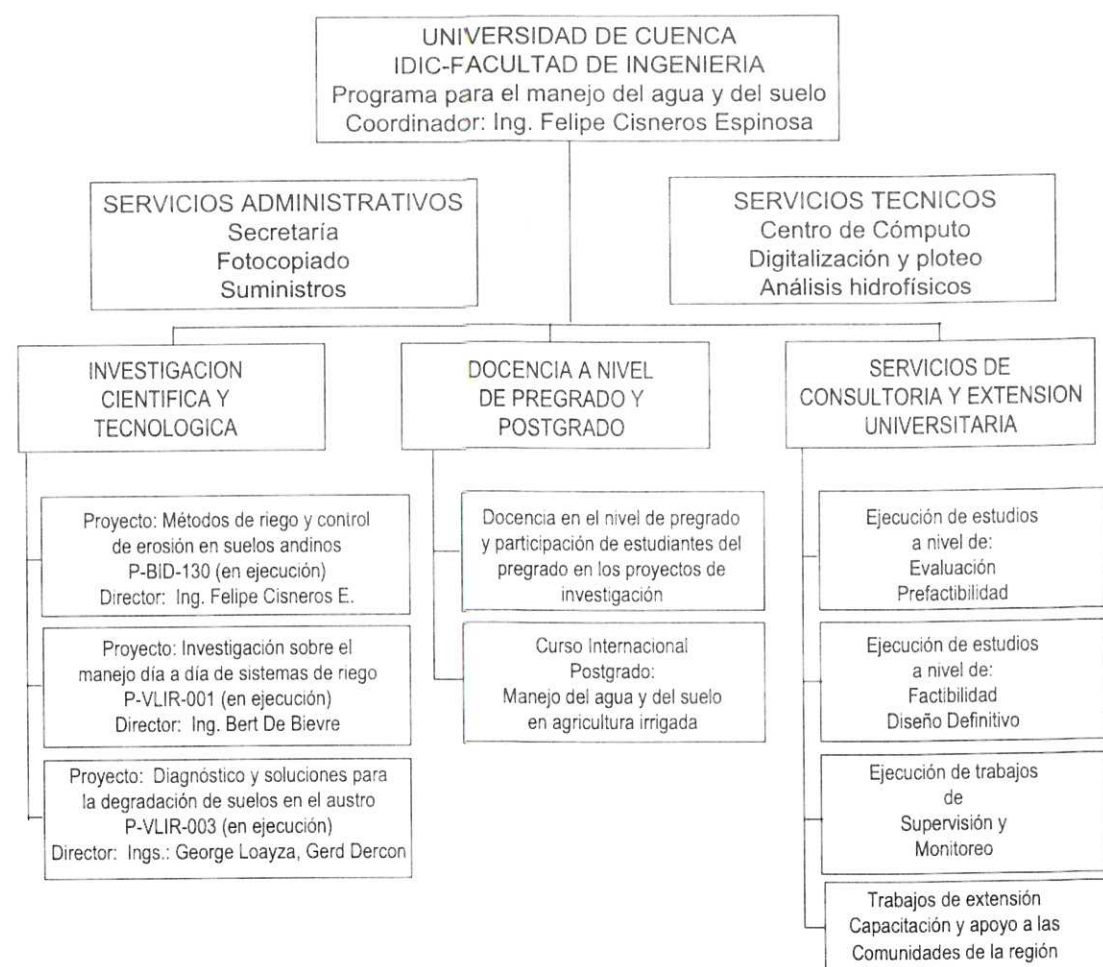
El PROMAS se ha preocupado de sus integrantes en el tema de capacitación en el exterior, actualmente tiene a 10 técnicos realizando postgrados y maestrías en diferentes países del mundo como: Bélgica, Bolivia, El Reino Unido por períodos que van de 3 meses a 3 años

Adicionalmente se encuentran realizando los estudios a nivel de PhD, 3 integrantes del PROMAS con la Universidad Católica de Lovaina Bélgica, para lo cual la investigación requerida en este tema se realiza dentro de los proyectos en ejecución.

**Crecimiento del PROMAS**



### Estructura y Operación del programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS



#### Logros del PROMAS

Los logros del PROMAS pueden ser ubicados bajo 3 grandes tipos de actividades propias de la Universidad como son: Docencia, Investigación y Consultoría/Extensión. En las Tablas 1 hasta la 3, se entrega un resumen de las actividades del PROMAS y los logros en los campos anteriormente citados, respectivamente.

Actividades de entrenamiento-docencia (ver Tabla 1) que corresponden a la organización del curso de postgrado sobre el manejo del agua y del suelo en agricultura irrigada. Para esta actividad los expositores de los diferentes

módulos fueron seleccionados de un staf internacional. Los costos de matrícula pagados por los participantes cubrieron completamente los gastos requeridos para la organización del curso. Adicionalmente a este curso de post grado, el PROMAS constantemente esta organizando seminarios y cursos de actualización de conocimientos especialmente cuando el staf internacional se encuentra de visita en el PROMAS. En la planificación a corto plazo el PROMAS tiene preparados los documentos para iniciar un nuevo curso de postgrado en el tema de la evaluación de tierras y degradación de suelos.

La Tabla # 2 entrega un resumen de los tres proyectos de investigación que se vienen llevando adelante en el PROMAS. Dos de los proyectos referidos son financiados por la Agencia Belga de Cooperación al desarrollo a través de la cooperación Interuniversitaria entre las Universidades Flamenca, asociadas en el Consejo interuniversitario Flamenco VLIR, y la Universidad de Cuenca. El tercer proyecto es realizado a través del FUNDACYT y financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo BID. Los tres proyec-

tos tienen el objetivo principal de incrementar los conocimientos y la capacidad de investigación del PROMAS en el campo del manejo de los recursos agua y suelo. Los proyectos así mismo tienen la obligación de convertirse en la transición hacia la consecución de contactos adicionales para el desarrollo de la investigación. Lo anterior esta en la línea del objetivo general de PROMAS en el largo plazo de convertirse en un centro de excelencia en investigación y manejo en el campo de los recursos agua y suelo.

**TABLA N° 1**  
**Estructura y principales rubros del curso Internacional de postgrado sobre manejo del agua y del suelo en agricultura irrigada**

# de módulo	Contenido del curso	# de horas
1	Requerimientos en irrigación (climatología, evapotranspiración, uso consuntivo de los cultivos, etc.)	70 h
2	Diseño de sistemas de riego por escurrimiento superficial	70 h
3	Agricultura irrigada en los Andes	70 h
4	Control de erosión, régimen de riego y salinidad	70 h
5	Herramientas computacionales para el manejo del agua y del suelo (AutoCAD, GIS, DSS, etc.)	140 h
6	Modelización hidrodinámica, algoritmos de control para flujo en canales	70 h
7	Métodos de riego a presión	
	<b>Total número de horas</b>	<b>560 h</b>

**TABLA N° 2**  
**Resumen de los proyectos de investigación (PROMAS, 1996a, 1996b y 1998)**

código	Título del proyecto	Período de ejecución	Financista
VL.I.R. 1	Investigación sobre el manejo día a día de sistemas de riego en países en desarrollo	01/04/1996 30/03/2000	Agencia Belga para la Cooperación al Desarrollo
P-BID-130	Métodos de riego y control de erosión en suelos andinos	17/09/1996 17/03/2000	Banco Interamericano de Desarrollo BID-FUNDACYT
VL.I.R. 3	Diagnóstico y soluciones para la degradación de suelos en el Austro Ecuatoriano	01/01/1998 31/12/2002	Agencia Belga para la Cooperación al Desarrollo

Se realizan constantemente esfuerzos a fin de establecer convenios para investigación científica con otros centros de investigación en los Estados Unidos, Europa y otros Países de América Latina. Los fondos obtenidos a través de los 3 proyectos de investigación listados en la tabla # 2, le dan al PROMAS una considerable oportunidad para mejorar y potenciar sus recursos humanos y físicos. Adicionalmente, la Investigación contribuye fuertemente en la integración del concepto de enfoque sistémico en todas las actividades que desarrolla el PROMAS como son Docencia, Investigación y Consultoría / Extensión respectivamente.

PROMAS arrancó con la ejecución de trabajos de consultoría pequeños y medianos, en la actualidad PROMAS sigue buscando trabajos de consulto-

ría, principalmente porque complementa el financiamiento y ayuda a que el equipo esté en contacto con la vida real. (vea Tabla 3). PROMAS no solamente quiere convertirse en un centro de excelencia en el ámbito del manejo de los recursos agua y suelo, también espera contribuir en la elevación del estándar de vida de las comunidades en las provincias de Azuay, Cañar y El Oro. Los proyectos de consultoría también sirven para que estudiantes egresados puedan realizar pasantías y proveen de temas interesantes para tesis de grado. De esta manera PROMAS tiene la oportunidad de monitorear las fortalezas técnicas y científicas de los alumnos egresados y su capacidad de trabajar en equipo. Los mejores alumnos pueden quedarse a trabajar en los proyectos de investigación después de graduarse.

**TABLA N° 3**  
**Resumen de proyectos de consultoría y de extensión**

Nombre del proyecto	Tipo de proyecto
Estudios de Prefactibilidad del proyecto de Riego Sigsihuaico.	Estudio de prefactibilidad
Diseño Definitivo de los proyectos de riego Chontamarca, Gualleturo, Bachirin y San Antonio de Pahuancay, en la cuenca alta del río Cañar.	Diseño definitivo
Estudio de Prefactibilidad del proyecto de riego Bulán - San Cristóbal.	Estudio de prefactibilidad
Estudio de Factibilidad del proyecto de riego Bulán - San Cristóbal.	Estudio de factibilidad
Delimitación y Amojonamiento del Bosque Rumicruz.	Diseño definitivo
Caracterización de las conducciones Tuñi - Labrado y Tuñi - Chanlud.	Proyecto de evaluación y diseño
Estudio con modelo físico del enrocado de salida para los Umbrales de estabilización en el río Paute.	Estudio experimental
La implementación de fincas demostrativas en las comunidades de Santa Isabel	Extensión
Estudio e implementación de fincas demostrativas en las zonas de Chontamarca, San Antonio de Pahuancay, Chauchas - Sucas y Jabaspamba - El Tambo.	Extensión
Estudios de un Sistema de Turbo-Bombeo con fines de Riego para la comunidad de Sigsihuaico	Diseño definitivo
Plan de gestión ambiental en la comunidad de Dandán	Estudio de evaluación
Regularización del cauce del río Bomboiza en el tramo Gabarra Vieja - El Belén y Diseño de las obras de protección que permitan el aprovechamiento sustentable de los recursos disponibles.	Diseño
Estudio de riego y uso de suelos de la comuna de Chunasana, Nabón.	Estudio de prefactibilidad

En el transcurso de los años cambió el tipo de proyectos de consultoría que realiza PROMAS. Anteriormente eran en su mayoría estudios de prefactibilidad, factibilidad y diseño, mientras que hoy se está contactando a PROMAS para la implementación de proyectos de demostración, lo que es más una actividad de extensión. Esta evolución ayuda a diversificar el rango de productos y servicios que PROMAS está ofreciendo en el campo del manejo de los recursos agua y suelo.

También en sus proyectos de consultoría y de extensión, PROMAS intenta aplicar el enfoque sistémico. Realiza los diseños de acuerdo a la capacidad de las personas que tendrán que operar o manejar las obras ejecutadas y cuida que los diseños tengan un impacto ambiental mínimo. Especialmente en las actividades de extensión, PROMAS presta bastante atención a los aspectos ambientales y sociales.

Dados estos efectos beneficiosos de la realización de proyectos de consultoría y extensión, PROMAS seguramente seguirá trabajando en esta línea. Obviamente el desafío para PROMAS será mantener un buen equilibrio y coherencia entre las tres actividades básicas, eso es la organización de cursos cortos y largos a nivel de postgrado, la investigación, y las actividades de consultoría y extensión.

**Conclusiones**

- La presión poblacional, la presión de las clases pobres de la sociedad pugnando por la equidad, la necesidad de desarrollar sistemas que sean sustentables y sistemas que tengan un mínimo impacto en el medio ambiente, el hecho cierto de que la tierra debe permanecer habitable para las futuras gene-

raciones, conduce sin ninguna duda a introducir el enfoque Sistémico en varias disciplinas, lo cual constituye un mecanismo idóneo para la solución de los problemas científicos planteados.

- El enfoque Sistémico fue aplicado por el PROMAS desde 1.994 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, por cuanto es la única vía que permite realizar proyectos sustentables y socialmente aceptables. El concepto que fuere aplicado originalmente en los proyectos de consultoría gradualmente ha ido adoptándose en los proyectos de investigación y actualmente también a los cursos de postgrado que se vienen ejecutando.
- El enfoque del PROMAS, el modo de operación, así como sus ejecutorias, puede ser un ejemplo para su aplicación de iniciativas similares en los países en desarrollo.
- Dadas las características similares de los problemas técnicos, sociales y medioambientales en el campo del manejo del agua y del suelo, es deseable que proyectos similares al PROMAS conduzcan a una colaboración más estrecha a fin de reforzar las capacidades de desarrollo de la ciencia y tecnología en este campo, lo cual necesariamente permitirá que las soluciones que se adopten en los próximos 25 años sean más sustentables.

## 6. Referencias

- Bonte-Friedheim, C. and K. Sheridan (Eds.), 1997. The globalization of science: The pace of agricultural research. Publication of the International Service of National Agricultural Research (ISNAR), The Hague, The Netherlands, 216pp.
- Castensson, R., M. Falkenmark and J.E. Gustafsson (Eds.), 1990. Water awareness in societal planning and decision-making. Swedish Council for Planning and Coordination Research, FRN Report 90 (9), Stockholm, Sweden.
- Cisneros, F., J. Feyen and B. De Bièvre. 1998. PROMAS: an example of systems approach for the sustainable management of land and water resources. I Seminario Internacional sobre Riego y drenaje. METANICA, 98 La Habana, Cuba
- Chorley, R.J. and B.A. Kennedy, 1973. Physical Geography: a systems approach. Prentice Hall, 1973.
- Falkenmark, M. and G. Lindh, 1993. Water and economic development: A guide to the World's fresh water resources. In: Water in crisis (P.H. Gleick, ed.). Publication of the Pacific Institute for Studies in Development, Environment, and Security. Stockholm Environment Institute, Oxford University Press: 80-91.
- Gomez, N., 1996. Modelos de Ecodesarrollo cuenca - ciudad, aplicación de Enfoque Ecológico, Enfoque Sistémico y Sistemas de Información Geográfica. I Seminario - Taller Latinoamericano Sobre Modelos De Ecodesarrollo Cuenca - Ciudad con Aplicación de Enfoque Sistémico y SIG. Cali, Colombia.
- Hutchinson, J.C., 1986. Total catchment management and teaching geography. Journal of Soil Conservation, New South Wales, Australia, 42(1): 83-85.
- PROMAS, 1996a. Proyecto: Métodos de riego y control de erosión en suelos andinos (P - BID - 130). Documento del proyecto e informes. Instituto de Investigaciones, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- PROMAS, 1996b. Proyecto: Investigación sobre el manejo día a día de sistemas de riego (P - VLIR - 001). Documento del proyecto e informes. Instituto de Investigaciones, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- PROMAS, 1998. Proyecto: Diagnóstico y soluciones para la degradación de suelos en el Austro Ecuatoriano. Documento del proyecto e informes. Instituto de Investigaciones, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.



## ZONIFICACION AGROECOLOGICA DEL AUSTRO ECUATORIANO Una herramienta para la planificación sostenible de las relaciones espaciales: cuenca hidrográfica-ciudad\*

GERD DERCON<sup>1,2</sup>, BEA BOSSUYT<sup>3</sup>, BERT DE BIÈVRE<sup>1,3</sup>, FELIPE CISNEROS<sup>1</sup>, JOZEF DECKERS<sup>3</sup>

### SUMARIO

**E**n el presente estudio se ha definido como "Austro ecuatoriano" a la región interandina ubicada entre los paralelos 2°15' y 3°30' Sur del Ecuador (región Cañar-Cuenca-Oña). Esta región se caracteriza por la gran variedad de sus condiciones físicas (clima y suelo) y presenta serios problemas de erosión de los suelos. Las consecuencias de esta degradación de los suelos son visibles en todos los sectores de la economía. Un ejemplo típico constituye el complejo hidroeléctrico Paute, que provee el 70% de la energía eléctrica del país, que recibe ingentes cantidades de sedimentos en su embalse de Amaluza.

El objetivo principal del presente estudio es tener una visión general de las condiciones físicas del Austro Ecuatoriano, con el propósito de definir zonas aptas para las inversiones en mejoramiento agrícola, reforestación, conservación natural o urbanización, y de conocer las relaciones de uso entre las diferentes zonas. El trabajo realizado ha cumplido los objetivos utilizando la metodología de zonificación agroecológica establecida por la FAO. Las condiciones resultantes han sido expresadas a través de mapas, lo que ha permitido una distribución espacial georeferenciada de la información disponible; se ha analizado la información climática y de ella se ha podido obtener parámetros de interés tales como duración del periodo de crecimiento, presentes en el Austro Ecuatoriano.

El estudio realizado indica que la única zona de vegetación natural en el Austro está ubicada en áreas de alta altitud cuyas condiciones físicas para la agricultura son marginales. Estas zonas deberán ser protegidas contra el uso indiscriminado; se deben cuidar fuertemente y no permitir, en ellas las invasiones. La reforestación es importante como parte del programa de protección contra la erosión. Las zonas de alto potencial agrícola también han sido perfectamente delimitadas.

### Palabras claves:

Zonificación Agroecológica, Planificación territorial, Relación Cuenca - Ciudad, Austro ecuatoriano.

### ABSTRACT

**I**n the present project we defined the "Austro ecuatoriano" as the Andes region between 2° 15' and 3° 30' South of the Republic of Ecuador. The region shows a large variability in physical conditions and is characterised by severe soil erosion problems. Consequences of the soil erosion are not only felt in the agricultural sector, but also in other domains. A typical example is the dam on the river Paute, which accounts for 70% of the Ecuadorian electricity production, and which is silting up at alarming rate.

The main objective of this study is to obtain a general overview of the physical conditions in the Austro, so that zones suitable for reforestation or investment in agricultural improvements can be demarcated. The objective is reached by using the FAO methodology of agro-ecological zoning. Soil conditions were mapped and climatic data were analysed so as to calculate the length of growing periods in the region.

The study indicates the only belt of natural vegetation remaining in the Austro is located in zones where physical conditions are marginal for agriculture (soils sensitive to erosion, dry or cold climates). These zones should be protected against further landclaims and reforested for protection against erosion. Zones of high agricultural potential were demarcated in order to accommodate the rapidly growing population in those areas of better physical endowment in terms of soil and climate.

\* Presentado en el Segundo Seminario-Taller sobre Modelos de Ecodesarrollo Cuenca-Ciudad con aplicación de enfoque sistémico y S.I.G., Abril 6-8, 1998, Cuenca, Ecuador.

<sup>1</sup> Programa para el Manejo del Agua y del Suelo - Universidad de Cuenca, Ecuador.

<sup>2</sup> Asociación Flamenca para la Cooperación al Desarrollo y Asistencia Técnica (VVOB), Bélgica.

<sup>3</sup> Institute of Land and Water Management - Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica.



## 1. INTRODUCCION

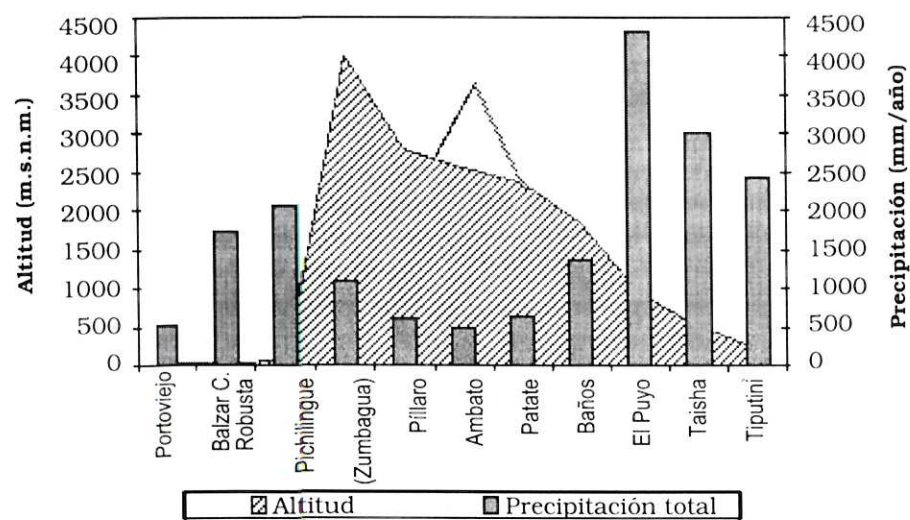
### 1.1. Caracterización general del Austro ecuatoriano

En el sur del Ecuador hay diferentes zonas climáticas, caracterizadas principalmente por su ubicación especial con respecto al nivel del mar (de 0 a 4.300 m s.n.m.). Estas variaciones de altitud traen como consecuencia una gran variedad de temperaturas y de precipitaciones. Un transecto practicado con dirección Oeste a Este refleja esta variedad; en este (figura 1), se ha colocado la altitud con respecto al nivel del mar y la precipitación anual registrada en algunas estaciones meteorológicas típicas. Un análisis del referido transecto indica que la precipitación total se incrementa de Oeste a Este en la Costa, lo cual se explicaría por la presencia de las lluvias orográficas en las inmediaciones de la cordillera occidental. El mismo fenómeno se puede observar en el flanco oriental de la cordillera central, lo cual se atribuye a las lluvias originadas en la Amazonía. La precipitación total en la parte oriental es más alta que en la Costa debido a la presencia de la corriente fría de Humboldt que corre a lo largo de esta. La Sierra es claramente

más seca acentuándose este fenómeno en las vertientes secas de las 2 cordilleras.

Tan importante como la precipitación total es la distribución de la precipitación durante el año. En el Este del país, denominado Oriente, predomina un clima cálido, tropical y siempre húmedo. El régimen de precipitación en esta zona se determina por la ubicación dentro la zona de la convergencia intertropical, lo cual significa una evapotranspiración alta, una presión atmosférica baja y mucha precipitación durante todo el año, con un máximo en julio. En el Oeste del país, la Costa, en cambio se diferencia una estación húmeda y seca por la influencia de la corriente fría de Humboldt durante la mayor parte del año y la presencia de agua caliente en el Océano Pacífico frente a la costa ecuatoriana desde enero hasta mayo, cuando se registran precipitaciones de enero a mayo. El clima en la Sierra es muy variado, pues depende de la altitud, de la influencia de la Costa o del Oriente y de la posible ubicación en una zona de vertiente seca de montaña. La mayoría de las veces las precipitaciones se producen con dos máximos, en abril y en octubre.

**Figura 1: La Precipitación según la Línea Geográfica: Portoviejo (Costa) - Ambato (Sierra) - El Puyo y Tiputini (Oriente) (FAO, 1992)**



## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. Zonificación agroecológica

Se define como zonas agroecológicas aquellas áreas en las cuales el clima, la fisiografía y el patrón del suelo tienen un comportamiento más o menos uniforme. Las zonas agroecológicas fueron delimitadas manualmente, tomando en cuenta la información climatológica y edafológica, bajo la forma de mapas, utilizando la metodología de la zonificación agroecológica de la FAO (FAO, 1981). Se elaboró el estudio a una escala de 1/200.000, la cual se usa generalmente para la exploración y caracterización general de una zona (Dent et al., 1981). La idea de las zonas agroecológicas no fue obtener zonas con una sola unidad de suelo, sino un patrón de suelos cuyas diferentes unidades aparecen en lugares similares del paisaje de esta zona.

Las zonas se limitaron manualmente de modo que no se podía evitar algún grado de subjetividad. Se pudo haberlas limitado con la computadora, lo que parece más objetivo, pero de esta manera se forman algunas celdas artificiales en las cuales los límites no tienen un significado físico. Además, se pierde la vista general por la abundancia de detalles (De Pauw, 1988).

### 2.2. Información climatológica

Para el estudio del clima y la elaboración de mapas, se utilizaron datos de estaciones climatológicas ubicadas en la zona. Los datos son de INECEL (1990) e INAMHI (1980) y en algunos casos particulares recopilados por los autores. Los datos utilizados de las estaciones climatológicas son: precipitación, horas de sol, humedad relativa y velocidad del viento. Se trata siempre de valores promedios en un período largo (promedio de 23 años).

La zona de estudio, "Austro ecuatoriano", ocupa unos 8000 km<sup>2</sup> en la Sierra Sur del Ecuador. En la parte norte y sur del Austro los ríos Cañar y Jubones van hacia el Océano Pacífico. En el centro de la zona el Río Paute drena hacia la Amazonía. La elevación varía de 600 m s.n.m. en la cuenca baja del río Cañar hasta 4300 m s.n.m. en el Parque Nacional del Cajas.

Los cultivos más importantes en el Austro son maíz, trigo, fréjol, habas, papas, legumbres y fruta; cuya producción es generalmente más baja que el promedio nacional. Agricultura en minifundios con alta pendientes, suelos vulnerables a erosión, y técnicas de cultivo menos apropiadas han causado una erosión alta: mediciones sugieren pérdidas de suelos de terreno cultivable de alrededor de 40 hasta 100 toneladas ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

Las consecuencias de la erosión de suelos no están limitadas hacia el sector agrícola. La cuenca del río Paute provee la mayoría de la producción de energía a nivel nacional, pero el embalse de la planta hidroeléctrica recibe ingentes cantidades de sedimentos. Después 10 años, ya ha perdido 16% de su volumen utilizable y modelos predicen que va a llenarse con sedimentos dentro de 22 años cuando no se toman medidas de conservación de suelos. Por lo cual, la reducción de erosión de suelos es una prioridad para el gobierno nacional.

### 1.2. Objetivos

El objetivo principal del presente estudio es tener una visión general de las condiciones físicas del Austro ecuatoriano, con el propósito de definir zonas aptas para las inversiones en mejoramiento agrícola, reforestación, conservación natural o urbanización, y de conocer las relaciones de uso entre las diferentes zonas.

De cada parámetro climatológico se elaboraron mapas con los promedios mensuales, en los cuales se interpolaron los datos a mano, tomando en cuenta la topografía de la zona de estudio, de lo cual se obtuvo un mapa de isolíneas de cada parámetro climatológico por mes. Después de la digitalización, estos mapas se expresaron por medio de celdas (raster) y se utilizó el SIG (Sistema de Información Geográfica) IDRISI para calcular la ETo de cada celda con la fórmula de Penman-Monteith (Allen et al., 1994).

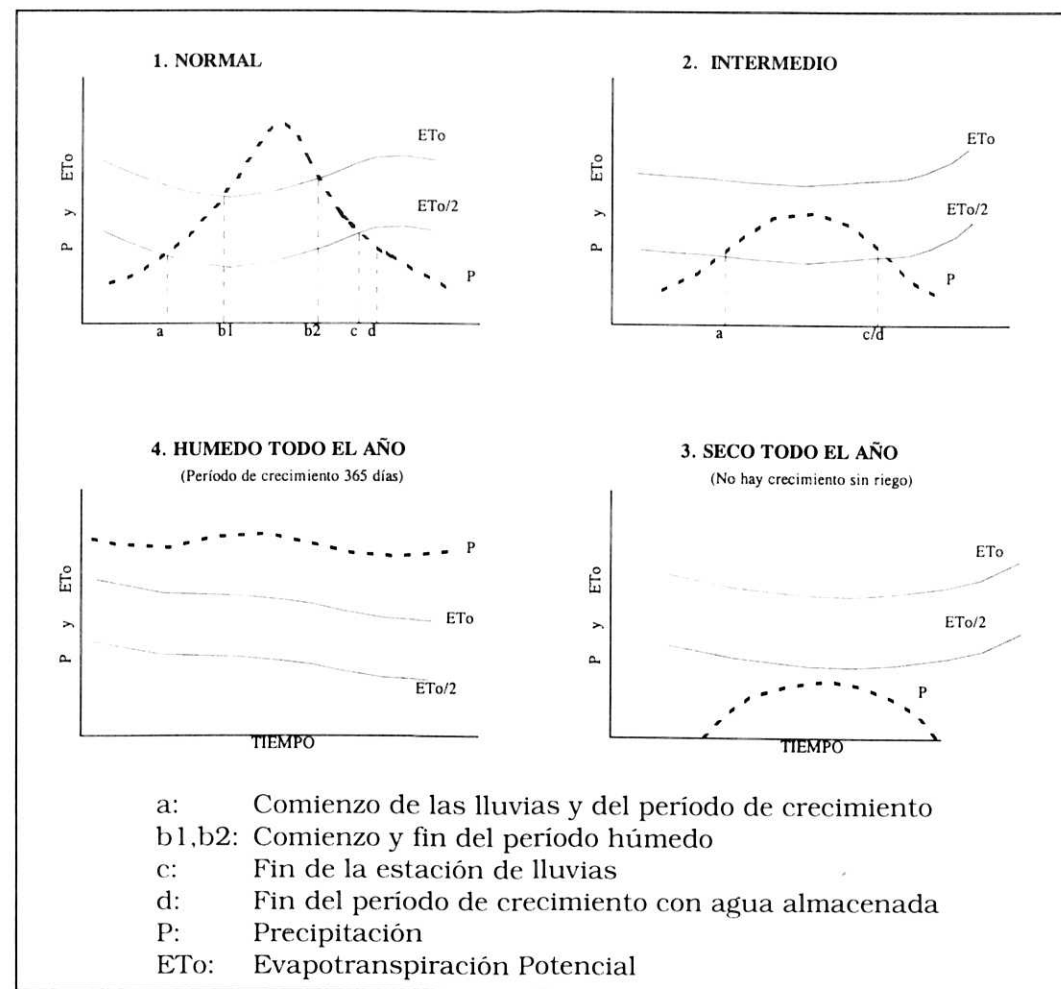
Mediante la superposición del mapa de ETo al mapa de precipitación se calculó en la computadora la duración

del periodo de crecimiento en cada celda. El mapa resultante -es el del periodo de crecimiento- se utilizó para determinar las zonas agroecológicas.

La duración del periodo de crecimiento se define como el periodo en días, en el cual la precipitación está por encima de la mitad de la evapotranspiración potencial, más un periodo necesario para la evaporación de 100 mm de precipitación almacenada en el suelo (FAO, 1978).

Se pueden distinguir tipos de periodos de crecimiento, los que su vez permiten a la FAO clasificar el clima (ver figura 2).

**Figura 2: Esquema de diferentes tipos de periodos de crecimiento (FAO, 1978)**



La estación de crecimiento más frecuente es la intermedia, razón por la cual se hizo una simplificación, y para el cálculo de la duración del periodo de crecimiento no se tomó en cuenta el agua almacenada en el suelo.

Una primera división en zonas agroecológicas se obtuvo considerando las zonas termales (sus fronteras forman también límites de zonas agrícolas respectivas) porque estas son determinantes para el tipo de cultivo. Luego las zonas con temperatura promedio superior a 6.5° C se subdividen tomando en cuenta los mapas de suelos y los de régimen de humedad para obtener de esta manera subzonas de iguales características. En cambio, las zonas con temperatura inferior a 6.5° C, que pertenecen a los trópicos fríos, no se subdividen porque no son aptos para la agricultura.

**2.3. Información edafológica**

El mapa de suelos existente del Austro ecuatoriano (PRONAREG, 1984) utiliza el sistema de clasificación "Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff, 1975), lo cual no es muy apropiado para la zonificación agroecológica debido al uso irregular de los parámetros climáticos en los nombres de los suelos en el mapa existente.

En el presente trabajo se tomó la decisión de utilizar la información climatológica independiente de las estacio-

nes meteorológicas y se transformó el mapa de suelos actual en un mapa según la taxonomía de la FAO-UNESCO y de la "Fertility Capability Classification (FCC)" (Sánchez, 1982) a través del sistema de información geográfica ArcInfo. El sistema de la FCC caracteriza las limitaciones de los suelos en cuanto a su fertilidad, lo que es importante para la determinación del uso potencial de las tierras.

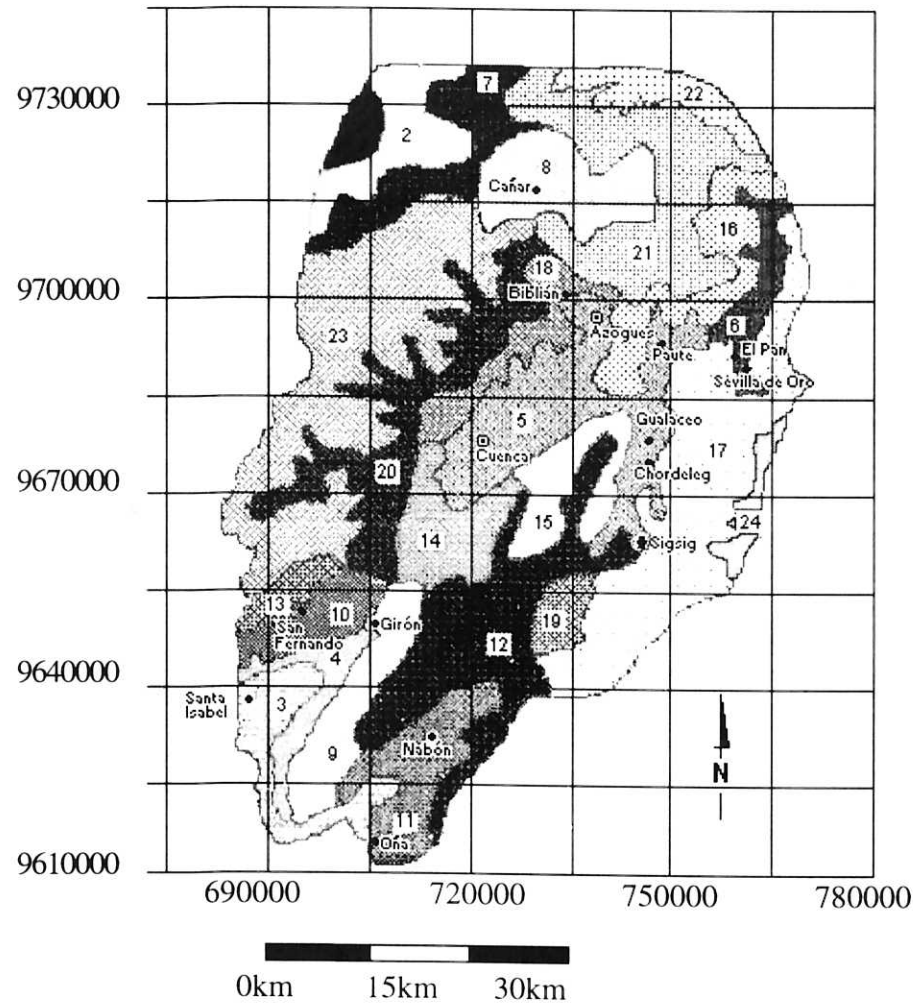
El proceso de traducción comprende la comparación de las leyendas de suelos del PRONAREG, con las definiciones de las unidades edáficas según la leyenda de la FAO-UNESCO; esta comparación se complementa con las descripciones de perfiles disponibles, con los análisis de suelos practicados en la zona de estudio y con observaciones de campo directas, basadas en sondeos y en la interpretación de perfiles.

**3. RESULTADOS Y DISCUSION**

**3.1. Zonificación agroecológica**

El resultado de este proceso es la división del Austro ecuatoriano en 24 zonas agroecológicas, indicadas en la figura 3. En la tabla 1 se encuentra la descripción de las zonas en cuanto al rango de altitud, zona termal, duración del periodo de crecimiento, tipo de suelos, limitaciones de los suelos y uso de las tierras.

**Figura 3: Zonificación agroecológica del Austro ecuatoriano (Dercon et al., 1998)**



**Tabla 1: Cuadro Sinóptico de las 24 zonas agroecológicas del Austro ecuatoriano (Dercon et al., 1998)**

ZONA	Rango de Altitud m s.n.m.	Ubicación y régimen de humedad	Zona Termal	Duración del período de crecimiento (meses)	Suelo Dominante (FAO)	Limitantes F C C	Uso del suelo
1	600-1500	C,c	TC	6-7	8	2,3y6	2
2	1500-2400	C,c	TMF	6-8	1y4	2	2
3	1000-1800 o 2400	J,c	TMF	2-5	10	1,2y7	1
4	1600-2200	J,c	TMF	6-8	1y3	1,2y4	2
5	2200-2600	P,s	TMF	8-10	3,1y7	4	5
6	2000-2500	P,o	TMF	12	6y7	2,3y4	5
7	2400-3200	C,c	TF	7-10	4,2y5	1,2y5	4
8	2400-3200	C,s	TF	8-9	3,4y6	4	4
9	2200-3000	J,c	TF	6-8	4		3y4
10	2000-2800	J,c	TF	9-10	4y6	3	3
11	2400-3000	J,c	TF	8-10	1y7	1,2y4	4
12	3000-3400	J,s	TF	8-10	6y5	3y5	1y3
13	2800-3600	J,c	TF	10	5	3y5	1
14	2600-3000	P,s	TF	9-10	3,1y7	4	3
15	2600-3000	P,s	TF	9-10	6,7y4	4y3	3y5
16	2600-3000	P,o	TF	11-12	6,7y1	3y4	1y3
17	2600-3600	P,o	TF	11-12	6y5	3y5	1
18	2600-3000	P,s	TF	11-12	4y7	4	5
19	2600-3200	P,s	TF	11-12	4y7	3y4	3
20	3000-3600	P,s	TF	10-12	4y5	3y5	1
21	3000 o 3600-4000	C,P,o	TF	10-12	5	3y5	1
22	> 3600 o 4000	C,P,s	TFR	10-12	5	3y5	1
23	> 3600 o 3200	C,P,s	TFR	12	5	3y5	1
24	> 3600	P,s	TFR	12	9	6	1

**SUELOS**

1. Dystric Leptosol-Dystric Regosol
2. Umbric Leptosol-Umbric Regosol
3. Eutric Vertisol
4. Phaeozem-Haplic Luvisol-Eutric Cambisol
5. Vitric Andosol
6. Dystric Cambisol-Dystric Luvisol
7. Vértic Luvisol-Vertic Cambisol
8. Chromic Luvisol-Ferralic Cambisol
9. Fibric Histisol
10. Calcic Vertisol-Rendzic Leptosol-Calcaric Regosol

**USO DEL SUELO**

1. Cobertura nativa
2. Vegetación tropical
3. Ganadería, pastos naturales o artificiales
4. Cereales (trigo, cebada) - papas y otros tubérculos
5. Maíz

**LIMITACIONES DE LOS SUELOS**

1. R (capa no penetrable por las raíces).
2. ' (pedregosidad).
3. h (pH entre 5 y 6).
4. v (arcillas expansivas).
5. x (presencia de alófanos).
6. a (pH < 5).
7. b (presencia de CaCO<sub>3</sub>).

**UBICACION Y REGIMEN DE HUMEDAD**

- |         |                      |
|---------|----------------------|
| C,c     | Cañar Costa          |
| C,s     | Cañar Sierra         |
| P,s     | Paute Sierra         |
| P,o     | Paute Oriente        |
| J,s     | Jubones Sierra       |
| C, P, s | Cañar o Paute Sierra |
| J,c     | Jubones Costa        |

**ZONAS TERMALES**

- TC: Trópicos cálidos  
 TMF: Trópicos moderadamente frescos  
 TF: Trópicos frescos  
 TFR: Trópicos fríos

La zona de estudio se sitúa en los trópicos y la temperatura promedio mensual, siempre relacionada con el nivel del mar, es siempre superior a los 18°C. Dentro de la zona se pueden distinguir los trópicos cálidos, moderadamente frescos, frescos y fríos. Su distribución depende de la altitud y de la cuenca en la cual se ubican.

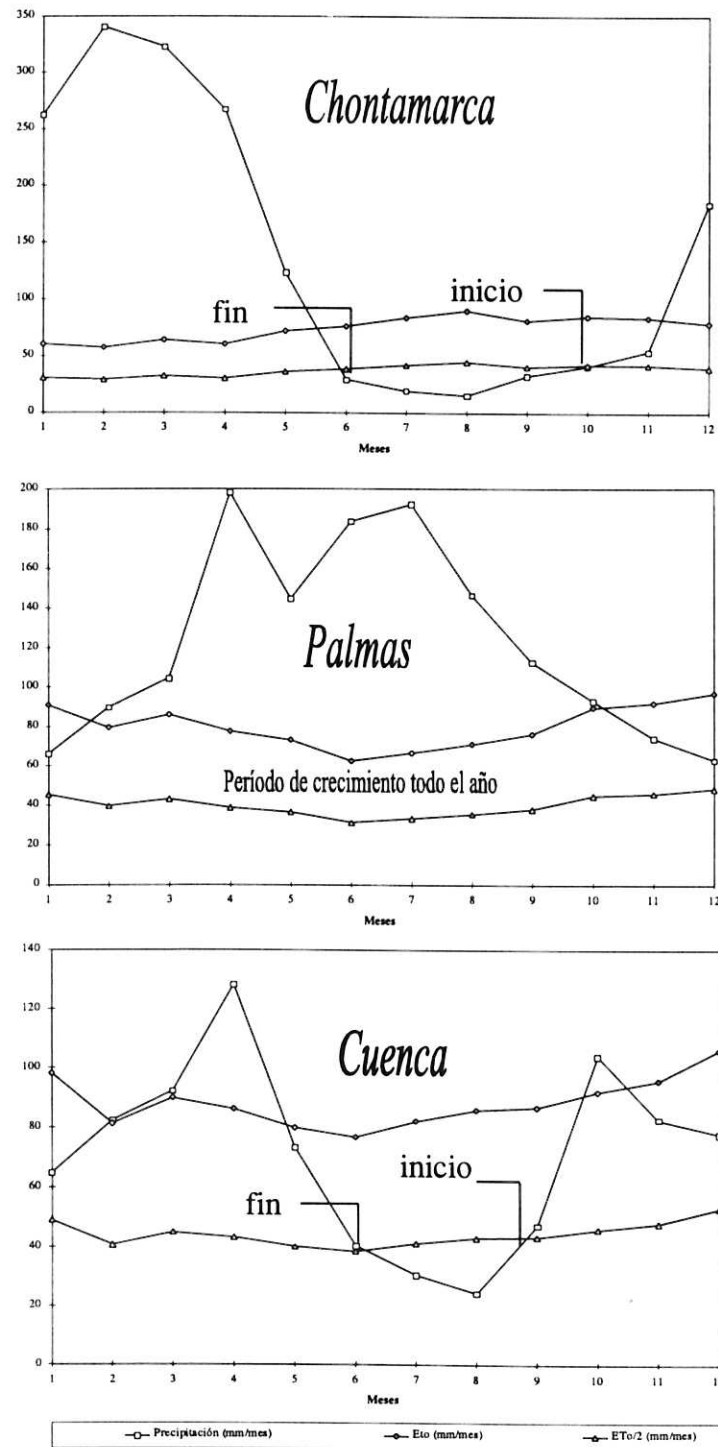
Existen contrastes climáticos importantes en el Austro (Figura 4). Las

partes bajas de las cuencas dirigidas hacia la costa como ella del río Cañar y Jubones tienen un patrón de precipitación de costa con una precipitación máxima en el mes de febrero (Chontamarca). La cuenca del río Paute, cual está influenciada en la parte baja por la Amazonia, tiene en el este (Palmas) un clima permanentemente húmedo. En el centro del Austro, existe un régimen de precipitación bimodal (Cuenca).

La traducción del mapa de suelos en la leyenda de la FAO-UNESCO resultó en un mapa con 20 diferentes asociaciones edáficas. El sistema de la Fertility Capability Classification (FCC) indica

que las limitaciones más importantes de los suelos en la región son pedregosidad, acidez, presencia de alófanas y arcillas expansivas.

**Figura 4: Precipitación y ETo (mm.mes<sup>-1</sup>) de 3 estaciones meteorológicas representativas en el Austro, duración del período de crecimiento (indicación del fin y del inicio) (Bossuyt et al., 1997)**



**3.2. Relación entre clima, suelo y uso de las tierras**

En cuanto a la relación entre el clima, el suelo y su uso en las 24 zonas agroecológicas algunas tendencias son claras, aunque el clima no sea el único factor de pedogénesis y las características del material parental jueguen un papel importante en la determinación del suelo.

Algunos tipos de suelos están claramente vinculados a las circunstancias climatológicas. El Rendzic Leptosol, el Calcaric Regosol y el Calcic Vertisol solo se encuentran en zonas en las cuales la estación de crecimiento no alcanza los 6 meses. Un periodo de crecimiento más largo causa una lixiviación de CaCO<sub>3</sub>. Los suelos fuertemente meteorizados, como los Chromic Luvisols y Ferralic Cambisols, aparecen en zonas que están a menos de 1200 m s.n.m. y tienen un periodo de crecimiento de 6 hasta 7 meses. Están usados para cultivos tropicales, principalmente caña de azúcar.

La mayoría de los suelos se presentan en zonas amplias que están vinculados a fronteras climatológicas. Los Vitric Andosols se encuentran en altitudes superiores a los 3200 m s.n.m.. Aunque no hubiera erupciones volcánicas recientes, el frío de las altitudes altas mantuvo los Andosols como se depositaron. A veces están cultivados con papas o trigo pero la mayoría de las veces están bajo pastos naturales o vegetación natural.

Los Eutric Vertisols aparecen en un amplio rango de temperaturas, de 1600 hasta 3200 m s.n.m., y con una estación de crecimiento de 6 a 10 meses. Cuando el clima es muy seco o muy húmedo, ya no se da la alternancia entre estación seca y una estación húmeda, necesaria para la neofor-

mación de smectitas. Los cultivos que se dan, son papas o trigo en las altitudes mayores, y maíz, legumbres o fruta en las partes más bajas. Los Vertic Luvisols tienen las características de las arcillas expansivas aunque menos notorias y pueden aparecer en zonas cuyo periodo de crecimiento es de 12 meses.

Los Haplic Luvisols, Eutric Cambisols y Haplic y Luvic Phaeozems pueden encontrarse en toda la zona de estudio. Su distribución sobre la zona está determinada principalmente por el material parental y la topografía. Son buenos suelos para pasto pero son muy vulnerables a erosión cuando están bajo cultivo. También los Leptosols y los Regosols aparecen en toda la zona, sobre todo en las pendientes fuertes. Los Umbric Leptosols y los Umbric Regosols están vinculados con la zona sobre los 2800 m.s.n.m., porque la temperatura relativamente baja es necesaria para la acumulación de materia orgánica. Por lo general se encuentran bajo vegetación natural o bosque.

Los Dystric Cambisols y Luvisols están determinados no tanto por la temperatura, sino principalmente por la duración del periodo de crecimiento, que supera los siete meses, necesario para que la lixiviación de los elementos sea suficiente y la saturación de bases inferior al 50%.

En toda la zona se presentan como limitantes para el cultivo, por un lado, una capa no penetrable por las raíces que se encuentra a menos de cincuenta centímetros de profundidad; por otra, la pedregosidad. Estos dos factores limitantes obedecen a la topografía. Otra restricción constituye el pH inferior a 6 que se encuentra en zonas con un periodo de crecimiento de más de 7 meses, las cuales coinciden con la

distribución de los Dystric Cambisols y Luvisols. Arcillas expansivas se presentan en la zona comprendida entre los 1800 y los 3000 m s.n.m., la misma que tiene un período de crecimiento de más de 5 meses. Los suelos dominados por alófanos se encuentran sobre los 2800 m s.n.m. Esta zona es más baja que la de los Andes porque estos se encuentran sobre los Umbric Leptosols y Regosols, que contienen alófanos.

**3.3. Zonificación agroecológica: La base para la planificación territorial de la región**

En el Austro existe una presión poblacional alta en las zonas de gran potencial agrícola como hay el ejemplo de los alrededores de las ciudades de Cuenca y Azogues. Allí se deberá acomodar a la población rápidamente creciente a través de un plan de urbanización moderno. Pero dado las necesidades, como el agua potable, la seguridad alimentaria y la recreación, de estos centros urbanos existentes y nuevos es también indispensable asegurarse de zonas netamente agrícolas y protectoras donde la urbanización está controlada, limitada o prohibida. Invasiones en estas zonas no solo ponen en peligro el abastecimiento de las necesidades de la población urbana, pero cambian las características de las cuencas hidrográficas con algunas consecuencias muy graves, como inundaciones en las ciudades y pueblos aguas abajo.

Una herramienta para poder distinguir zonas urbanas de zonas agrícolas, recreacionales o protectoras en base de criterios técnicos y científicos, es la zonificación agroecológica.

Un ejemplo del uso de la zonificación en cuanto a la planificación territorial es la toposecuencia desde el valle de la ciudad de Cuenca hacia el parque

nacional de Cajas en el páramo (figura 5). Esta toposecuencia, ubicada en la subcuenca del río Tomebamba, comprende 4 zonas agroecológicas (ZAE) (5-18-20-23) de 2560 m s.n.m. hasta 4300 m s.n.m.

La ZAE 5 (2200-2600 m s.n.m.) fue una zona de alta potencial agrícola pero su función urbana es ahora más importante que ella de la agricultura. Se tiene que concentrarse en la ZAE 5 en un plan de urbanización moderna.

La ZAE 18 (2600-3000 m s.n.m.), San Joaquín - Sayausi, una zona tradicionalmente hortícola de primera, está caracterizada por la amenaza de las villas que formarán poco a poco de esta ZAE un barrio residencial de la ciudad de Cuenca, cuando no se la protege enseguida. Es importante que se trate de limitar en lo posible en este sector las urbanizaciones lo más posible a zonas de menor potencial hortícola.

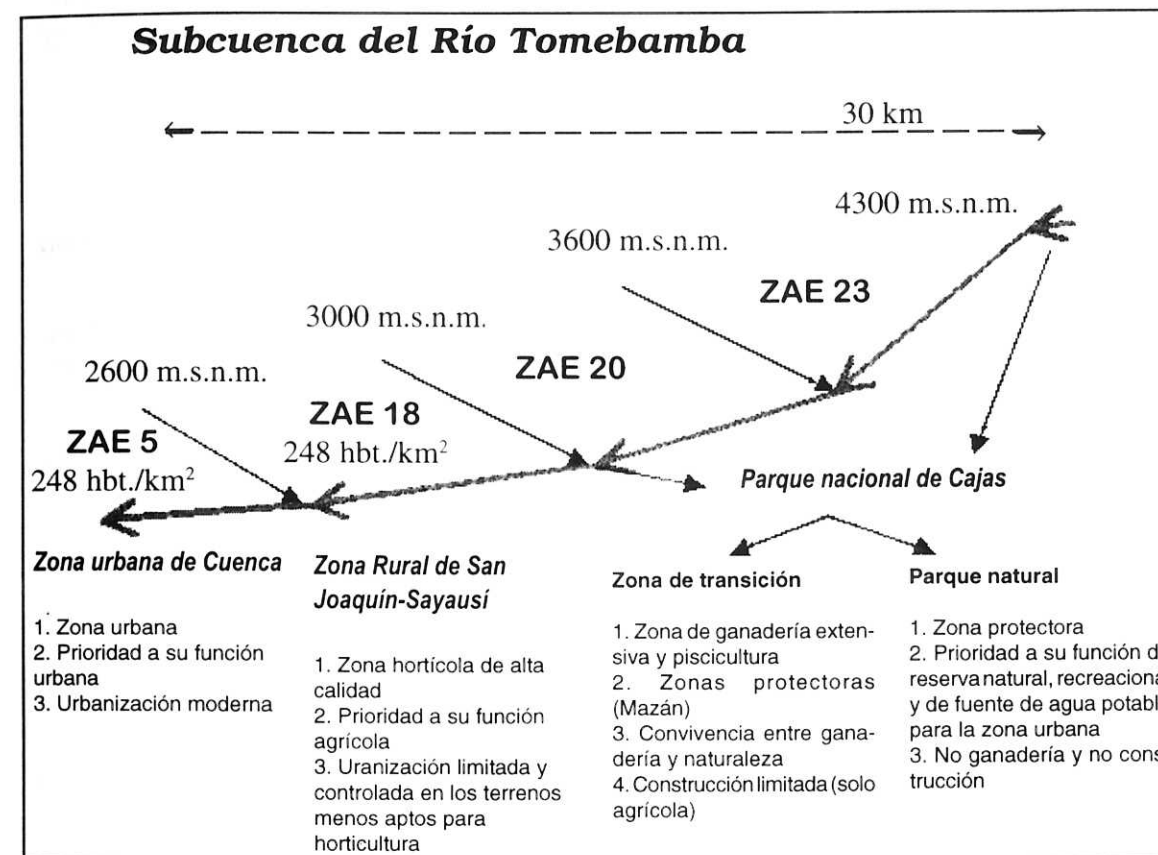
La ZAE 20 (3000-3600 m s.n.m.) forma el área de transición entre la zona agropecuaria de San Joaquín - Sayausi y el parque nacional de Cajas con algunas partes de alta importancia por su biodiversidad como por ejemplo la reserva natural de Mazán. En esta ZAE es recomendable llegar a una convivencia entre la ganadería y la naturaleza en cual se evita la deforestación, solo se aceptan construcciones agrícolas del estilo típico del Austro y existe una ganadería extensiva para proteger el río de Tomebamba y sus afluentes de la contaminación. Esta misma agua sirve como agua potable y fuente para la piscicultura.

Como última zona agroecológica en la toposecuencia indicada existe la ZAE 23 (>3600 m s.n.m.), o la zona núcleo del parque nacional de Cajas. Esta zona protectora forma la reserva principal de agua potable para la ciudad de

Cuenca gracias a sus centenares de lagunas y es al mismo tiempo un área recreacional de mucho atractivo para los habitantes de Cuenca y los turistas

nacionales y extranjeros. Es indispensable impedir la ganadería, la tala ilegal y construcciones turísticas.

**Figura 5: Toposecuencia de las zonas agroecológicas 5-18-20-23**



**4. CONCLUSIONES**

La Sierra Andina del Austro está caracterizada por una heterogeneidad alta en cuanto a sus condiciones físicas, lo que causa al mismo tiempo un patrón de usos muy diverso. Para que se convivan los diferentes usos de una manera sustentable, es indispensable de disponer de un instrumento como la zonificación agroecológica. A través de la zonificación no solo se conocen las características del Austro, pero se puede estimar mejor la capacidad portante de las zonas agroecológicas y se indica la importancia de cada una de ellas como área agrícola, protectora o fuente para agua potable o riego. Una

vez conocida las funciones y la capacidad portante de los diferentes agroecosistemas se puede planificar en base de criterios técnicos y científicos la ubicación de nuevas urbanizaciones de las ciudades y comunidades.

Completándola con datos socioeconómicos, por ejemplo el grado de pobreza, la densidad poblacional y la migración, la zonificación agroecológica deja también entender mejor las relaciones entre el espacio físico y su población, y vuelve así un instrumento de planificación para un grupo interdisciplinario de instituciones estatales y privadas.

La zonificación no es estática pero tiene que ser validada y mejorada todo el tiempo, porque el espacio físico y su población forman entre ellos un ente dinámico.

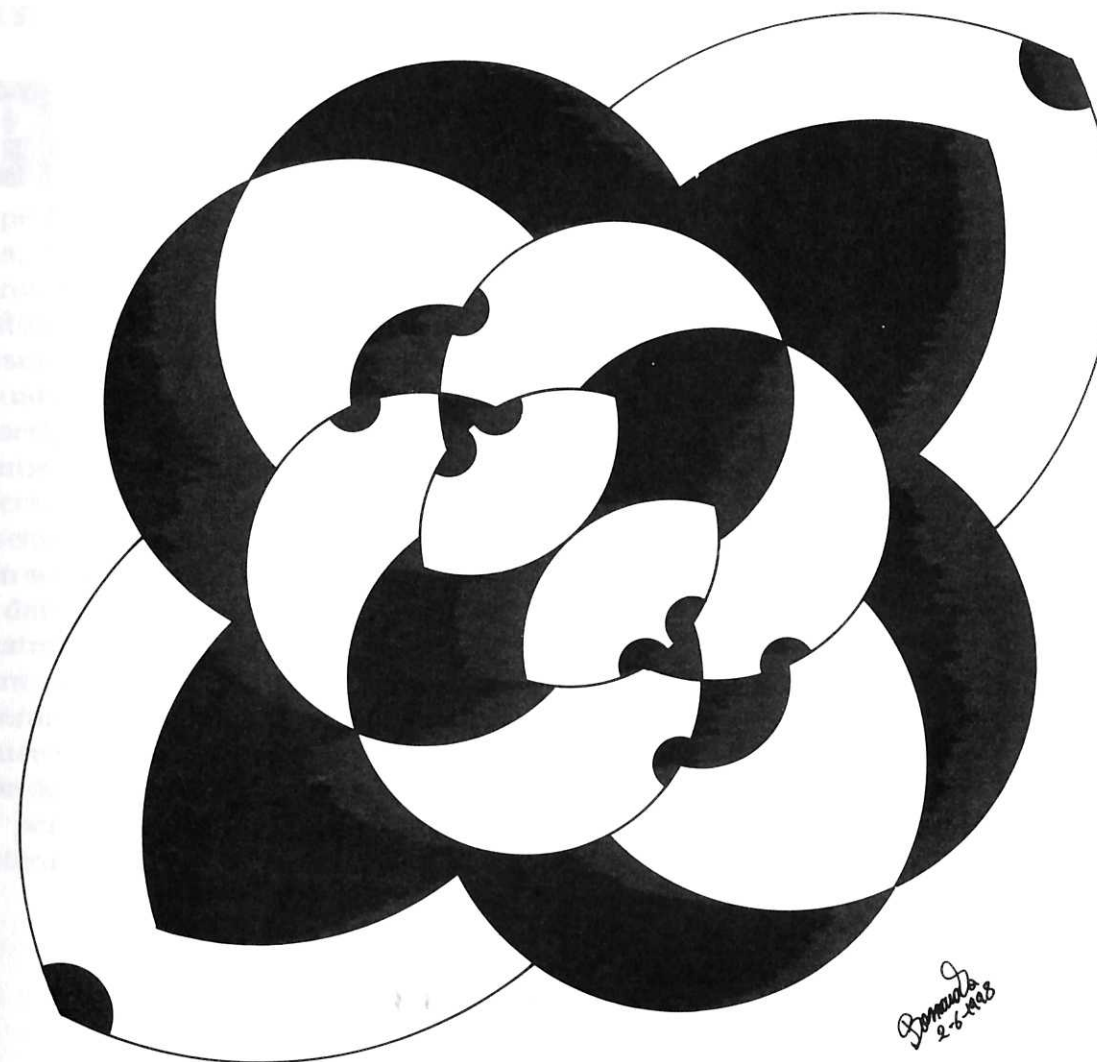
#### AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a todo el equipo del Programa para el Manejo del Agua

y del Suelo de la Universidad de Cuenca que ayudó a lograr la zonificación agroecológica del Austro ecuatoriano. También expresamos nuestro agradecimiento al Institute of Land and Water Management de la Katholieke Universiteit Leuven y a la Asociación Flamenca para la Cooperación al Desarrollo y Asistencia Técnica (VVOB).

#### REFERENCIAS

- ALLEN R.G., SMITH M., PEREIRA L.S., PERRIERA., 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin Vol. 43 N° 2.
- BOSSUYT B., DERCON G., DE BIEVRE B., CISNEROS F., DECKERS J., 1997. Agroecological zoning of the Austro Ecuatoriano. Diagnostic planning for nature conservation and sustainable land use. The Land 1(3): 159-170.
- DENT D.L., YOUNG A., 1981. Soil survey and land evaluation. Geo Allen and Unwin, Londres.
- DE PAUWE., 1988. A summary of the agricultural ecology of Ethiopia, main report. FAO, Roma.
- DERCON G., BOSSUYT B., DE BIEVRE B., CISNEROS F., DECKERS J., 1998. La zonificación agroecológica del Austro ecuatoriano. 144pp. Universidad de Cuenca, Uediciones, Cuenca.
- FAO, 1978. Report on the agro-ecological zones project. Vol. 1. Methodology and results for Africa. Roma.
- FAO, 1981. Informe del proyecto de zonas agroecológicas, vol. 3, Metodología y resultados para América del Sur y Central, Roma.
- FAO, 1992. Datos hidrometeorológicos de America Latina. Roma.
- INAMHI (Instituto Nacional de meteorología y Hidrología), 1972-1989. Anuario meteorológico. Quito.
- INECEL (Instituto Ecuatoriano de electrificación), 1990. Datos meteorológicos de la cuenca del río Paute. Cuenca
- PRONAREG (Programa Nacional de Regionalización Agraria), 1984. Mapa de suelos Escala 1/200.000: hojas Cuenca, Cañar, Loja y Guayaquil. Quito.
- SANCHEZ, P. et al, 1982. The fertility capability soil classification system: application, applicability and modification. Geoderma 27. Elsevier Scientific Publishing Company Amsterdam.
- SOIL SURVEY STAFF, 1975. Soil Taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA SCS, Washington DC.





**SURDEV: UN SOFTWARE PARA DISEÑO, OPERACION Y EVALUACION DE RIEGO POR ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL EN LA PARCELA \***

FEYEN, J.<sup>1</sup>, R. JURRIËNS<sup>2</sup>, D. ZERIHUN<sup>1</sup>, H. BOONSTRA<sup>2</sup>, R. KSELIK<sup>2</sup>

---

SURDEV: A SOFTWARE PACKAGE FOR THE DESIGN, OPERATION AND EVALUATION OF ON-FARM SURFACE IRRIGATION

---

**RESUMEN**

**P**ara facilitar el diseño, la operación y la evaluación de sistemas de riego por escurrimiento superficial, como son el riego en piscinas, en fajas y en surcos, se desarrollaron recientemente tres paquetes de software, los que fueron unidos en un mismo ambiente amigable para el usuario. En este artículo se da una descripción de paquete SURDEV, que contiene el software para el diseño, operación y evaluación de riego en piscinas (BASDEV), en fajas (BORDEV) y en surcos (FURDEV). Adicionalmente se dan algunos ejemplos con el fin de ilustrar las cualidades del paquete para su uso en capacitación, diseño y operación. Finalmente, se demuestra el uso del software para la determinación de la relación entre los indicadores de performance y las variables del sistema.

**ABSTRACT**

To facilitate the design, operation and evaluation of surface irrigation systems, such as basins, borders and furrows, 3 software packages were recently developed and embedded in a comprehensive and user-friendly software environment. In this paper a brief description is given of the SURDEV package, containing the software for the design, operation and evaluation of basins (BASDEV), borders (BORDEV) and furrows (FURDEV). Further a number of sample problems are given to illustrate the power of the package for training, design and operation purposes. Finally, the use of the software package is demonstrated for the determination of the relationship between performance indicators and system variables.

---

\* Presentado en el Primer Taller Internacional de Riego y Drenaje, AGROMECA'98, 13-17 de julio, Habana, Cuba.

<sup>1</sup> Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium

<sup>2</sup> International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Wageningen, The Netherlands

### 1. Introduction

Surface irrigation is still the most widely used on-farm irrigation system. Although no precise data exist, it is estimated that surface irrigation covers about 80 to 90 % of the world's total irrigated area of about 260 million hectare, most of which is located in (sub)tropical developing countries. Surface systems in general, in particular when no land leveling is applied, are regarded as low cost, low performing systems. Poor performance is mainly due to low application efficiency, unequal distribution of water in the field, the application of either a too small or too large water depth at the wrong time and with a flow rate the farmer hardly can handle. Systems performance is not only the result of poor operation of the system, but can also be the consequence of an inappropriate design.

There is a wide variety of surface irrigation systems, but they all aim at supplying water to farmers' fields, a crucial input to crop production. Irrigation water must be supplied in the right quantity and at the right time, but it must also be spread evenly over the field in order to obtain a uniform crop stand and to minimize losses of water. Proper design and operation of irrigation at the field level can contribute substantially to achieving good crop yields, while the often-scattered water is being used efficiently and water logging and salinization are contained.

This paper starts from the hypothesis that water is delivered to the tertiary unit or field block in time and that the flow rate which can be taken from the supply ditch is equal to the calculated

flow rate to properly irrigate the basin, border or furrow. It is also assumed that basins are level, the borders and furrows have a uniform slope in the longitudinal direction, and zero cross-slope. Similarly, it is assumed that the inflow rate is constant, and when cut-back flow is applied that during the two stages of water off-take the water delivery is constant in time. In the software, that will be discussed in the following, it is also assumed that the fields have spatially homogeneous properties, i.e., the infiltration properties are the same in every point of the basin, border or furrow. Further it is assumed that the properties are constant in time, i.e., the soil roughness is not changing throughout the growing season. Of course if measured values of the roughness coefficient are available for different periods in the growing season, the software allows to use the different measured values of *n*, and verify the effect of a change in *n* on the systems performance, for example. It is evidently that the match between measured and calculated systems performance will be better, the more the field situation is approaching the more idealistic situation, as outlined above. Of course deviations between measured and simulated systems performance can also be due to the inappropriateness of the simulation model in describing accurately the irrigation processes. The software that is discussed in this paper is called SURDEV, that stands for SURface irrigation Design, operation and EVALuation. The package contains a module for the analysis of basins (BASDEV), borders (BORDEV) and furrows (FURDEV).

### 2. Theory

Till the seventies, the only design aids an irrigation engineer could resort to were a number of tables or simple formulae, which gave only rough guidelines. They can be found in Booher (1974), Jensen (1980), Kay (1986), and Cuenca (1989), among others. The origin of many of these older guidelines and tables is not entirely clear, but may relate to early fieldwork in the USA (see e.g., Criddle, 1949; Phelan and Criddle, 1955). Major disadvantages of most tables are that the infiltration characteristics are only included as broad indications of soil type, that flow resistance and target depth are mostly not mentioned, and that no information of resulting performance and required cut-off time is given. Gradually, the theoretical approaches became a bit more complex, but they still used simplifications of the processes, necessary to enable calculations to be done manually, via equations or graphs. Formulae that gained for all surface methods some acceptance can be found in Jensen (1980). They usual enable to calculate field length, the flow rate, or advance time, even cut-back for borders and furrows. In addition, these methods allow calculation of a limited number of performance indicators, such as field application efficiency (*E<sub>a</sub>*), water depth lost in runoff and deep percolation. The methods for the different surface irrigation systems described in Jensen are based on earlier work of the USDA (1974 and 1979).

The introduction of computers led gradually to the development of more complex mathematical formulations for mimicking the irrigation process in a basin, border or furrow. The solutions of the differential equations, describing the transfer of water at the

surface and in the soil, as water moves in the longitudinal direction of a basin, border or furrow, require advanced mathematical solution techniques. Hydraulically, the gradually and spatially varied unsteady open channel flow over a porous bed with a variable intake rate, which is typical for basins, borders and furrows, can be best described by a pair of first order-differential equations, the commonly known Saint-Venant equations (named after A.J.C. Barre de Saint-Venant).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \tag{Eq. 1}$$

$$\frac{\partial Q}{gA \partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A)}{qA \partial x} + \frac{\partial Y}{\partial x} + S_o = S_f \tag{Eq. 2}$$

These equations have been the basis for the development of many models for surface irrigation. They can, however, be classified into four major categories. Most complex and accurate are the full hydrodynamic models based on the complete equations for conservation of mass and momentum. Zero-inertia models are a slightly simplified version of the full equations. A third category comprises the kinematic-wave models, which use further simplifications and uniform flow assumptions. The fourth category concerns the simplest models, i.e., those involving the largest number of assumptions: they are based on the algebraic/geometrical solution of the temporally and spatially lumped mass conservation equation, commonly referred to as the volume-balance approach. The latter approach gradually evolved from simple to more complicated, both conceptually and numerically. Details on these methods can be found back in Bassett et al. (1980) and Walker and Skogerboe (1987).



BASDEV, being the module in SURDEV, used for the modeling of the irrigation process in basins, is based on the zero-inertia model. The rationale for the zero-inertia model is that in surface irrigation, the flow velocities are so low that their variations in time and space can be neglected and results are practically identical with those of the complete hydrodynamic model. The essence of the approach is that the acceleration and inertia terms (first two terms) in the momentum equation can be omitted, assuming that their contribution to the total change in momentum is negligible compared to the other terms, which is reasonable for small velocities. Equation 2 reduces to 3, which together with the mass equation (Eq. 1), is the zero-inertia model.

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = S_o - S_f \quad \text{Eq. 3}$$

Walker and Skogerboe (1987) described various field tests of the zero-inertia model, e.g., those of Clemmens and Fangmeier (1978), Walker and Skogerboe (1981), and Elliot et al. (1982) for furrows. They concluded that "its overall predictive capabilities indicate that the model is sound". BASDEV is a derivative of the zero-inertia model that enables robust and accurate solutions. The BASCAD program (Boonstra and Jurriëns, 1988) is a for-runner of the present BASDEV program.

BORDEV and FURDEV, the modules in SURDEV, for simulating the flow process in borders and furrows, are based on the volume-balance model, using the approach and techniques described by Walker and Skogerboe (1987). The volume-balance model (Lewis and Milne, 1938; Hall, 1956; Philip and Farrell, 1964; Wilke and

Smerdon, 1965; Hart et al., 1968; Levien and Souza, 1987; Walker and Skogerboe, 1987) consists of a spatially and temporally lumped form of the continuity equation and is applied primarily to the advance phase. In this equation it is assumed that the advance time obeys a power law and infiltration is a function of time only and is expressible using the modified Kostiakov-Lewis equation.

$$Q_o t_{co} = \int A(x,t) dx + \int Z_i(x,t) dx \quad \text{Eq. 4}$$

Equation 4 states that the inflow of water ( $Q_o \times t_{co}$ ) equals the surface storage (first integral) plus the infiltrated volume (second integral). Instead of using a uniform flow formula to solve the equation, use is made of some mathematical/geometrical technique to describe the surface and subsurface volumes of water during the advance phase. The advance curve is described using a power function of the form:

$$x = p t_x^r \quad \text{Eq. 5}$$

where  $t_x$  is the advance time for distance  $x$ , while  $p$  and  $r$  are empirical constants. This equation is used to define the time when infiltration at a certain distance  $x$  starts. The infiltration time in combination with the Kostiakov-Lewis infiltration enables to calculate the volume of water infiltrated during the advance phase. To calculate the surface volume, the average flow cross-section  $A$ , is often assumed to be constant and independent of distance and time, and is related to the inlet flow section  $A_o$ , by the surface shape factor  $s_y$  according to:

$$A = S_y A_o \quad \text{Eq. 6}$$

with

$$A_o = C_1 \left[ \frac{Qn}{(S_o)^{0.5}} \right]^{C_2} \quad \text{Eq. 7}$$

Equation 7 is a re-write of Manning's equation ( $Q = 1/n \times A \times R^{2/3} \times s^{1/2}$ ), using the geometrical parameters  $C_1$  and  $C_2$ . For borders and basins the latter two parameters can be reduced to simple values, for furrows they are more complicated (Walker and Skogerboe, 1987).

These equations can be solved in an iterative way using the Newton Raphson procedure (Walker and Skogerboe, 1987). The advance time is determining the beginning of the pounding phase, whereas the cut-off time the end. The cut-off time can be determined in the following two ways:

- the cut-off time is to be computed such that the minimum infiltrated amount,  $Z_{min}$ , is the required amount,  $Z_r$ , i.e., the storage efficiency,  $E_r = 100$  percent. What this means is that  $t_{co}$  is determined such that the minimum infiltrated amount occurs at the upstream or downstream end based on whether the advance time is smaller or greater than the difference between the recession time,  $t_{rec}$ , and the depletion time,  $t_{depl}$ ; and
- the cut-off time is specified by the user. In this situation it is then in most cases impossible to meet the criteria of  $E_r = 100$  percent, which makes iterative determination of recession and depletion times unnecessary. The time span of the pounding phase is then determined as the difference between the user specified cut-off time and the computed advance time.

The depletion and recession phase computation is rather rigorous. The basic procedure is the algebraic model proposed by Strelkoff and Katopodes (1977) for border strips, which have been modified by Ley (1978), Essafi (1983), and Levien and Souza (1987) for furrows.

According to Walker and Skogerboe (1987) the major advantage of the volume-balance model with respect to the zero-inertia and the kinematic-wave models lies in the fact that it allows:

- quick and reliable definition of infiltration rates over the length of the field;
- easy transfer of computation results to indications of uniformity and efficiency parameters;
- a less cumbersome and easy implementation of the numerical solution of the governing equations; and
- an easy extension of the software's from conditions of fixed flow towards cut-back flow and tailwater reuse are rather simple to be made.

### 3. The SURDEV software

SURDEV stands for surface irrigation design, operation and evaluation. The software consists of three modules, containing a simulation model for basin, border and furrow irrigation, respectively. The basic output of the software, independently if it is the analysis of a basin, a border or a furrow, is the distance - elapsed time diagram of the irrigation cycle, showing the advance and the recession curve and providing the opportunity time ( $t_o$ ), during which infiltration of water occurs. The distance - elapsed time diagram using the infiltration equation is transformed in the distance - infiltrated water depth curve. The information in both curves, in combination with the inflow rate, is used to calculate the different performance terms. The software has been designed in such a way that it can be used for making a design and deriving operation rules, and for making the evaluation of existing surface irrigation systems.

SURDEV is simple a shell to assist the user in going from one surface irrigation type to another. The three irrigation modules, BASDEV, BORDEV and FURDEV can run independently. They are identically structured and operate to a very high degree in a similar way. The programs are written for IBM PC's and their compatibles with at least 360 Kbytes of memory operating under MS-DOS environment, Ver. 4.0 and latter releases. Hardware features like graphic adapter and mathematical co-processor are needed to make full use of the package. The BASDEV module is different from the BORDEV and FURDEV modules, because a different simulation model is used, but this goes almost without notice of the user. Further, in BASDEV only one operation mode exist, it is the mode with constant flow, whereas in the BORDEV and FURDEV modules, the user has the option between three operation modes: fixed flow, cut-back flow and tailwater reuse.

Other differences between the modules are in the choice of method to describe the infiltration characteristic of the soil. In BASDEV the user can choose between three different infiltration input modes. The default input mode for the infiltration is the modified SCS intake family (USDA, 1979), being the linearized curves of the SCS intake families between two depths using the Kostiakov equation. The other two infiltration modes are the time-rated families and the Kostiakov equation. The time-rated families are based on the time required to infiltrate 100 mm (Merriam and Clemmens, 1985). If the Kostiakov equation mode is used to characterize the infiltration, then the user has to specify a value for the infiltration parameters  $a$  and  $k$ . In BORDEV the user has the choice between two options to characterize the

infiltration characteristic of the soil, i.e., the modified SCS intake family and the Kostiakov-Lewis equation. The latter requires specification by the user of three parameters,  $a$ ,  $k$  and  $f_0$ . In FURDEV, the user can select between three different infiltration modes, the modified SCS intake family, the Kostiakov-Lewis equation, and in a third option the infiltration parameters are calculated by the software using the two-point method (Elliot and Walker, 1982), and field data as input.

The BASDEV and BORDEV programs do not have special arrangements for the characterization of the geometry of the cross-section, since in basin and border irrigation it is assumed that the cross-section is rectangular and that the water depth is small as compared to the basin or border width. However, in furrows the width of the cross-section is small, and often of the same dimension of the maximum water depth. Infiltration is generally considered as two-dimensional, and therefore, in FURDEV a special menu is foreseen, to allow the user to choose between four different options to characterize the cross-section. The user can choose between a triangular, parabolic or trapezoidal cross-section. FURDEV calculates the corresponding furrow geometry parameters  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $t_1$ , and  $t_2$ . The fourth option for the geometry is that the user defines a value for the four cross-sectional shape factors.

The most useful and unique feature of these programs, however, comes in the form of four different calculation modes in which the programs are designed to run. These four modes are structured in such a way that they emulate, yet automate, the manual design process. The design and operation approach, that governed the de-

sign of the structure of the three programs, was based on the notion that a design and operation scenario must be able to "maximize"  $E_a$ , given the system parameters, while maintaining the other two performance indices ( $E_r$  and  $DU$ ) above certain acceptable levels. The first two modes have capabilities to define an acceptable (BASDEV) or close to maximum (BORDEV and FURDEV) value for  $E_a$  with respect to flow rate and length. The third and fourth modes provide facilities to refine results obtained in modes 1 and 2 in such a way that they fit into local requirements.

The first three modes, independent from the type of surface irrigation considered, have in common that the calculated minimum infiltrated depth at the downstream end of the basin, border or furrow is always equal to the required depth, in other words no under-irrigation will occur. After having defined the calculation mode, the program brings the user automatically to the corresponding input screen, in which the user can enter site specific data. The program provides for each field of input a default value that can be modified by the user. If extreme values are given, outside the range of acceptable values, the program gives a warning.

In the first mode (FLOW RATE) the program calculates the flow rate required for irrigating a basin, border or furrow with a given dimension, so that for the given dimensions and other input variables an acceptable application efficiency is obtained. The second mode (DIMENSIONS) is the reverse of the first calculation mode. The flow rate is now given as input, and the approximate dimensions of basin, border or furrow are calculated, together

with the time of cut-off. The latter parameter is also calculated by the first calculation mode. Third mode (CUT-OFF TIME) and the fourth mode (MINIMUM DEPTH) were designed to refine the results obtained in the modes 1 and 2, and to define the system parameters resulting in the maximum application efficiency. In mode 3, the program calculates the time of cut-off knowing the dimensions and the flow rate of the irrigation system. The time of cut-off is an operation parameter. In the last calculation mode also the time of cut-off is input, in addition to the dimensions and the flow rate. On the basis of the input the infiltrated water depth at the end of the field is calculated and compared with the minimum required water depth. If the infiltrated depth is smaller than the required depth, the field will be partly under-irrigated. In this mode the length of under- and over-irrigation are specified, together with the primary performance indicators: application efficiency, storage efficiency and distribution uniformity.

For design purposes the user is recommended to start in mode 1 or 2, depending if the field length or the flow rate are given. However the user should continue in the modes 3 and 4 to optimize the application efficiency and to adjust flow rate, field length and time of cut-off to for the farmers manageable values. For operation, the user has to go successively through the modes 3 and 4, whereas for evaluation purposes the user can go directly to mode 4.

The input and output parameters will be discussed more at large when discussing the different sample problems in section 4. Table 1 gives the range of values for the parameters used in BASDEV, BORDEV and FURDEV, re-

spectively. As one can observe the number of parameters is largest for FURDEV, and smallest for BASDEV. The acceptable range of parameter values for the three systems illustrates for which conditions the software calculates feasible solutions. The values of the parameters one can choose should be between a minimum

and maximum value, which has been chosen by the software developers, to avoid that the user chooses parameter values that would lead to unsolvable conditions. The range of values, chosen for each parameter, is wide enough and encompasses a wide range of field situations.

**Table 1: Range of feasible values for the parameters of the programs BASDEV, BORDEV and FURDEV**

Variable	BASDEV		BORDEV		FURDEV	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Intake family number (SCS)	0.10	4.00	0.05	2.00	0.05	2.00
Time-rated intake (min)	10	2000	-	-	-	-
a (-)	0.200	1.000	0.010	0.800	0.010	0.700
k (mm min <sup>-a</sup> )	0.800	45.00	0.050	50.00	0.067	40.00
f <sub>0</sub> (mm min <sup>-1</sup> )	-	-	0.005	30.00	0.007	13.33
T <sub>L</sub> (min)	-	-	-	-	5	1440
T <sub>L</sub> /2 (min)	-	-	-	-	5	500
Length (m)	5	800	50	500	50	700
Width (m)	5	500	1	250	0.50	1.50
Slope (m m <sup>-1</sup> )	-	-	0.0005	0.0500	0.0003	0.0300
Roughness coefficient (m <sup>1/6</sup> )	0.01	1.00	0.01	0.40	0.01	0.08
Z <sub>req</sub> (mm)	40	500	33	250	33	333
Inflow rate, Q <sub>0</sub> (l s <sup>-1</sup> )	5	600	1	250	0.02	16.67
Stable runoff (l s <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	0.002	2.500
Cut-off time (min)	10	800	10	2000	10	2000
Maximum velocity (m min <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	7.0	15.0
Triangular cross-section:	-	-	-	-	0.50	3.00
- side slope (m m <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	-	-
Parabolic cross-section:	-	-	-	-	0.01	0.25
- Y <sub>m</sub> (m)	-	-	-	-	0.20	1.00
- T <sub>m</sub> (m)	-	-	-	-	-	-
Trapezoidal cross-section:	-	-	-	-	0.50	3.00
- side slope (m m <sup>-1</sup> )	-	-	-	-	0.05	0.50
- bed width (m)	-	-	-	-	0.10	10.00
s <sub>1</sub> (m <sup>(2-s2)</sup> )	-	-	-	-	0.10	10.00
s <sub>2</sub> (-)	-	-	-	-	0.10	10.00
t <sub>1</sub> (m <sup>(1-t2)</sup> )	-	-	-	-	0.10	10.00
t <sub>2</sub> (-)	-	-	-	-	-	-

The programs have advanced developed user interfaces. Flexibility and user friendliness were the major factors considered in developing the user interface. The file management facility of the programs is not only capable of performing the routine operations of file saving and retrieving, it can also

create files in text and worksheet formats; moreover deleting undesirable file(s) and printing a selected file can be accomplished within each program. A most interesting feature for the storage of simulation results build in the programs is that the results of various runs can be appended in the same file.

The foregoing allows keeping track of the runs made. If desired, appended runs can be deleted. The user is free to select from a wide range of units to quantify the surface irrigation variables. Irrigation parameters, like infiltration and channel geometry, can be specified in different ways. Furthermore, the programs have online help facilities concerning the function of any menu command. In addition to the numerical output the programs provide a graphical display of the advance-recession trajectories as well as the final infiltration profile.

In the following section of this paper the use of the three program components of SURDEV are demonstrated for training, design, operation or management, and for illustrating the relationship between the performance indicators calculated by the software and the main system variables.

**4. Results and discussion**

To demonstrate the capacity of surface irrigation programs in the SURDEV software 4 sample problems are being analyzed in the following. The first example aims at illustrating the capacity of BASDEV as a training tool, although this program can be used as well for design, operation and evaluation. The second and third sample problems are chosen to demonstrate the capacity of the programs, BORDEV and FURDEV, for design and operation purposes. In the fourth sample problem, FURDEV is used, to demonstrate how with any of the three programs the relationship can be derived between the three major system variables (Q<sub>0</sub>, L and t<sub>co</sub>) and the performance indices. The sample problems are solved for given site conditions, and as such the results in each of the sample problems will be controlled by

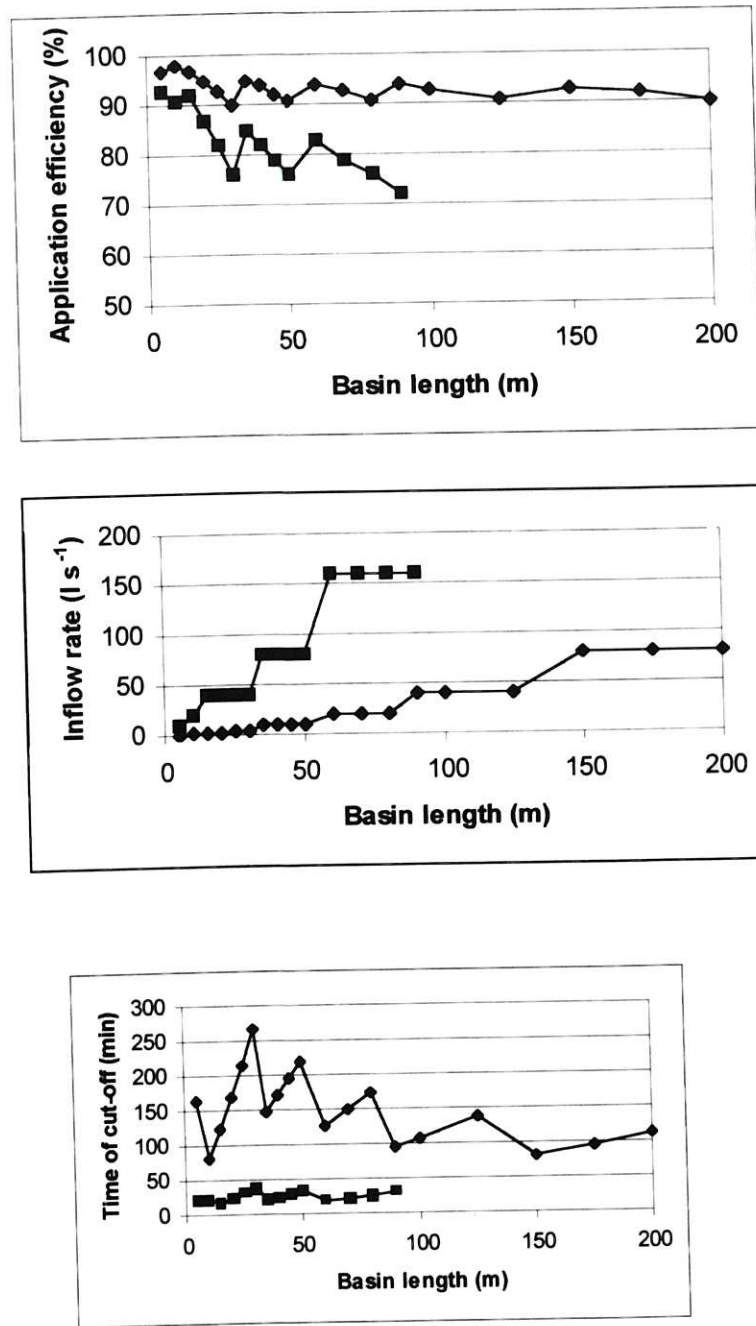
the value of the input parameters. Should one re-run the sample problems for other input data, i.e., for other field conditions, other results will be obtained. The objective of the sample problems, however, is to demonstrate the potential uses of the software SURDEV, independent from the value of the input parameters used.

**4.1. Use of BASDEV in a training context**

Teaching a surface irrigation class it is always rather difficult to demonstrate to students the dynamics of the different irrigation processes, and how the irrigation process for example is controlled by intake properties, or any other input parameter. In the following sample problem the aim was at characterizing the effect of soil and basin length on application efficiency (E<sub>a</sub>), time of cut-off (t<sub>co</sub>) and inflow rate (Q<sub>0</sub>).

For the analysis of this problem, the BASDEV program was run for a given set of input data, two different soil types and an increasing length of the basin. The length of the basin was varied between 5 and 200 meters (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125, 150, 175 and 200). The soil types chosen was a silty clay, clay loam (# intake family = 0.3) and a fine to medium sand (# intake family = 3). The other input parameters were kept constant and equal to: basin width = 30 m, required water depth = 80 mm, and flow resistance = 0.15. The BASDEV program was run in the calculation mode 1 to define the flow rate (Q<sub>0</sub>) and consequently in mode 3 for the determination of the time of cut-off (t<sub>co</sub>) and the corresponding maximum application efficiency (E<sub>a</sub>). The results of the analysis are summarized in Fig. 1.

**Fig. 1: Simulation results of the BASDEV program demonstrating the effect of intake family and basin length on application efficiency (top), time of cut-off (middle) and inflow rate (bottom), respectively**



For the fine textured soil BASDEV was able to produce a solution for all basin lengths tested. However, for the fine to medium sand the program could not find a solution for a basin length over 90 m. The foregoing is not due to the program. The combination of input parameters for the fine medium sand soil (# intake family = 3) makes that for basin lengths greater than 90 m not enough water reaches the downstream end of the basin to meet the required infiltration depth of 80 mm. From the top of Fig. 1 it becomes also clear that the  $E_a$  for the fine textured soil remains above 90%, and fluctuates between 90 and 98%. On the coarse textured soil, the application efficiency drops from 93 to 72%.

Every time when the program calculates an increase in flow rate, as the basin length increases, there is a temporarily increase in  $E_a$ . This increase can be explained by the fact that every time the flow rate increases, the advance curve will be smoother and the time of cut-off smaller. If the basin length further increases time of cut-off increases again and the application efficiency drops further, until a next increase in inflow rate. The inflow rate increases stepwise. Effects on the sandy soil are more pronounced as on the clayey soil, which is also logic. Figure 1 clearly illustrates the effect of intake family and basin length on  $E_a$ ,  $t_{co}$  and  $Q_0$ . Such a graph helps also in the design. Suppose that the length of the basin is known, one can derive directly from this graph, as a function of the infiltration characteristics the required inflow rate and time of cut-off, corresponding a given  $E_a$ . Suppose that the basin length is 90 m,  $E_a$ ,  $t_{co}$  and  $Q_0$  for the basin on the sandy soil will be 72 %, 31 min and 160 l s<sup>-1</sup>, respectively, and for the clayey soil 94

%, 95 min and 40 l s<sup>-1</sup>. If the inflow rate available is rationed, Fig. 1 also enables to derive immediately the corresponding basin length, time of cut-off and application efficiency.

**4.2. Use of BORDEV and FURDEV in a design and operation context**

If the programs in SURDEV are used for design purposes, the user normally starts the program in the calculation mode 1 or 2, depending if the dimensions or the inflow rate are known. In sample problem 2 and 3, it is assumed that the border and furrow length is given, and that the corresponding flow rate has to be determined. After having run the BORDEV and FURDEV program in calculation mode 1, the program yields a value for the flow rate, the time of cut-off and the application efficiency, as well as many other output parameters (see Tables 2 and 3). Then we move to the calculation mode 3, to adjust the calculated flow rate to a realistic value, keeping all other input values the same. The simulation will yield a new value for the time of cut-off and application efficiency. The calculated time of cut-off can have any value, but often the calculated values do not correspond with a very realistic time. Therefore, the user can continue running the programs in the calculation mode 4, to adjust the value of the calculated time of cut-off to a more realistic value. Traditionally, we want to have the time of cut-off equal to a multiple of 30 to 60 minutes. In doing this, the program will calculate a new value for  $E_a$ , and the other output parameters. By adjusting the time of cut-off to a lower value most likely under-irrigation will occur over a fraction or the total length of the border or furrow. The length of under-irrigation will depend from the degree  $t_{co}$  is reduced.

The latter calculation yields information for the system operation, namely the time that the inflow of water in the basin, border or furrow has to be cut-off. Other information on operation be derived if both programs are run for another operation mode, i.e., for cut-back flow or tailwater reuse condition. It becomes more and more a tradition in border and furrow irrigation to reduce the inflow rate as soon as the water reaches the bottom end of the border or furrow. In doing so, the runoff losses are reduced. The flow rate after cut-back, should however be sufficiently large, to assure water flow over the entire length of the border and furrow. Another way in increasing the application efficiency is to collect the surface runoff water in a pond, and to pump this water again into the supply system. Reuse systems normally consist of collection ditches or diked areas at the lower end of a field, an open channel or pipe drain which directs the collected water to the storage area, and a means for returning the collected water to the same field or delivering it to a different field. Often the return/delivery system include a pump and a pipeline, or open channels. In the border design problem the results of the cut-back and tailwater reuse operation modes are presented in the 5<sup>th</sup> and 6<sup>th</sup> column of Table 2. Similarly, in Table 3, in the columns 5 and 6, the results of the furrow design analysis problem are given for the cut-back and tailwater reuse modes. The 7<sup>th</sup> column in Table 3 provides the simulation results of a combination between the operation mode tailwater reuse and a reduction in time of cut-off.

Table 2 gives the input and output parameters of the border sample problem, as well as the simulation results for the different runs with the BORDEV program. In total 5 runs were made, 3 runs with a constant inflow rate (code 1 for type of system), one run with a reduced inflow rate the moment the water reaches the bottom end of the border (code 2 for type of system), and one run with tailwater reuse (code 3 for type of system). The calculation modes used in each of those runs are indicated in the top section of the table. The input parameters used in the border sample problem, which were kept constant in the different runs, are border length = 150 m, border width = 20 m, required water depth = 100 mm, flow resistance = 0.15, bed slope 0.1 % and intake family number 0.5 (fine silty loam soil). The constant input parameters are presented in shaded areas in the 2<sup>nd</sup> column of Table 2. The flow rate calculated in mode 1 of the BORDEV program is 19.66 l s<sup>-1</sup>, the time of cut-off 402 min, and the application efficiency 63 %. Other output parameters calculated are: storage efficiency in percent (E<sub>r</sub>), uniformity coefficient in percent (UCC), distribution uniformity (DU), deep percolation ratio in percent (D<sub>p</sub>), runoff ratio in percent (R<sub>p</sub>), average infiltration depth in mm (Z<sub>a</sub>), maximum (Z<sub>max</sub>) and minimum (Z<sub>min</sub>) infiltration depth, surface runoff in water depth in mm (RO), over-irrigation in mm, under-irrigation in mm, advance time in min (t<sub>adv</sub>), depletion time in min (t<sub>depl</sub>), recession time in min (t<sub>rec</sub>), and average opportunity time in min (t<sub>o.a</sub>).

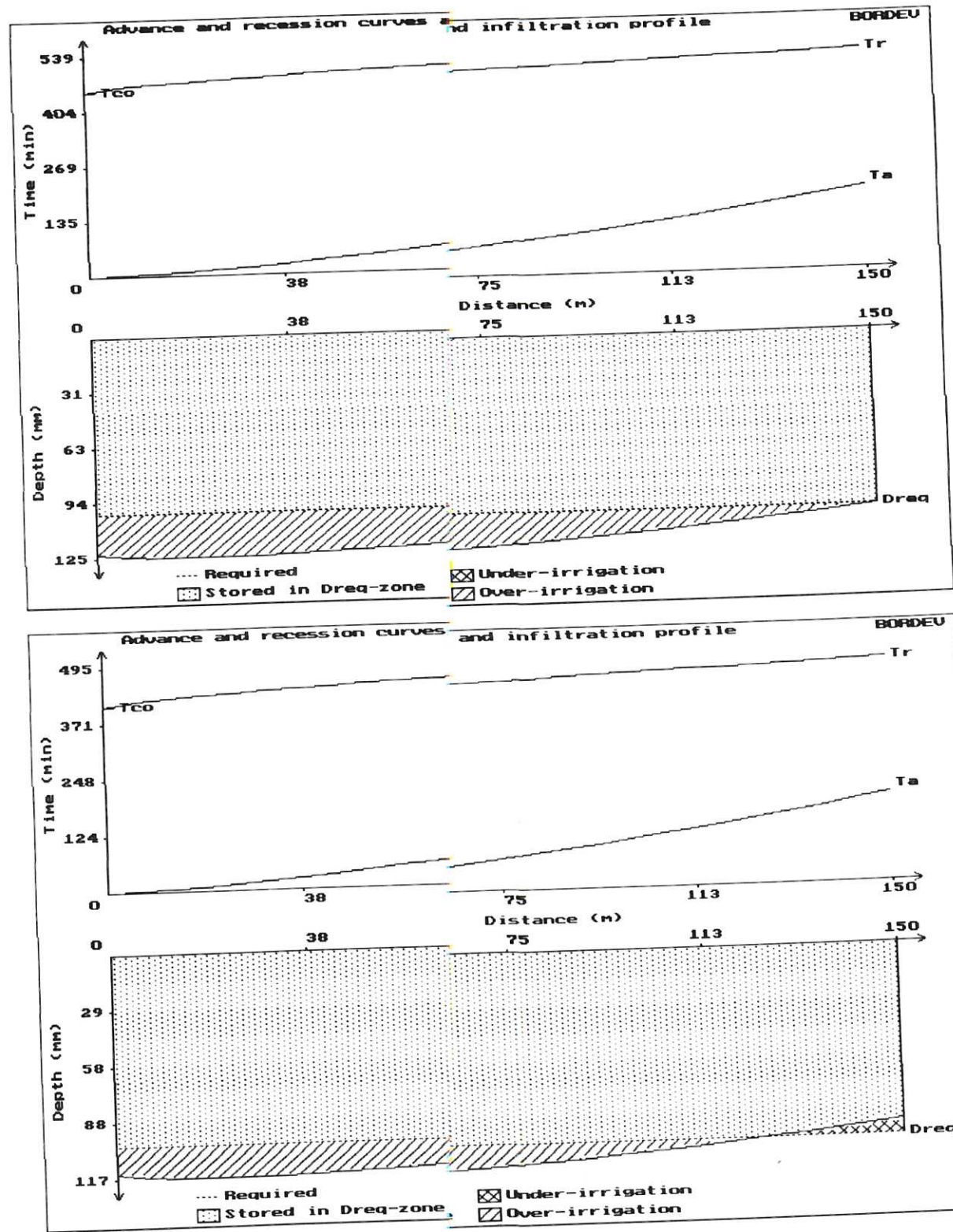
**Table 2: Input and output parameters of a border design and operation problem using the BORDEV program**

Run number	1	2	3	4	5
Type of system	1	1	1	2	3
Calculation mode	1	3	4	4	4

INPUT PARAMETERS					
Flow rate (l s <sup>-1</sup> )	-	20	20	20	20
Length (m)	150	150	150	150	150
Width (m)	20	20	20	20	20
Cut-off time (min)	-	-	360	360	360
Cut-back ratio (-)	-	-	-	0.65	-
Runoff rec. ratio (-)	-	-	-	-	0.85
Required depth (mm)	100	100	100	100	100
Flow resistance (m <sup>1/6</sup> )	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
Bed slope (m m <sup>-1</sup> )	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Intake family (#)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

OUTPUT PARAMETERS					
Flow rate (l s <sup>-1</sup> )	19.66	-	-	-	-
Cut-back flow (l s <sup>-1</sup> )	-	-	-	13	-
Cut-off time (min)	402	398	-	-	-
Cut-back time (min)	-	-	-	195	-
Application eff. (%)	63	63	69	85	90
Storage eff. (%)	100	100	100	100	100
Uniformity coeff. (%)	94	94	94	93	94
Distrib. unif. (%)	85	86	84	84	84
Deep perc. ratio (%)	11	10	6	6	6
Runoff ratio (%)	26	27	25	9	25
Avg. inf. depth (mm)	117	116	109	109	109
Max. inf. depth (mm)	125	124	117	118	117
Min. inf. depth (mm)	100	100	92	91	92
Surface runoff (mm)	41	43	35	12	35
Over-irr. (mm)	17	16	12	12	12
Under-irr. (mm)	0	0	1	1	1
Over-irr. length (m)	150	150	119	119	119
Under-irr. length (m)	0	0	31	31	31
Advance time (min)	200	195	195	195	195
Depletion time (min)	453	448	410	420	410
Recession time (min)	539	534	495	492	495
Opportunity time (min)	339	339	300	297	300

**Fig. 2: Advance and recession curves, and the profile of infiltrated water depth for the border sample problem (see Table 2), with in the top and bottom the graphical output of simulation run 1 and 5, respectively.**



The  $E_a$  in the first run did not improve in the second run by changing the calculated flow rate from  $19.66 \text{ l s}^{-1}$  to  $20 \text{ l s}^{-1}$ . This is also logic because the differences in flow rates are almost

negligible. By reducing the  $t_{co}$  from 398 min to 360 min, results in an increase in  $E_a$  from 63 to 69%. Reducing the inflow rate with 35%, i.e., from  $20 \text{ l s}^{-1}$  to  $13 \text{ l s}^{-1}$ , the moment that the

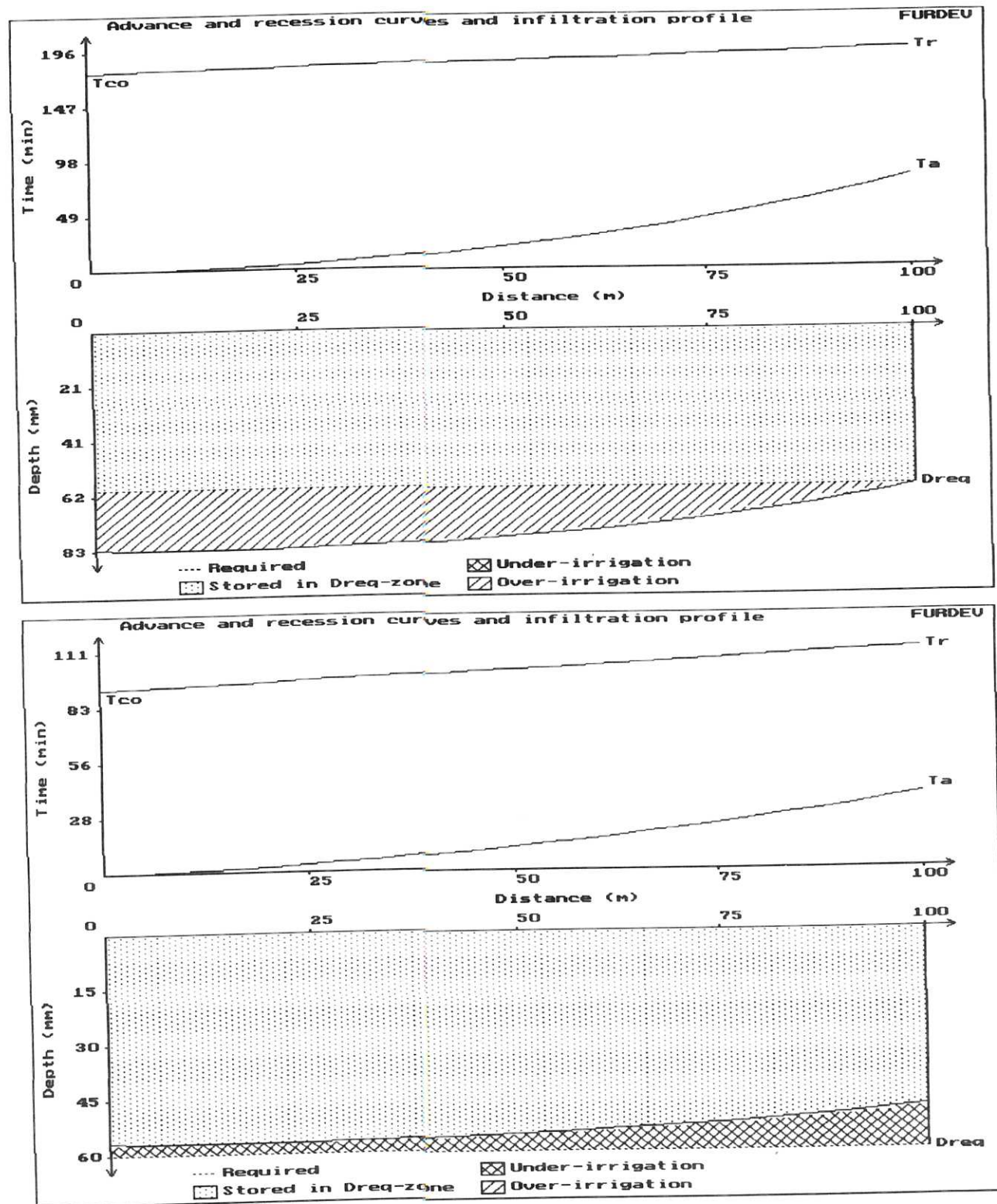
**Table 3: Input and output parameters of a furrow design and operation problem using the FURDEV program**

Run number	1	2	3	4	5	6
Type of system	1	1	1	2	3	3
Calculation mode	1	3	4	4	4	4

INPUT PARAMETERS						
Flow rate ( $\text{l s}^{-1}$ )	-	1	1	1	1	1
Length (m)	100	100	100	100	100	100
Cut-off time (min)	-	-	120	120	120	90
Cut-back ratio (-)	-	-	-	0.65	-	-
Runoff rec. ratio (-)	-	-	-	-	0.85	0.85
Required depth (mm)	60	60	60	60	60	60
Flow resistance ( $\text{m}^{1/6}$ )	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Furrow slope ( $\text{m m}^{-1}$ )	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Furrow spacing (m)	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Maximum velocity ( $\text{m min}^{-1}$ )	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8
Max. depth (m)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Max. width (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Intake family (#)	1	1	1	1	1	1

OUTPUT PARAMETERS						
Flow rate ( $\text{l s}^{-1}$ )	0.63	-	-	-	-	-
Cut-back flow ( $\text{l s}^{-1}$ )	-	-	-	0.65	-	-
Cut-off time (min)	175	116	-	-	-	-
Application eff. (%)	68	65	63	82	88	96
Storage eff. (%)	100	100	100	100	100	91
Uniform. coeff. (%)	92	97	97	96	97	96
Distrib. unif. (%)	79	91	92	90	92	88
Deep perc. ratio (%)	19	6	8	9	8	0
Runoff ratio (%)	13	29	30	9	30	24
Advance time (min)	81	38	38	38	38	38
Depletion time (min)	178	119	123	122	123	93
Recession time (min)	196	138	142	138	142	111
Opportunity time (min)	115	101	105	101	105	74
Avg. inf. depth (mm)	77	66	67	67	67	54
Max. inf. depth (mm)	83	68	70	69	70	57
Min. inf. depth (mm)	60	60	62	60	62	48
Surface runoff (mm)	11	27	29	6	29	18
Over-irr. (mm)	17	6	7	7	7	0
Under-irr. (mm)	0	0	0	0	0	6
Over-irr. length (m)	100	100	100	100	100	0
Under-irr. length (m)	0	0	0	0	0	100

**Fig. 3: Advance and recession curve, and the profile of infiltrated water depth for the furrow sample problem (see Table 3), with in the top and bottom the graphical output of simulation run 1 and 6, respectively.**



water has reached the bottom end of the border, results in an increase of  $E_a$  from 69 to 85%. Applying a 85% recovery of the tailwater results even in a much larger increase in  $E_a$ , namely from 69 to 90%. In the latter case  $E_a$  is calculated as  $100 - (1 - RR)R_f - D_f$ , where RR is the recovery ratio,  $R_f$  the runoff ratio and  $D_f$  the deep percolation ratio. In all case examined  $E_r$ , UCC and DU hardly changed. In the three last cases examined, there is under-irrigation over a length of 31 m, but the average amount of under-irrigation is so small, only 1 mm, in comparison to the amount of over-irrigation, 12 mm, that the program calculates a storage efficiency of 100%. In Fig. 2 the time - distance curves (advance and recession curves) and the water depth - distance curves, including the required water depth are presented for the solution in the columns 2 and 5. Table 2 and Fig. 2 are downloaded from BORDEV using the View/Print command, and directly introduced in WORD'97, being the text software in which this manuscript is written.

A similar analysis is presented herein for a furrow sample problem (see Table 3 and Fig. 3). The length of the furrow was assumed equal to 100 m, the required water depth 60 mm, the flow resistance 0.04, the furrow slope 0.3 %, the furrow spacing 0.75 m, the maximum allowable velocity in the furrow  $13.8 \text{ m min}^{-1}$ , the maximum depth and width of the furrow (parabolic cross-section) 0.2 and 0.5 m, and the intake family number 1 (coarse sandy-loam soil). Analysis of the problem in the calculation mode 1 of the FURDEV program yields an inflow rate of  $0.631 \text{ s}^{-1}$ , a time of cut-off of 175 min and an application efficiency of 68%. The values of the other output parameters are listed in the 2<sup>nd</sup> column of

Table 3. Increasing the flow rate per furrow from  $0.63$  to  $1 \text{ s}^{-1}$ , results in a decrease of the application efficiency, from 68 to 65%, and a decrease in  $t_{co}$  from 175 to 116 min. Rounding off the  $t_{co}$  from 116 to 120 min, or 2 hours, further results in a decrease of  $E_a$ , from 65 to 63%.  $E_a$  is improved considerably, as can be seen from the results in Table 3, by applying either the operation modes cut-back or tailwater reuse. Reducing the inflow rate with 35% as the water reaches the end of the furrow results in an increase of  $E_a$  from 63 to 82%. Recovering 85% of the tailwater results in an increase in efficiency from 63 to 88%. As demonstrated in the 7<sup>th</sup> column of Table 3, the  $E_a$  can be further increased to 96%, given the  $t_{co}$  is reduced from 120 to 90 min. The latter, however, results in a slight under-irrigation, of 6 mm, over the entire length of the furrow ( $E_r = 91\%$ ). Minor under-irrigation is not that harmful given that the accumulation of it over the growing season does not lead to a major deficit, and when the quality of the soil and the irrigation water do not require the application of extra water for leaching. The input data used and the results obtained with the FURDEV program for the furrow sample problem are given in Table 3 and Fig. 3.

**4.3. Use of FURDEV for establishing the relationship between the decision variables and the systems performance indicators**

The performance terms used to evaluate the quality of an existing system, a new design or management scheme can according be summarized as:

- $E_a$  = the application efficiency, an index used to measure how effec-

tive an irrigation event is in minimizing unavoidable losses;

- $E_r$  = the storage efficiency, an index used to measure adequacy. Although adequacy is a spatially variable term, due to unavoidable spatial variability of the intake opportunity time, a mean value of  $E_r$  is used in BASDEV, BORDEV and FURDEV to represent it. In order to complement this weakness, which is inherent in the  $E_r$  index, of being unable to account for the spatial variability of adequacy, a uniformity index has been introduced. The spatial uniformity of irrigation water application provides a vital clue as to how good the corresponding  $E_r$  index is as a representative measure of adequacy over the entire region of interest;
- DU = the distribution uniformity and UCC = Christiansen's uniformity coefficient are the most commonly used uniformity indices;
- $R_r$  = runoff fraction, an index used to quantify the irrigation water loss by surface runoff; and
- $D_r$  = deep percolation fraction, an index used to quantify the irrigation water loss by irrigation water percolating below the rootzone.

In the example an additional index is being used, namely  $C_r$ , expressing the sum of  $R_r$  and  $D_r$ , the cumulative irrigation water loss fraction (Zerihun et al., 1997).

Knowledge of the performance indices and their relationship with the decision variables ( $L$ ,  $Q_0$  and  $t_{co}$ ) is of vital importance for the proper design and operation of surface irrigation systems. The performance terms have been derived for the following sample problem of furrow irrigation: the parameters of the modified Kostiaikov-

Lewis equation,  $a$ ,  $k$  and  $f_0 = 0.598$  (-),  $3.32 \text{ mm min}^{-a}$  and  $0.212 \text{ mm min}^{-1}$ , respectively; coefficient and exponent, respectively, of the power function to relate cross-sectional area of flow with depth of flow,  $s_1$  and  $s_2 = 1$  and  $2$ ; coefficient and exponent, respectively, of the power function used to relate wetted perimeter and depth of flow,  $t_1$  and  $t_2 = 2.828$  and  $1$ ; water requirement or net irrigation depth,  $Z_r = 80 \text{ mm}$ ; Manning's roughness coefficient,  $n = 0.04 \text{ m}^{1/6}$ ; maximum non-erosive velocity,  $V_{max} = 13.8 \text{ m min}^{-1}$ ; bed slope,  $S_0 = 0.008$ ; and SCS intake family number,  $\# = 1$ . In the analysis where the variation of the performance indices has been studied as a function of  $Q_0$  and  $t_{co}$ , the furrow length ( $L$ ) was taken equal to  $100 \text{ m}$ , and in the analysis where the variation of the performance indices was verified as a function of  $L$  and  $t_{co}$ , the inflow rate ( $Q_0$ ) was assumed equal to  $0.51 \text{ l s}^{-1}$ . In all studied cases  $E_r$  was taken equal to  $100 \%$ , or that the minimum infiltrated water depth at the end of the furrow equals the minimum required water depth,  $Z_r$ . This condition is automatically applied by the programs in the modes 1 (calculation of  $Q_0$  when the length is a given input), 2 (calculation of  $L$  when the inflow rate is a given input) and 3 (calculation of  $t_{co}$  when  $Q_0$  and  $L$  are input). Running the software packages in the mode 4 (calculation of the minimum infiltration depth when  $Q_0$ ,  $L$  and  $t_{co}$  are input) enables to assess the variation of the performance indices as a function of the system variables ( $Q_0$ ,  $L$  or  $t_{co}$ ) for  $E_r$  values smaller than  $100 \%$ . To obtain the value of the performance indices as a function of variations in  $Q_0$  and  $L$ , respectively, the FURDEV package was run in mode 3. The unit flow rate ( $0.51 \text{ l s}^{-1}$ ) used to derive the relationship between the performance indices and the length of field, was taken equal to

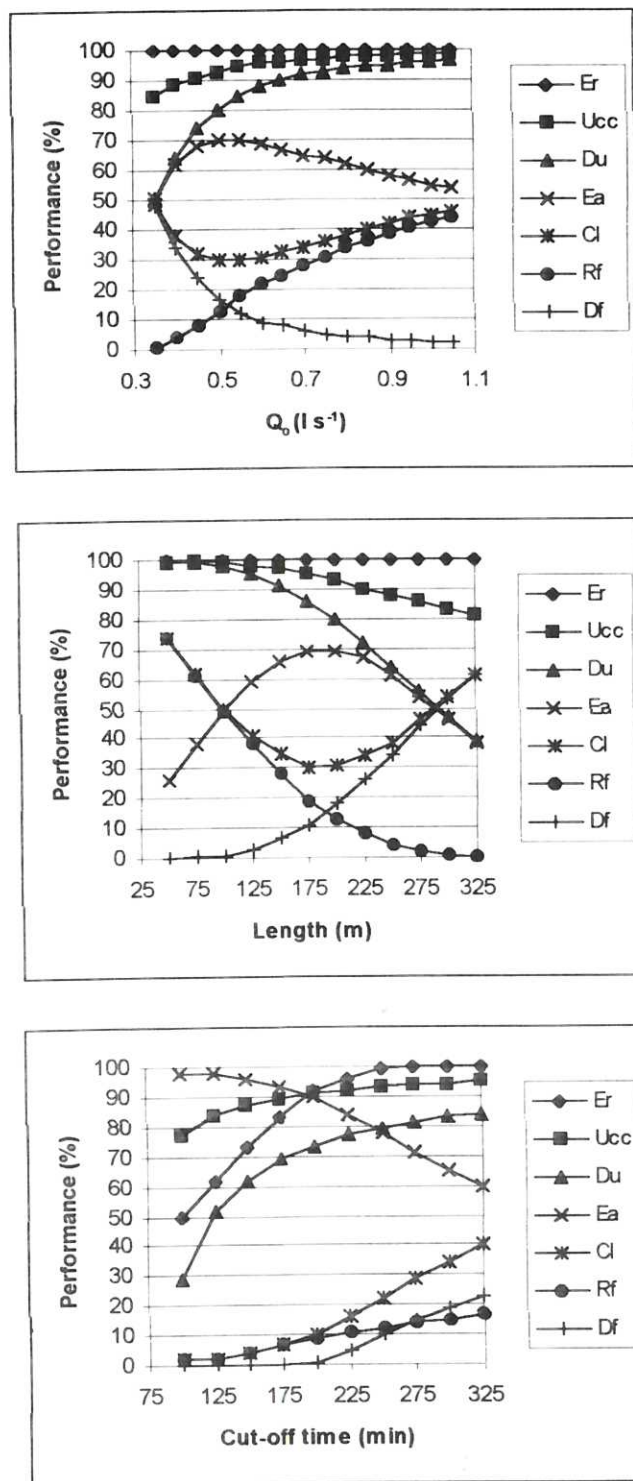
the unit flow rate resulting in the maximum value of  $E_a$  for the situation whereby the performance indices were analyzed as a function of  $Q_0$ . To examine the relationship between  $t_{co}$  and the performance indices,  $Q_0$  and  $L$  were taken equal to the value used for the analysis of the performance indices as a function of  $Q_0$ , whereby the value of  $Q_0$ , as explained in previous, was taken equal to  $0.51 \text{ l s}^{-1}$ , being the flow rate corresponding to the maximum value of  $E_a$ . To assess the latter relationship FURDEV was run in mode 4.

The simulation results are given in Fig. 4. The top section in Fig. 4 shows the simulation results for variations in  $Q_0$ , the middle section of Fig. 4 gives the evolution of the performance indices as a function of variations in  $L$ , and the bottom section of Fig. 4 shows the same information for variations in  $t_{co}$ . As can be seen in Fig. 4, the application efficiency curve as a function of  $Q_0$  and  $L$  is a bell shaped unimodal curve. DU, UCC and  $R_r$  are increasing functions of  $Q_0$  and decreasing functions of  $L$ .  $D_r$  is an increasing function of  $L$  and a decreasing function of  $Q_0$ . The same is true for the variations of the performance indices as a function of  $t_{co}$ . However, only one side of the bell shaped unimodal curve, presenting  $E_a$  versus  $t_{co}$  is visible due to the fact that the software does not run for conditions when  $t_{co}$  becomes smaller than the advance time. In addition, also  $D_r$  is an increasing function of  $t_{co}$ . From the bottom section in Fig. 4 it can be seen that  $E_r$  becomes smaller than  $100 \%$  for the lower values of  $t_{co}$ . The analysis also reveals that DU is a more sensitive parameter to changes in system variables than UCC. The former is mainly due to the fact that UCC is representing more the average unifor-

mity over the entire length of the field, whereas DU is a more appropriate indicator of the irrigation uniformity over the reach closer to the point where the infiltrated water depth equals the minimum infiltrated water depth. Losses are relatively high in the sample problem, mainly because a constant unit flow rate is assumed throughout the irrigation cycle, neglecting the possibility of cut-back or tailwater reuse. If either, cut-back or tailwater reuse are applied, FURDEV can be used to study the variation of performance indices to changes in the system variables  $Q_0$ ,  $L$  and  $t_{co}$ , on a one at a time basis. FURDEV can also be used to derive the relationship between the system variables  $Q_0$ ,  $L$  and  $t_{co}$  for values of  $E_r$  smaller than  $100 \%$ . It is evident that the analysis in this sample problem can also be conducted for a similar basin or border sample problem, using BASDEV or BORDEV, respectively.



**Fig. 4: Performance indices versus unit flow rate (top), field length (middle) and cut-off time (bottom) for a furrow sample**



**5. Conclusions**

Given a target value of  $E_r$ , the task of selecting the combination of inlet flow rate,  $Q_0$ , field length,  $L$ , and cut-off time,  $t_{co}$ , that would result in an optimum application efficiency,  $E_a$ , and acceptable level of uniformity, is not an easy one. The suite of programs in SURDEV are very interesting tools for design engineers and operation staff of irrigation systems, and for the quick assessment of the performance of existing field irrigation systems, or for calculating the application efficiency and the distribution of water losses over runoff and deep percolation, when either the field length and/or inflow rate are given. In addition, as shown in the first sample problem discussed in this paper, the suit of programs in SURDEV have didactic properties. The three programs BASDEV, BORDEV and FURDEV help to visualize the effect of changes in input parameters on output parameters, without the need to understand fully the complexity and the dynamics of the underlying processes. The second sample problem clearly illustrates the potential of the suits of programs in design and operation problems. The last sample problem illustrates how the suit of programs can be used to show the effect of changes in  $Q_0$ ,  $L$  and  $t_{co}$  on the performance indices, on a one at a

time basis, for situations in which  $E_r$  is equal or smaller than 100 %. Knowledge on how the performance indices respond to simultaneous changes in the system variables  $Q_0$ ,  $L$  and  $t_{co}$  would be even more desirable and more informative. This can be done in mode 4 of the 3 programs but involves a large number of runs.

The added value of the results presented in this paper, for engineers and irrigators, is situated in the fact that the suite of programs in SURDEV automates in a simple and straightforward manner the manual solution of irrigation design and operation problems (Boonstra and Jurriens, 1988). In one view the user can assess the response of the system, expressed in terms of performance indices, should the system variables increase or decrease in value. This and other information that can be derived by the programs BASDEV, BORDEV and FURDEV is very helpful for the design engineer as well as for the irrigator, responsible for the daily operation of the field system. Without the need of having to go through tedious and lengthy calculations the effect of minor adjustments in the design and operation of surface irrigation systems for a given field condition on the system performance can be derived almost immediately.

## 6. References

- Bassett, D.L., D.D. Fangmeier and T. Strelkoff, 1980. Hydraulics of surface irrigation. In: Jensen, M.E. (ed.): Design and management of farm irrigation systems. ASAE Monograph 3, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA: 445-498.
- Booher, L.J., 1974. Surface irrigation. FAO Rome, Italy, Agric. Dev. Paper No. 95, Land and Water Development series No. 3, 160 p.
- Boonstra, J. and M. Jurriëns, 1988. BASCAD: a computer program for level-basin irrigation. ILRI, Wageningen, The Netherlands, Publ. 43, 32 p. + diskette.
- Clemmens, A.J. and D.D. Fangmeier, 1978. Discussion of Strelkoff and Katopodes (1977). *J. Irrigation and Drainage Division ASCE*, IR3(104): 337-339.
- Criddle, W.D., 1949. A practical method of determining proper lengths of runs, sizes of furrow streams and spacing of furrows on irrigated lands. SCS, USDA, Washington D.C., USA.
- Cuenca, R.H., 1989. Irrigation system design, an engineering approach. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 552 p.
- Elliot, R.L., W.R. Walker and G.V. Skogerboe, 1982. Zero-inertia modelling of furrow irrigation advance. *J. Irrigation and Drainage Division ASCE*, IR3(108): 179-195.
- Essafi, B., 1983. A recursive volume-balance model for continuous and surge flow irrigation. Unpublished M.S. thesis, Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Hall, W.A., 1956. Estimating irrigation border flow. *Agric. Engng.* 37(4), 263-265.
- Hart, W.E., Bassett, D.L. and Strelkoff, T., 1968. Surface Irrigation hydraulics-kinematics. *J. Irrig. and Drain. Div., ASCE* 94(4), 419-440.
- Jensen, M.E. (ed.), 1980. Design and management of farm irrigation systems. ASAE Monograph 3, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, USA: 445-498.
- Kay, M., 1986. Surface irrigation: systems and practice. Cranfield Press, Cranfield, UK, 142 p.
- Levien, S.L.A. and Souza, F., 1987. Algebraic computation of flow in furrow irrigation. *J. Irrig. and Drain. Engng., ASCE* 113(3), 367-377.
- Lewis, M.R. and Milne, W.E.L., 1938. Analysis of border irrigation. *Agric. Engng.* 19, 267-272.
- Ley, T.W., 1978. Sensitivity of furrow irrigation performance to field and operation variables. Unpublished M.S. thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- Merriam, J.L. and A.J. Clemmens, 1985. Time rated infiltrated depth families. In: Development and Management Aspects of Irrigation and Drainage. Spec. Conf. Proc. Irrig. and Drain., ASCE, San Antonio, TX, USA: 67-74.
- Phelan, J.T. and W.D. Criddle, 1955. Surface irrigation methods. In: The Yearbook of Agriculture, US Government Printing Office, Washington D.C., USA: 258-266.
- Philip, J.R. and Farrell, S.A., 1964. General solution of the infiltration-advance problem in irrigation hydraulics. *Geop. Res.* 69(4), 621-631.
- Strelkoff, T. and Katopodes, N.D., 1977. Border irrigation hydraulics with zero-inertia. *J. Irrig. and Drain. Div., ASCE* 103(3), 325-342.
- USDA, 1974. SCS National Engineering Handbook. Section 15, Chapter 4. Border Irrigation, US Government Printing Office, Washington D.C., USA.
- USDA, 1979. SCS National Engineering Handbook. Section 15, Chapter 5. Furrow Irrigation, US Government Printing Office, Washington D.C., USA.
- Walker, W.R. and G.V. Skogerboe, 1981. Evaluating furrow irrigation systems for regional water quality planning. Report EPA-600/2-81, US Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, USA.
- Walker, W.R. and G.V. Skogerboe, 1987. Surface irrigation: theory and practice. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, USA, 386 p.
- Wilke, O.C. and Smerdon, E.T., 1965. A solution to the irrigation advance problem. *J. Irrig. and Drain. Div., ASCE* 91(3), 23-34.
- Zerihun, D., Z. Wang, S. Rimal, J. Feyen and J.M. Reddy, 1997. Analysis of surface irrigation performance terms and indices. *Agric. Water Manage.*, 34: 25-46.



**ANALISIS CUANTITATIVO DE LA PERFORMANCE DE RIEGO POR SURCOS  
EN EL AUSTRO ECUATORIANO, EN PENDIENTES MAYORES AL 12%\***

CISNEROS, F.<sup>1</sup>, E. PACHECO<sup>1</sup>, J. FEYEN<sup>2</sup>

---

QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE  
PERFORMANCE OF FURROW  
IRRIGATION IN THE SOUTHERN SIERRA  
OF ECUADOR, ON SLOPES STEEPER  
THAN 12%

---

**RESUMEN**

**E**ste artículo resume los resultados de los trabajos de campo que tuvieron como objetivo evaluar la performance de los sistemas de riego por surcos, que aplican los campesinos del Austro Ecuatoriano. La interpretación de los datos de campo no solamente permite la evaluación de la performance de las prácticas de riego, sino también la identificación de medidas para mejorar el funcionamiento del sistema.

**ABSTRACT**

This paper summarizes the results of a comprehensive field survey with the objective to assess the performance of the furrow irrigation systems used by the indigenous farmers in the Southern Sierra of Ecuador. Interpretation of the field data not only enables evaluation of the performance of the irrigation practice, but helps identifying the measures required to improve the system performance.

---

\* Presentado en el Primer Taller Internacional de Riego y Drenaje, AGROMECA'98, 13-17 de julio, Habana, Cuba.

<sup>1</sup> PROMAS, Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca, Ecuador.

<sup>2</sup> Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.

## 1. Introduction

Ecuador is located on the Pacific Coast of South America, at the equator, and is bordered by Colombia in the north and Peru to the south. The country is divided in three regions. The Andean mountain range, rising to 6310 m with the Chimborazo its highest peak, forms the backbone of the country. The mountains run from north to south and split the country into the western coastal lowlands and the eastern jungles of the upper Amazonian basin. The mountain range is called the Sierra. The Southern Sierra comprises the provinces of Azuay and Cañar. The Southern Sierra drains to the Pacific Ocean through the Rio Cañar and the Rio Jubones, respectively, and in the center, rivers flow via the Rio Paute to the Amazon. The altitude is very variable, and the eastern and western cordillera with many peaks, mainly of volcanic origin, stretches above 4000 meters above sea level. The depressions in between have an average altitude of 2500 m, and are intersected by transversal foothills. Where important rivers flow downwards, deep valleys exist, introducing either coastal or Amazonian climate influence. Sometimes these valleys are canyon-like through which strong climatic disturbances enter into the mountain region.

The climate in the Sierra is therefore very variable, depending on the location, altitude, and the influence from the Costa and the Oriente. Average annual rainfall varies between 500 and 4250 mm, and several rainfall patterns can be distinguished, ranging from a mono- to a bi-modal rainfall pattern. The bi-modal character of the rainfall pattern is caused by the variable influences of the Costa and the Oriente. Traditionally, the period mid-February to mid-June is the main

rainy season, followed by a dry spell from mid-June to mid-October, whereas a second rainy period can be distinguished from mid-October to mid-December. December and January, are normally dry months. Depending on the location, the altitude and the influence from the Costa and the Oriente, the length of the dry season increases, making the application of irrigation indispensable. Precipitation deficit varies within the Sierra between 50 and 750 mm. Daily maximum temperature ranges, depending on the altitude, between 15-20°C (warm) and 6.5-15°C (moderate cool), or does not exceed 6.5°C (cool). Minimum temperatures drop below 5 to 10°C, but seldom below 0°C at altitudes below 3000 m.

The population pressure in the Sierra is relatively high, and as a consequence of the population increase, the indigenous communities are forced to move to higher altitudes, cultivating too steep, mostly shallow, slopes. Average population density in the provinces of Azuay and Cañar equals 60 people/km<sup>2</sup>, whereas the country average does not exceed 35 people/km<sup>2</sup>. The productivity of the soils in the Southern Sierra is not only low, also these soils are very susceptible to erosion. The main crops cultivated are maize, wheat, peas, potatoes, vegetables and fruits. For many of these crops productivity is below the national average. Parallel to the increase of the pressure on land, the interest for supplementary irrigation went up. The increase in land price, the more favorable market prices for food and vegetable crops, and the population pressure all encourage the introduction of more efficient farming techniques, including the application of irrigation, notwithstanding increasing cost of water and infrastructure.

The irrigation infrastructures are rather costly, mainly because of the long distribution network in a complex and irregular topography. Most irrigation systems take water from a river high in the mountains, and water is conveyed to the irrigation zone through a lead canal with a variable length, often varying from 5 to 35 km. The lead canals are mostly open, sometimes lined canals, transporting the water through a rough landscape. In the irrigation scheme, water is distributed through a secondary network of unlined canals or PVC tubes. The tertiary units have on average a surface of 5 to 10 ha, cultivated by 3 to 5 farmers, which means that the average private farm size ranges between 1 and 3 ha. In state owned irrigation schemes the average area per farm varies between 15 and 20 ha. The tertiary distribution networks is taken care of by the farmers, and consist mainly of unlined canals. Within the tertiary units, often little reservoirs are present which makes the irrigation system more flexible in its operation. The reservoirs are normally filled during the night, and the water is used for irrigation during the day. Whereas most irrigation infrastructures were designed, constructed, maintained and operated by CNRH (Consejo Nacional de Recursos Hídricos), formerly called INERHI (Instituto Ecuatoriano de Recursos Hídricos), today by lack of government interest and funding, the irrigation systems are privatized and turned over to the farming communities. Water distribution is traditionally on fixed rotation with an interval ranging between 3 and 15 days. The flow rate of water at the tertiary unit varies between 0.35 and 3 l s<sup>-1</sup>, and every farmer can take the full flow rate to irrigate his land during 3 to 24 hours. During the night farmers do not irrigate, and the irrigation water is used to fill a local reservoir if present. Most

projects have insufficient capacity to properly irrigate the designated area. As a consequence of the previous the irrigation interval can increase from 3 to 5 days, up to 7 and 15 days.

In the Southern Sierra, almost no terraces are built. Contour farming is widely applied. The raised beds and the furrows in between the beds are always parallel with the contour lines. The water supply ditch is either perpendicular to the slope, with a slope up to 12%, or laid in zig-zag, with a slope varying between 1 and 3%. The furrows have a moderate slope varying between 0.5 and 2%. The zig-zag layout is widely distributed in the Southern Sierra, mainly for the cultivation of vegetables and potatoes. The furrows are connected to the zig-zag supply ditch, and closed at the end. Furrows have as a consequence of the irregular topography a variable length. Mostly they are short, with a total length in between 10 and 30 m. It is exceptionally to find furrows with a length exceeding 30 m. The farmers do not use checks or turnout structures to control the inflow of water in the furrows. Traditionally, the farmers cut with a hoe a hole in the bank of the supply ditch, and with the soil cut from the bank, a temporary, little cross dam is made in the supply ditch, forcing the water to flow in the furrow. Water is allowed to flow in the furrow until it reaches the end. At that moment the farmer closes the furrow using the soil of the cross dam in the supply ditch. Depending on the capacity of the supply ditch, the farmer irrigates simultaneously 2 to maximum 3 furrows. The farmer continues to apply this procedure, as long he is entitled to tape irrigation water.

The objective of this study was to assess the performance of the furrow irrigation system used by the indig-

enous farmers, given the constraints in the physical infrastructure and the operation of the water distribution network. Therefore a survey was made at three different locations in the Southern Sierra, La Unión, Dandán and Patococha. The survey was not only conducted to derive a quantitative picture of the irrigation performance, but also to identify possible measures to improve the system layout and the operation. In the following a detailed description of the methods and materials are given, followed by the results, the discussion of the results and the conclusions.

**2. Methods**

The monitoring of the performance of furrow irrigation systems requires the measurement of system variables and the calculation of performance indicators. The information required for the assessment of the performance are: type of crop and soil, the infiltration parameters (a, k and  $f_0$ ), the type of furrow system (free draining or blocked-end), the furrow slope, the uniformity of the furrow slope, the furrow spacing, the shape factors of the width of the water surface in the furrow ( $a_1$  and  $a_2$ ), the shape factors of the wetted perimeter ( $b_1$  and  $b_2$ ), the depth of the root zone, the required application depth, the soil water content in the root zone at field capacity and before irrigation, the flow rate, the length of the furrow, the time of cut-off, and the advance and recession curve.

The soil type on each experimental plot was determined using the World Reference Base classification system (Deckers et al., 1998). A profile pit was dug and the soil profile described according to the guidelines of the World Reference Base for soil classification. Of the different horizons, undisturbed

soil samples were taken in triplicate together with a disturbed blend soil sample. On the disturbed soil sample, soil fertility and the particle size distribution were determined. The undisturbed soil samples were used to determine the soil bulk density, the water retention curve and the saturated hydraulic conductivity.

The infiltration properties of the soil on the experiments 1 through 10 (La Unión and Dandán) were determined using the two point method (Elliot and Walker, 1982). On the experiments 11 through 13 (Patococha) use was made of the double ring infiltrometer for the determination of the cumulative infiltration curve. The procedure of the two-point method begins with the determination of  $f_0$  from the inflow-outflow hydrograph. Then the volume balance equation is used for describing the advance phase (see Eq. 1). This equation is applied for two points along the furrow using advance rate measurements. Traditionally, Eq. 1 is applied for the middistance of the furrow and the end of the furrow (see Eqs. 2 and 3, respectively). The unknowns in Eqs. 2 and 3 are the parameters k and a of the Kostiakov-Lewis infiltration equation (Walker and Skogerboe, 1987).

$$Q_0 t = \sigma_v A_0 x + \sigma_z k t^a x + \frac{f_0 t x}{1+r} \quad \text{Eq. 1}$$

where

- $A_0$  = the cross-sectional area of flow at the inlet,  $m^2$
- $Q_0$  = inlet discharge,  $m^3 \text{ min}^{-1}$
- t = elapsed time since the irrigation started, min
- $s_y$  = surface storage shape factor, which is defined as a constant of 0.70 to 0.80
- $s_z$  = subsurface shape factor, defined as a function of a and r

- a, k = empirical fitting parameters of the Kostiakov-Lewis infiltration function
- r = empirical fitting parameter of the advance power function
- $f_0$  = basic intake rate in units of volume per unit length per unit time ( $m^3 \text{ min}^{-1} m^{-1}$ )
- x = distance along the furrow, m

Equation 1 for the middistance writes as:

$$Q_0(t_{0.5L}) = \frac{\sigma_v A_0 L}{2} + \sigma_z \frac{K(t_{0.5L})^a L}{2} + \frac{f_0(t_{0.5L})L}{2(1+r)} \quad \text{Eq. 2}$$

and for the end of the field, as:

$$Q_0 t_L = \sigma_v A_0 L + \sigma_z K t_L^a L + \frac{f_0 t_L L}{1+r} \quad \text{Eq. 3}$$

where

- $t_{0.5L}$  = advance time to one-half the field length, min
- $t_L$  = advance time to the end of the field, min
- L = field length, m

Solving the Eqs. 2 and 3 simultaneously using a logarithmic transformation to linearize them yields:

$$a = \frac{\ln(V_L / V_{0.5L})}{\ln(t_L / t_{0.5L})} \quad \text{Eq. 4}$$

where

$$V_L = \frac{Q_0 t_L}{L} - \sigma_v A_0 - \frac{f_0 t_L}{1+r} \quad \text{Eq. 5}$$

and

$$V_{0.5L} = \frac{2Q_0 t_{0.5L}}{L} - \sigma_v A_0 - \frac{f_0 t_{0.5L}}{1+r} \quad \text{Eq. 6}$$

$s_z$  is found directly from Eq. 6, which writes as:

$$\sigma_z = \frac{a+r(1-a)+1}{(1+a)(1+r)} \quad \text{Eq. 7}$$

where r can be calculated as follows:

$$r = \frac{\log_{10} 2}{\log_{10} \left( \frac{t_L}{t_{0.5L}} \right)} \quad \text{Eq. 8}$$

and the parameter k is found by

$$k = \frac{V_L}{\sigma_z t_L^a} \quad \text{Eq. 9}$$

The cumulative infiltration functions, derived by the double ring infiltrometer, were transformed to the infiltration rate function, and the Kostiakov-Lewis equation was fitted to the latter to derive the parameters a, k and  $f_0$ . The values were corrected by the ratio between the wetted perimeter and the spacing between the furrows, in order to obtain parameter values, which are comparable with the parameters derived from the two point method.

The inflow and outflow hydrograph were monitored using a PVC pipe inlet and outlet, having a diameter of 2 inch. The flow rate was determined using a bucket and stop watch. The length, cross section and slope of the furrow where determined using a ruler and a level instrument. The dimensions of the cross section and the slope were determined in 4 to 5 stations along the furrow. The water depth and width where used to derive through regression the shape parameters of the water width (T) and the wetted perimeter (P). The width of the water surface in the furrow and the wetted perimeter are related to the maximum water depth Y, measured in cross-section of the furrow, as:

$$T = a_1 Y^{a_2} \quad \text{Eq. 10}$$

and

$$P = b_1 Y^{b_2} \quad \text{Eq. 11}$$

where

T = width of the water surface in the furrow, m  
 P = wetted perimeter, m  
 Y = largest water depth in cross section, m

$a_1, a_2$  = empirical fitting parameters  
 $b_1, b_2$  = empirical fitting parameters

The wetted cross sectional area,  $A_0$  in  $m^2$ , can be derived, using the following expression:

$$A_0 = \frac{a_1}{a_2 + 1} Y^{(a_2 + 1)} \quad \text{Eq. 12}$$

In the same stations, where the geometry of the furrow was measured, the advance and recession times were determined as well, yielding the advance and recession curve, respectively. Both curves were plotted, and the opportunity time, being the distance between the advance and recession time, was used to calculate, using the Kostiakov-Lewis infiltration equation, the infiltrated water depth. At the end of the irrigation, the width of the area wetted at a depth 10 cm below the bottom of the furrow was measured, at different locations, in order to obtain an average idea of the lateral spreading of water. At the same time at those locations soil samples were taken for the determination of the soil water content profile before and after irrigation.

The inflow-outflow hydrograph, the graph with the advance and recession curve, and the graph presenting the infiltrated water depth along the fur-

row were used to calculate the irrigation performance parameters.

Uniformity is a spatial parameter that quantifies the subsurface distribution of applied water in the field. There is abundant data to show the effect of uniformity on crop yields (Solomon, 1988). Uniformity of the applied water becomes even greater when leaching of salts from crop root zone is to be accomplished (Till and Bos, 1985). Several measures of uniformity exist in literature. In this study both the Christiansen's Coefficient of Uniformity (UCC) and the Distribution Uniformity (DU) parameter (Meriam and Keller, 1978) were used. Both parameters were calculated as follows:

$$UCC = 100 \frac{\bar{Z}}{\bar{Z}_a} \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |Z_i - Z_a|}{NZ_a} \right) \quad \text{Eq. 13}$$

and

$$DU = 100 \frac{Z_{lq}}{Z_a} \quad \text{Eq. 14}$$

where

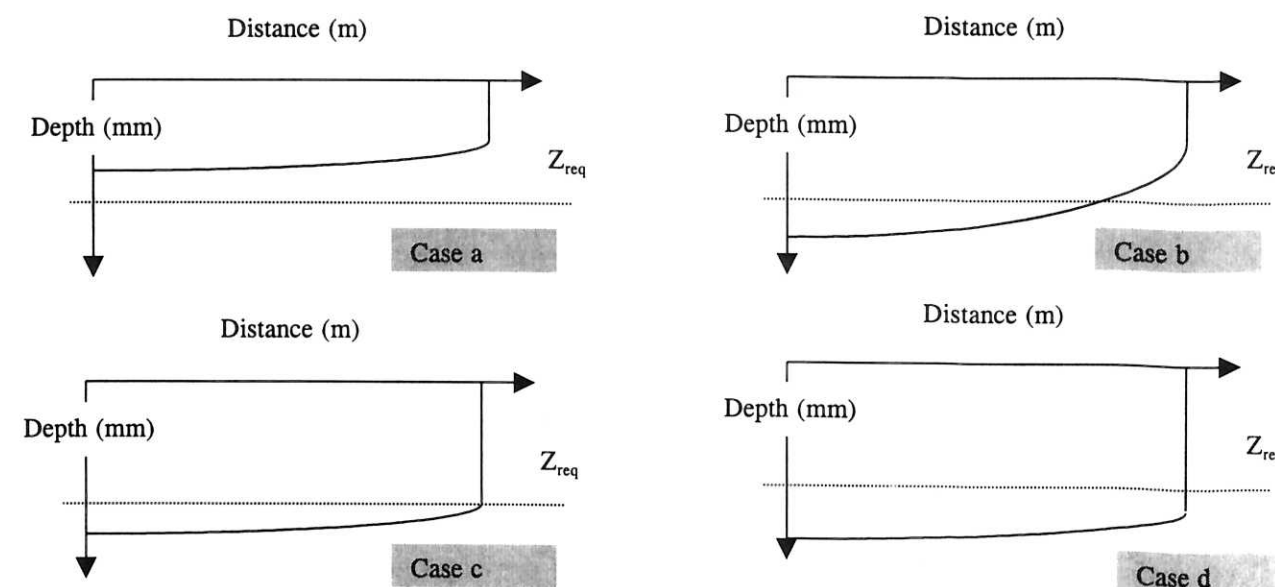
$Z_i$  = depth of water infiltrated at point i, mm  
 $Z_a$  = average water depth infiltrated along the furrow in the soil, mm  
 $Z_{lq}$  = average low quarter water depth infiltrated, mm  
 N = number of measuring stations along the furrow

The DU parameter combines the concept of efficiency and spatial distribution in a directed manner.

High water use efficiencies must be pursued, particularly in those areas

where water is scarce. Low application efficiencies also result in environmental degradation and high cost of irrigation systems. Therefore, application efficiency is an important system performance indicator that must be taken into account in the evaluation of irrigation systems. The application efficiency,  $E_a$  in percent, is normally defined as the ratio of the volume of irrigation water used in evapotranspi-

ration, plus that necessary to maintain a favorable salt content in the solution, to the volume of water delivered to this area. Depending from the irrigation management, i.e., complete under-irrigation (case a), partly under-irrigated (case b), or complete and over-irrigation (case c and d), a different expression is used for the calculation of  $E_a$  (see Fig. 1).



**Fig. 1: Infiltration profile for complete under-irrigation (case a), partly over- and partly under-irrigated (case b), complete irrigation (case c), and complete over-irrigation (case d)**

For complete under-irrigation (case a, Fig. 1)  $E_a$  is calculated using Eq. 15:

$$E_a = 100 \frac{Z_a LW}{60 Q_0 t_{co}} \quad \text{Eq. 15}$$

where

L = length of the furrow, m  
 W = spacing between the furrows, m  
 $Q_0$  = inflow rate,  $l s^{-1}$   
 $t_{co}$  = time of cut-off, min

For partly under-irrigated (case b, Fig. 1) Eq. 16 is used to calculate  $E_a$ :

$$E_a = 100 \frac{[Z_{req} x_d + Z_a (L - x_d)] W}{60 Q_0 t_{co}} \quad \text{Eq. 16}$$

where

$Z_{req}$  = required application water depth, mm  
 $x_d$  = distance along the furrow with over-irrigation, m

For complete and over-irrigation (cases c and d, Fig. 1)  $E_a$  is calculated using Eq. 17:

$$E_a = 100 \frac{Z_{req} LW}{60 Q_0 t_{co}} \quad \text{Eq. 17}$$

The water storage efficiency,  $E_r$  in percent, is the most important parameter as far as crop production is concerned. Irrigation systems should be designed and managed to achieve a water storage efficiency of 100%. Depending upon the value of the crop and the cost of irrigation water, sometimes it may be economical to satisfy less than 100% requirement efficiency. Depending from the irrigation situation (see Fig. 1),  $E_r$  is calculated with one of the following equations:

for case a (Fig. 1)

$$E_r = 100 \frac{Z_a}{Z_{req}} \quad \text{Eq. 18}$$

for case b (Fig. 1)

$$E_r = \frac{Z_{req} x_d + Z_{a(L-x_d)} (L = x_d)}{Z_{req} L} \quad \text{Eq. 19}$$

for case c and d (Fig. 1)

$$E_r = 100 \quad \text{Eq. 20}$$

where

$Z_{a(L-x_d)}$  = average infiltrated water depth in the furrow reach  $L - x_d$ , mm

The runoff ratio (ROR, percent) can be put equal to zero for all cases studied, since the furrows are closed at the end. The deep percolation ratio (DPR, percent) is an expression to indicate the amount of water lost by percola-

tion below the root zone. The DPR was calculated with one of the following equations, depending from the irrigation situation (see Fig. 1).

for case a (Fig. 1)

$$DPR = 100 \quad \text{Eq. 21}$$

for case b (Fig. 1)

$$DPR = 100 \frac{(Z_a - Z_{req}) x_d W}{60 Q_0 t_{co}} \quad \text{Eq. 22}$$

for case c and d (Fig. 1)

$$DPR = 100 \frac{(Z_a - Z_{req}) LW}{60 Q_0 t_{co}} \quad \text{Eq. 23}$$

The advance time can be read directly from the graph presenting the advance and recession curve. The depletion time, being the time between cut-off and the beginning of the recession curve, can also be derived directly from previous graph. The average opportunity time is calculated as the area between the advance and the recession curve, divided by the furrow length. Introducing the average opportunity time, the maximum and minimum opportunity time into the infiltration equation yields the average infiltration depth ( $Z_a$ , mm), the maximum infiltration depth ( $Z_{max}$ , mm) and the minimum infiltration depth ( $Z_{min}$ , mm), respectively. The average water depth in over- or under-irrigation is calculated as the difference between  $Z_a - Z_{req}$ . Positive values refer to over-irrigation and negative values to deficit irrigation. The length of over- or under-irrigation in m can be derived directly from the graph presenting the infiltrated water depth versus distance, including in the same graph  $Z_{req}$ .

### 3. Materials

In total 13 field experiments were conducted, in which the performance of the furrow irrigation system, as used by the farmers, was determined. The 13 field plots are spread over three communities in the Austro-Ecuatoriano, La Unión (Experiment 1 through 8), Dandán (Experiment 9 and 10) and Patococha (Experiment 11 through 13). In the community of La Unión the soil was classified as an Orthic Calcic Vertisol (code I in Table 2, Deckers et al., 1998), in the community of Dandán

as a Calcic Vertisol (code II in Table 2), and in the community of Patococha as a Vertic Luvisol (code III in Table 2). The crops grown on the different field plots were tomato (code A in Table 2) for experiment 1 through 8, onion (code B in Table 2) for experiment 9 and 10, and potatoes (code C in Table 2) for the experiments 11 through 13. The field plots in the communities La Unión and Dandán are situated in the catchment of the Río Jubones, and the field plots in the community Patococha in the watershed of the Río Cañar.

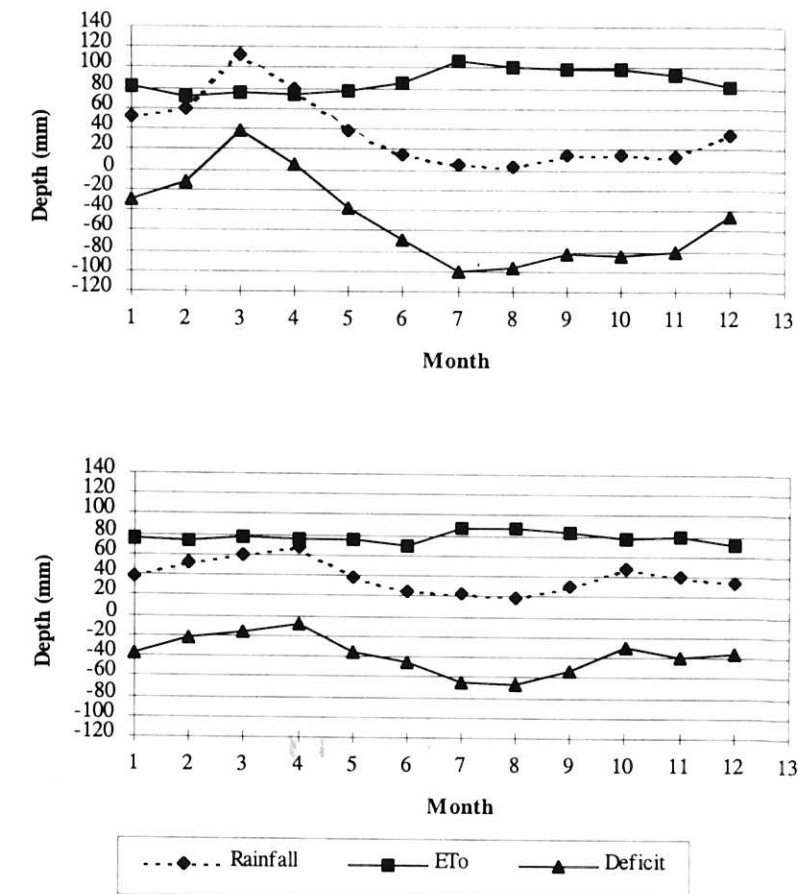


Fig. 2: Pattern of average monthly rainfall, evapotranspiration and rainfall deficit for the weather station of Santa Isabel (top) and Cañar (bottom)

The climate in La Unión and Dandán is well described by the weather station in Santa Isabel, whereas the weather station of Cañar can be considered as representative for Patococha. Figure 2 give the average monthly rainfall, evapotranspiration and rainfall deficit for the weather station of Santa Isabel and Cañar, respectively (CREA, 1993). The average annual rainfall in both stations ranges between 444 (Santa Isabel) and 476 (Cañar) mm. Santa Isabel has a warmer climate resulting in an average annual evapotranspiration of 1041 mm, whereas the average annual evapotranspiration in Cañar is estimated at 934 mm. Both weather stations record an average annual rainfall deficit of -597 (Santa Isabel) and -458 (Cañar) mm. Agriculture without irrigation is almost impossible in both regions. In Santa Isabel irrigation is normally practiced in the period May through Janu-

ary, whereas in Cañar supplementary irrigation is applied almost throughout the entire year.

The soils (Bossuyt et al., 1997; Dercon et al., 1998) on the 13 experiment plots all have Vertic properties, which is very characteristic for all soils in the region. The topsoil, with a depth varying between 30 and 90 cm, has in general a fine and medium prismatic, angular blocky structure, with many fine pores and cracks. The latter are responsible that the hydraulic conductivity of the soil ranges between 0.1 and 0.5 m day<sup>-1</sup>. The conductivity of the soil medium, it is in the prismatic subangular blocks, is much lower and varies between <0.05 and 0.1 m day<sup>-1</sup>. The conductance of water in the soil is mainly controlled by the macropore system, in which most of the roots are present. The root system explores the soil matrix from the ma-

**Table 1: Soil properties of the experimental plots in La Unión, Dandán and Patococha**

Soil type	Orthic Calcic Vertisol	Calcic Vertisol	Vertic Luvisol
Location	La Unión, Santa Isabel	Dandán, Santa Isabel	Patococha, Cañar
Parent material	Sedimentary colluvium	Volcanic colluvium	Volcanic colluvium
Topography	slope ranging between 8 and 16%	slope ranging between 12 and 30%	slope of 15%
Altitude	1250 m a.s.l.	1750 m a.s.l.	3200 m a.s.l.
Effective soil depth	64 cm	80 cm	90 cm
Texture			
- root zone	sandy clay	clay loam	sandy clay
- below root zone	clay	clay	clay
Structure			
- root zone	cracks at the surface, friable to compact, moderate to strong prismatic, subangular blocky, with many interstitial pores	cracks at the surface, friable to compact, weakly to moderate prismatic, angular blocky, platy, with medium interstitial pores	cracks at the surface, friable to compact, granular to medium prismatic, subangular blocky, with medium interstitial pores
- below root zone	massive, compact	massive, compact	massive, compact
Bulk density			
- root zone	1.2 - 1.4 g cm <sup>-3</sup>	1.2 - 1.4 g cm <sup>-3</sup>	1.1 - 1.3 g cm <sup>-3</sup>
- below root zone	1.6 - 1.8 g cm <sup>-3</sup>	1.6 - 1.8 g cm <sup>-3</sup>	1.6 - 1.8 g cm <sup>-3</sup>
Soil infiltration rate:			
- root zone	moderate to moderate rapidly (2 - 12.5 cm hr <sup>-1</sup> )	moderately slow to moderate (0.5 - 6 cm hr <sup>-1</sup> )	moderate (2 - 6 cm hr <sup>-1</sup> )
- below root zone	very slow to slow (<0.1 - 0.5 cm hr <sup>-1</sup> )	very slow to slow (<0.1 - 0.5 cm hr <sup>-1</sup> )	very slow to slow (<0.1 - 0.5 cm hr <sup>-1</sup> )
Water holding capacity			
- root zone	12 - 15 cm m <sup>-1</sup> soil	14 - 17 cm m <sup>-1</sup> soil	13 - 18 cm m <sup>-1</sup> soil
- below root zone	10 - 11 cm m <sup>-1</sup> soil	10 - 11 cm m <sup>-1</sup> soil	10 - 11 cm m <sup>-1</sup> soil

cropores in between the structural elements, into the subangular blocky granulates. The subsoil is very massive, with very high clay content. The hydraulic conductivity of the subsoil is seldom larger than 0.01 m day<sup>-1</sup>. The fact that the topsoil is more permeable than the underlying clay/rock layer is that water quickly infiltrates to the bottom of the top layer, where it flows laterally to lower regions. The soil properties are given in detail in Table 1.

The field experiments in which the performance of the furrow irrigation systems was verified were conducted in the period June - September 1997. In the experiments, as much as possible, the farmer's mode of operation was followed. The farmer practice can be summarized as follows: water is deviated from the tertiary canal in the furrows simple by cutting a hole in the bank of the supply ditch. Water is allowed to flow into the furrow until water reaches the end of the furrow. At that moment the inflow of water is stopped by placing back the soil in the hole of the bank of the supply ditch. Sometimes farmers irrigate more than one furrow at the same time, depending from the available flow rate. The farmers do not use any tool to measure the inflow rate, neither do they have any device to maintain a constant inflow rate. In the experiments the necessary provisions were made so that the inflow rate was kept constant during the irrigation, and that the inflow rate could be measured. Flow rates varied between 0.48 to 3.00 l s<sup>-1</sup>. The length of the furrows ranged between 18.7 and 27.0 m, whereas the spacing between the furrows between 0.5 and 1.8 m. In most experimental plots a furrow spacing of 1.2 m was applied. Given the short length of the furrows, and the relative large inflow

rates, the time of cut-off was rather small, and varied between 1.4 and 8.97 minutes. The farmers are obliged to keep the time of cut-off small, because they are often obliged to irrigate 1 to 3 ha in 2 to 10 hours. Traditionally they irrigate a field with an area of 0.15 ha in a period less than 60 minutes.

**4. Results and discussion**

The results for the 13 experiments are summarized in Table 2. The information in the table is subdivided into system variables being properties measured at each experimental plot, and performance parameters, being indicators calculated on the basis of the value of the system variables, used for the evaluation of the system performance.

The system parameters reveal that the length of the furrows is short, varying between 18.7 and 27.0 m. The furrow spacing is large in the experiments 1 through 8, equal to 1.2 m, and in experiment 8 the spacing even was equal to 1.8 m. In the experiments 9 through 13, a more acceptable furrow spacing of 0.5 to 0.8 m was applied. The spacing is clearly correlated to the crop type. For onions and potatoes a rather small to normal furrow spacing is applied, whereas tomatoes are grown on ridges which are widely spaced. The furrows are closed at the end, so that the runoff ratio per definition is equal to 0 %. The two-point method yielded comparable values of the parameters of the Kostikov-Lewis infiltration function for the Orthic Calcic Vertisol and the Calcic Vertisol. Somewhat different values for the a parameter was derived for the Vertic Luvisol, where the infiltration characteristic was determined using the double ring infiltrometer. According to the classification system of Landon (1984) is the



**Table 2: Summary of experimental results**

Variable	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3	Exp. 4	Exp. 5	Exp. 6	Exp. 7
<b>SYSTEM PARAMETERS</b>							
Crop	A	A	A	A	A	A	A
Soil type	I	I	I	I	A	A	A
Infiltration parameters							
a = (-)	0.65741	0.65741	0.65741	0.65741	0.55506	0.55506	0.55506
k = (m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> min <sup>-a</sup> )	0.00069	0.00069	0.00069	0.00069	0.00020	0.00020	0.00020
f <sub>0</sub> = (m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	0.00074	0.00074	0.00074	0.00074	0.00053	0.00053	0.00053
Furrow type (open or blocked end)	Blocked	Blocked	Blocked	Blocked	Blocked	Blocked	Blocked
Furrow slope (m m <sup>-1</sup> )	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.012
Uniformity of furrow slope (%)	94	94	94	94	88	88	78
Furrow spacing (m)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.8
Shape factors width water surface in furrow: T = a <sub>1</sub> Y <sup>a2</sup>							
a <sub>1</sub>	1.098	1.098	1.072	1.098	1.151	1.151	1.100
a <sub>2</sub>	0.439	0.439	0.459	0.439	0.354	0.354	0.343
Shape factors wetted perimeter: P = b <sub>1</sub> Y <sup>b2</sup>							
b <sub>1</sub>	1.096	1.096	1.063	1.096	1.159	1.159	1.181
b <sub>2</sub>	0.463	0.463	0.467	0.463	0.352	0.352	0.359
Average wetted perimeter (m)	0.304	0.332	0.285	0.363	0.413	0.356	0.389
Average wetted width below the furrow bottom (m)	0.304	0.365	0.630	0.815	1.107	0.716	0.880
Uniformity of cross section (%)	40.84	40.12	61.72	48.23	76.04	84.82	72.45
Depth root zone (m)	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.55	0.47
Required depth (mm)	25	25	25	25	25	29	25
Soil water depth in root zone at FC (mm)	165	165	165	165	165	191	165
Soil water depth in root zone at t <sub>0</sub> (mm)	140	140	140	140	140	162	140
Flow rate (l s <sup>-1</sup> )	0.86	0.90	1.12	1.41	3.00	1.37	2.20
Length of furrow (m)	25.70	25.70	25.50	25.50	25.80	25.80	25.00
Cut-off time (min)	2.70	2.56	5.00	6.10	1.70	3.00	1.40
<b>PERFORMANCE PARAMETERS</b>							
Application efficiency (%)	100	100	100	100	100	100	100
Deep percolation ratio (%)	0	0	0	0	0	0	0
Runoff ratio (%)	0	0	0	0	0	0	0
Storage efficiency (%)	71.45	58.95	83.31	73.96	23.46	25.37	24.34
Uniformity coefficient (%)	80.48	87.82	84.33	82.91	79.00	85.54	64.06
Distribution uniformity (%)	69.13	79.38	73.48	71.83	71.80	87.22	53.91
Advance time (min)	2.70	2.60	4.90	5.80	1.70	3.00	1.40
Depletion time (min)	0.40	0.40	0.40	0.70	0.70	0.50	0.40
Average opportunity time (min)	4.80	4.20	5.26	6.05	3.74	4.06	3.66
Average infiltration depth (mm)	17.90	14.70	20.83	18.49	5.86	7.36	6.09
Maximum infiltration depth (mm)	21.50	17.10	24.10	21.40	7.40	9.30	8.90
Minimum infiltration depth (mm)	12.30	11.10	12.80	11.20	3.90	6.40	3.20
Over-irrigation (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Under-irrigation (mm)	7.14	10.26	4.17	6.51	19.14	21.64	18.91
Length of over-irrigation (m)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Length of under-irrigation (m)	25.70	25.70	25.50	25.50	25.80	25.80	25.00

**Table 2: Summary of experimental results (continued)**

Variable	Exp. 8	Exp. 9	Exp. 10	Exp. 11	Exp. 12	Exp. 13
<b>SYSTEM PARAMETERS</b>						
Crop	A	B	B	C	C	C
Soil type	I	II	II	III	III	III
Infiltration parameters						
a = (-)	0.84491	1.39682	1.39682	-0.6597	-0.6597	-0.6597
k = (m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> min <sup>-a</sup> )	0.00016	0.00007	0.00007	0.0025	0.0025	0.0025
f <sub>0</sub> = (m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	0.00096	0.00116	0.00116	0.0015	0.0015	0.0015
Furrow type (open or blocked end)	Blocked	Blocked	Blocked	Blocked	Blocked	Blocked
Furrow slope (m m <sup>-1</sup> )	0.013	0.006	0.006	0.031	0.040	0.040
Uniformity of furrow slope (%)	95	85	93	80	84	84
Furrow spacing (m)	1.2	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5
Shape factors width water surface in furrow: T = a <sub>1</sub> Y <sup>a2</sup>						
a <sub>1</sub>	1.099	1.194	1.194	1.122	1.080	1.080
a <sub>2</sub>	0.469	0.449	0.449	0.716	0.562	0.562
Shape factors wetted perimeter: P = b <sub>1</sub> Y <sup>b2</sup>						
b <sub>1</sub>	1.096	1.195	1.195	1.109	1.081	1.081
b <sub>2</sub>	0.479	0.464	0.464	0.720	0.574	0.547
Average wetted perimeter (m)	0.212	0.321	0.304	0.424	0.286	0.294
Average wetted width below the furrow bottom (m)	0.310	0.485	0.470	0.435	0.275	0.430
Uniformity of cross section (%)	84.46	91.13	77.52	39.50	28.60	30.30
Depth root zone (m)	0.47	0.25	0.25	0.40	0.40	0.40
Required depth (mm)	25	18	18	19	19	19
Soil water depth in root zone at FC (mm)	165	120	120	151	151	151
Soil water depth in root zone at t <sub>0</sub> (mm)	140	102	102	132	132	132
Flow rate (l s <sup>-1</sup> )	1.00	1.60	1.12	0.57	0.48	0.60
Length of furrow (m)	26.00	27.00	22.50	22.30	18.70	24.00
Cut-off time (min)	4.80	6.60	6.80	8.97	7.60	7.60
<b>PERFORMANCE PARAMETERS</b>						
Application efficiency (%)	85	70	71	80	72	74
Deep percolation ratio (%)	15	30	29	20	28	26
Runoff ratio (%)	0	0	0	0	0	0
Storage efficiency (%)	100	100	100	100	100	100
Uniformity coefficient (%)	77.47	93.52	89.91	73.06	71.47	72.52
Distribution uniformity (%)	51.08	91.14	80.08	26.98	30.16	30.82
Advance time (min)	4.80	6.50	6.80	9.00	7.60	7.60
Depletion time (min)	0.20	0.70	0.40	0.60	0.40	0.40
Average opportunity time (min)	5.95	7.54	7.05	6.60	5.25	5.12
Average infiltration depth (mm)	30.36	31.23	30.65	25.24	30.84	29.35
Maximum infiltration depth (mm)	42.60	36.30	34.50	35.30	44.10	42.90
Minimum infiltration depth (mm)	15.50	25.40	23.60	10.40	15.10	14.70
Over-irrigation (mm)	5.36	13.23	12.65	6.24	11.84	10.35
Under-irrigation (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Length of over-irrigation (m)	24.00	27.00	22.50	16.50	15.00	19.00
Length of under-irrigation (m)	2.00	0.00	0.00	5.80	3.70	5.00

soil-furrow system in the experiments 3, 4, 5, 6 and 7 suitable for flood irrigation, having a basic infiltration rate between 3.5 and 6.5 cm hr<sup>-1</sup>. The basic infiltration rate in cm hr<sup>-1</sup> is derived from the  $f_0$  value, divided by the average wet perimeter, multiplied by 6000 (60 for the conversion of min to hr, and 100 for the conversion of m to cm). The soil-furrow system in the other experiments is less suitable, due to the high value for the basic infiltration rate. According to Landon's classification system is the soil-furrow system in the experiments 1, 2, 8, 9 and 10 marginally suitable (basic infiltration rate ranges between 12.5 - 20 cm hr<sup>-1</sup>, too rapid), and unsuitable in the experiments 11, 12 and 13 (basic infiltration rate ranges between 20 - 30 cm hr<sup>-1</sup>, too rapid). The medium to high basic infiltration rate is due to the fabric of macropores and fine cracks in the topsoil. This network conducts the infiltrating water rather quickly to the interface between the topsoil and the sub soil, which is more clayey, massive and compact.

The slope of the furrows tested varied between 0.006 to 0.040 m m<sup>-1</sup>. In the community of La Unión and Dandán the furrow slope is fairly constant and ranging around 0.011 (1.1 %) and 0.006 (0.6 %) m m<sup>-1</sup>, respectively. The furrows tested in the community of Patococha, where mainly potatoes are grown, have an average slope of 0.040 m m<sup>-1</sup> (4.0 %). According to irrigation practice furrow grades should generally be 1.0 % or less, but can be as much as 3.0 % in arid areas where erosion from rainfall is not a hazard (Hart et al., 1981). In more humid areas, as is the case in Patococha, furrow grades should generally not exceed 0.3 %, however, grades up to 0.5 % may be permissible if the length are sufficiently short. At the other

hand a minimum grade of 0.03 to 0.05 % is necessary to assure adequate surface drainage. Based on those criteria, only the furrows tested in the community of Dandán have an average slope corresponding to the general furrow slope recommendations. The slope of the furrows tested in the community of La Unión is marginally suitable, whereas the furrows in Patococha have a too steep slope, to be workable. The uniformity of the furrow slope is acceptable and ranges between 80 and 95 %. The milder the slope of the furrow, the higher the uniformity of furrow slope.

The shape factors for the width of the water surface (T, m) and the wetted perimeter (P, m) are very comparable between the different experimental plots. Furrows in the tomatoes cultivation region of La Unión are wide (width of 1.2 m), flat and shallow. The flat parabolic shape often approximates that of a broad-shaped trapezium. The rather shallow, broad and mixed parabolic/trapezoidal shape has according to Merriam and Keller (1978), Reddy and Clyma (1983) and Gates and Clyma (1984) the following advantages: (i) with the medium to fine textures that are dominating in the region, it provides a good balance between lateral and downward wetting of the soil, and (ii) a decrease in flow causes a small corresponding decrease in water depth, but causes very little change in wetted width, and thus in the intake rate.

The furrow spacing applied in the communities of Dandán and Patococha, where respectively the crop's onion and potatoes are cultivated, is considerably smaller (between 0.5 and 0.8 m). In the fields with those crops, the furrows have a more pronounced parabolic shape. In Table 2 the average wetted diameter and the average wet-

ted width below the furrow bottom are presented. The ratio between the wetted width below the furrow bottom and the wetted perimeter varied from a minimum value of 0.94 to a maximum of 2.68. On the Orthic Calcic Vertisol (La Unión) the ratio had an average value of 1.87 (STD = 0.610), the Calcic Vertisol (Dandán) a value of 1.59 (STD = 0.063) and on the Vertic Luvisol an average value for the ratio of 1.15 (STD = 0.273) was observed. From those measurements it can be concluded that the lateral spreading is largest on the Orthic Calcic Vertisol, probably also because on those plots the spacing between the furrows was largest, and the bottom of the furrows was rather flat, resulting in a good lateral spreading of the water. The spreading of water under the furrow was smallest on the Vertic Luvisol, being the analyzed furrows with the steepest slope.

According to Zerihun et al. (1997) and Feyen and Zerihun (1998) in the calculation of the performance indicators, W, the spacing between the furrows was replaced by the width of the wetted soil, just beneath the furrows. Using this width, rather than the furrow spacing or the wetted perimeter, enabled to obtain for all cases examined consistent efficiency indicators. The uniformity of the furrow cross section is very low in the experiments 11, 12 and 13 (29 to 40 %), being the fields with the highest furrow slope, low to moderate in the experiments 1, 2, 3 and 4 (40 to 60 %), and acceptable in the remaining experiments (72 to 91 %). The large variability in uniformity of the wetted cross section can be explained by the following two facts: (i) the furrows are manually constructed using a hoe as cutting tool, and (ii) the furrows are not maintained during the irrigation season. Erosion and sedi-

mentation, and the development of weeds are responsible for the low uniformity in cross section, and for the fact that the value of the uniformity coefficient rather increases with time, than decreases.

The required depth was calculated on the basis of the depth of the root system, the plant allowable extraction factor, which for tomatoes and potatoes was taken equal to 0.30, and 0.25 for onion, and the readily available water depth in the root zone. Due to the shallow root depth and the low value for the plant allowable extraction, in general small values for the required application depth are used. The required application depth in the different experiments ranged from 18 to 29 mm. Those depths are more appropriate for sprinkler irrigation. Typical application depths in furrow irrigation range between 50 and 150 mm (Withers and Vipond, 1974). The small application depths are largely due to the low value chosen for the plant allowable extraction factor. It is a common practice to irrigate vegetable crops more frequently, and to apply a smaller dose each irrigation. However values between 0.25 and 0.30 for the plant allowable extraction factor is considered to be at the low side. From the comparison between the soil water depth in the root zone at field capacity and before the start of the irrigation, it can be concluded that in all experiments the soil water deficit was equal to the calculated application depth. As explained before, due to the small application depth, the soil at the start of the experiments was rather humid. The small application depths used also explains that when the irrigation interval exceeds 7 days, the crops start suffering from water stress, a common phenomenon in most irrigation projects of the region. If feasible

farmers apply more frequent, i.e., at an interval between 3 and 5 days, small water depths. The experimental conditions, under which the performance of the furrows was monitored, reflect very well the average field situation.

Flow rates used by the farmers are very variable, ranging between 0.48 and 3 l s<sup>-1</sup>. The same can be said for the time of cut-off, which ranges between 1.70 and 6.10 min. The time of cut-off is weakly, negatively related to the inflow rate. The regression coefficient (Rsq) is 0.4057. The variability of the inflow rate could not be related to any system parameter measured in the experimental plots, and is therefore, entirely controlled by external factors.

The flow rates applied are within the range of flow rates typically used for furrow systems. However, large flow rates, of the order of 3 l s<sup>-1</sup>, are normally applied to furrows with a slope of 0.1 % and a length of 300 m on fine textured soils. On fine textured soils having a slope of 0.6 % (experiments 9 and 10 in Dandán) flow rates should not exceed 1.5 l s<sup>-1</sup>, given a furrow length of 220 m. Similarly, for slopes of 1.1 to 1.3 % (experiments 1 through 8, La Unión) the flow rate should be limited to 0.75 l s<sup>-1</sup>, for a furrow length of 170 m, and for slopes of 4 % (experiments 11, 12 and 13, Patococha) the flow rate should be less than 0.25 l s<sup>-1</sup> given a furrow length of 90 m. Summarizing, the flow rate is in none of the experiments analyzed, in accor-

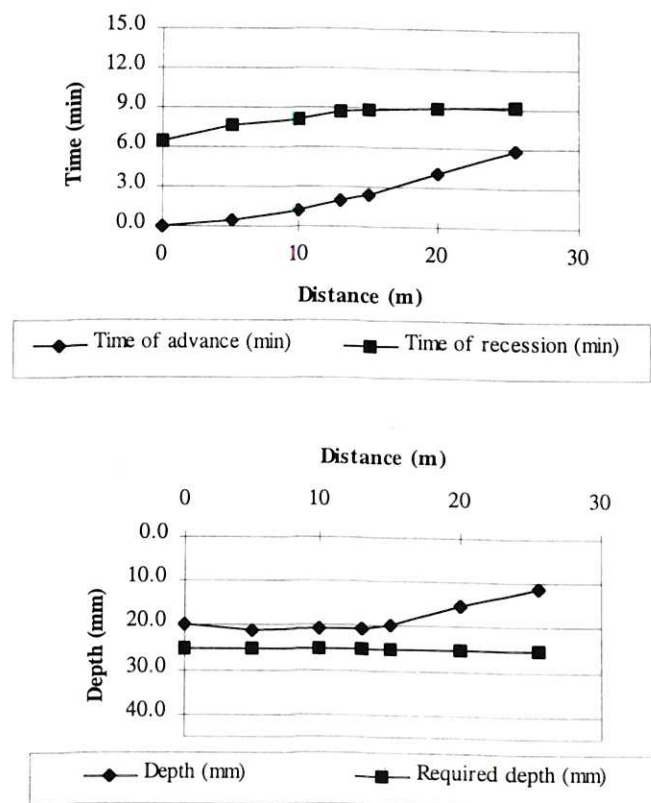


Fig. 3: Advance and recession curve (top), and the distribution of the applied water along the furrow and the required water depth (bottom) of experiment 4.

dance with the furrow slope and furrow length, according to the recommendations published by Withers and Vipond (1974).

On the basis of the application efficiency, the experiments can be divided in two groups. In the experiments 1 through 7, the  $E_a$  is equal to 100 %, whereas in the remaining experiments the  $E_a$  is less than 100 %. In the experiments with an  $E_a$  equal to 100 %, the value of the  $E_r$  is less than 100 %, and in the experiments with an  $E_a$  less than 100 %, the  $E_r$  is equal to 100 %. The experiments 1 through 7 can be classified as complete under-irrigation. In all those experiments the combination of inflow rate and time of

cut-off result in an average infiltrated depth smaller than the required depth (see Fig. 3). The combination of inflow rate and time of cut-off resulted in the experiments 8, 9 and 10 to complete over-irrigation (see Fig. 4), and the experiments 11, 12 and 13 can be classified as partly over-, partly under-irrigated (see Fig. 5).

The degree of under-irrigation in the experiments 1 through 7 varied between an  $E_r$  of 23 to 83 %. No relation was found between the volume of water applied (product between  $Q_0$  and  $t_{co}$ ) and the value of  $E_r$ . For the experiments 11, 12 and 13 an  $E_r$  of 100 % is calculated because the amount of over-irrigation exceeds the amount of un-

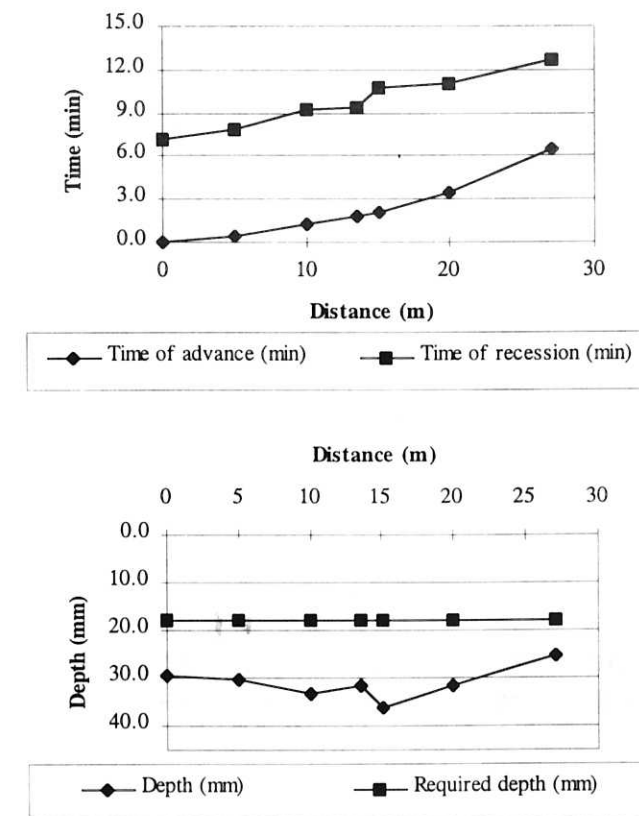
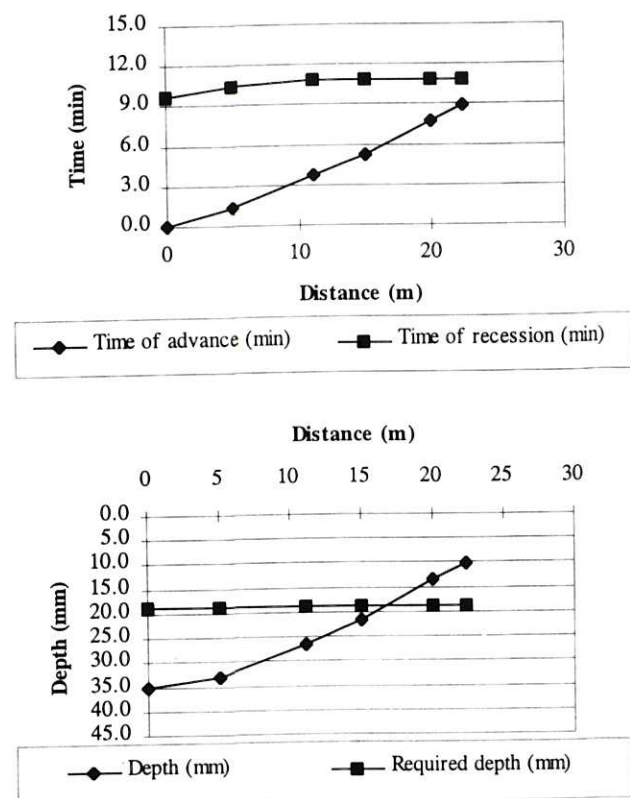


Fig. 4: Advance and recession curve (top), and the distribution of the applied water along the furrow and the required water depth (bottom) of experiment 9.

der-irrigation. In those experiments the average water depth applied exceeds the required depth, and only over a minor distance at the end of the furrow, 3 to 6 m, the average infiltrated water depth is less than the required depth. The  $E_a$  in the experiments 8 through 13 range between 70 and 85 %, which is acceptable for low technology input farming.

The uniformity coefficient (UCC) and the distribution uniformity (DU) are normal, with the UCC always larger than the DU, except in experiment 6. The value of UCC exceeds 80% in the experiments 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 and 10; exceeds a value of 70 % in the experiments 8, 11, 12 and 13. Only in experiment 7, UCC dropped to 64 %. The DU is highest in the experiment with com-



**Fig. 5: Advance and recession curve (top), and the distribution of the applied water along the furrow and the required water depth (bottom) of experiment 11.**

plete over-irrigation, followed by the experiments with complete under-irrigation. The value of DU is lowest in the experiments 11, 12 and 13 with partly over- and partly under-irrigation. The time of cut-off coincides in

most experiments with the time of advance, being the traditional mode of operation used by the farming community. The depletion time, being the time interval between the time of cut-off and the start of the recession curve

is small, due to the moderate to rapid infiltration rate of the topsoil. The rather rapid infiltration explains the deep percolation losses in the experiments 8 through 13. The deep percolation ratio in those experiments varied from 15 to 30 %, corresponding to an average water depth of 5 to 13 mm. On the basis of the profile properties the infiltrating water reaching the bottom of the root zone does not penetrate in the underlying compact clay horizon, but is lost as subsurface flow. Subsurface flow is an important characteristic of the Vertic soils in the region, which most of them at shallow depth are underlain by a horizon with low permeability. As can be seen from the performance parameters average opportunity time and average infiltration depth, water moves rather quickly to a large depth, where it disappears as subsurface flow to lower altitudes. This was not the case in the experiments 1 through 7, where the combination of inflow rate, time of cut-off and width of the furrow spacing, resulted in a too low average infiltration depth.

Summarizing, the 13 experiments were run under normal field conditions, respecting as much as possible the practice of the indigenous farmers. The farmers have no knowledge of the processes underlying the advance, recession and infiltration, and how those parameters are related to the decision variables inflow rate, furrow length and time of cut-off. On the basis of the application efficiency found in the different experiments, one would have the tendency to conclude that the studied furrow irrigation systems perform well in general. However, on the basis of the other performance indicators the conclusion looks less positive. The combination of inflow rate and time of cut-off, results in all experiments in the community of La Unión,

the region where only tomatoes are cultivated, and where the spacing between the furrows is large, to complete under-irrigation. Due to the medium to moderate slope and the shallow and flat parabolic shape of the furrows, lateral spreading of the water is more optimal, resulting into a lower vertical displacement of the water and zero deep percolation ratio. In the communities of Dandán and Patococha, where onion and potatoes are grown, the average slope of the furrows larger, the cross-section of the furrows smaller, and the time of cut-off larger, the  $E_a$  is less than 100 %, due to deep percolation losses.

The non-traditional combination between soil type, furrow length, furrow slope, inflow rate, and time of cut-off results into a rather unique system of furrow irrigation, that does not fit any of the indicative tables available in literature (Withers and Vipond, 1974; USDA, 1979; Hart et al, 1987; Walker and Skogerboe, 1987; Cuenca, 1989; Fanworth, 1997). Although the application efficiency seems of acceptable to good level, the combination of factors results often in complete under-irrigation or deep percolation losses, which mainly are due to the Vertic nature of the topsoil. The basic infiltration rate of the topsoil is rather high, making these soils less suitable for flood irrigation. Due to the relative short time of cut-off and short length of the furrow, the overall performance of the irrigation practice is moderate to acceptable. The performance of the irrigation in the community of La Unión can be improved by increasing the flow rate and the time of cut-off, so that sufficient water is stored in the blocked-end furrows to meet the required water depth over the entire length of the furrow. The same effect can be obtained by decreasing the spacing be-

tween the furrows. The  $E_a$  of the tested furrows in Dandán and Patococha can be increased, without effecting  $E_r$ , by decreasing slightly the time of cut-off.

In the three locations where furrows were tested it is recommended to (i) provide simple tools (e.g., siphons) to the farmers so that they can control the inflow rate, and (ii) increase the interval between two successive irrigations and the application depth. This however, will have a direct effect on the irrigation schedule and the water distribution in the secondary and primary irrigation canals, and is as such beyond the control of the farmer. Given the soil properties, the topography, the irregular shape of the fields and the short length of the furrows, furrow irrigation is less suitable, and should be replaced by a hose-fed, small mobile sprinklers, mounted on a small tripod. Such systems are not costly, operate on pressures as low as 35 to 70 kPa (easily to obtain by gravity in the Sierra by the differences in altitude) and produce relatively uniform wetting, provided that the sprinklers are moved in a systematic grid pattern with sufficient overlap (Keller and Bliesner, 1990). Sporadically, farmers start exchanging step by step their furrow system with a sprinkle irrigation system. However, still a long way has to be gone, before one can speak of a widespread conversion.

### 5. Conclusions

The indigenous communities, farming slopes in the Southern Sierra steeper than 12 %, start applying more and more supplementary irrigation to bridge the dry season. The most widely applied irrigation system is furrow irrigation fed from zig-zag supply ditches. The furrows are laid on the contours, and the zig-zag supply ditch orthogo-

nal to the main slope. The furrow irrigation system is simple and cheap. During the irrigation season, at least one person is full-time occupied by the irrigation, due to the short application time per furrow, and because the furrows are in most instances irrigated individually. The latter is not such a problem because labor is cheap and in abundance. The farmers have little irrigation experience, and they learn more from their neighbor than from any extension service. The system of operation is quite simple consisting of the application of a small amount of water during a short time of application in each of the blocked-end furrows. When the water reaches the end of the furrow the water is diverted to the next furrow. The travel time to reach the end of the furrows is small and varies between 2 and 10 minutes. The interval between successive irrigations is very variable from project to project and within projects, and can vary from 3 and 15 days, depending on the operational rules and the flexibility of the distribution system. Crops in schemes with an irrigation interval larger than 7 days are subject to water stress during the growing season.

The paper gives a quantitative analysis of the field furrow irrigation systems, in three different communities, which are representative for the provinces of Azuay and Cañar, in the Southern Sierra of Ecuador. The main objectives of the study were to quantify the irrigation process as applied by the indigenous farmers and to identify what measures eventually can be taken to improve the system performance, should there be a need for. The study yielded a complete quantification of the system parameters on 13 experimental field plots, and enabled the computation of a series of performance indicators. Complete irrigation is sel-

dom reached by lack of information and measuring tools and likely also because the pattern of water delivery to the tertiary unit does not match the demand pattern at the tertiary unit. Fields are either under- or over-irrigated. Losses in the under-irrigated plots are equal to zero, also because all furrows are closed at the end. In the over-irrigated plots, losses are entirely due to deep percolation, which in most cases, due to the profile composition, results in lateral subsurface flow.

The irrigation performance in all studied cases can be improved by better instructing the farmers, providing to the farmers simple tools (e.g., siphons, gated-pipes, and so) for regulation the flow from the supply ditch into the individual furrows, and by telling to the farmers the minimum required time of cut-off, so that the water entering the furrow meets the demand.

The analysis also revealed that the soil, topography and the size of the fields are not very suitable for surface

irrigation and that much better results could be obtained by replacing the furrow irrigation system by hose-fed, small mobile sprinkler systems.

### 6. Acknowledgments

This research was supported by funds from the Inter-American Development Bank, through FUNDACYT (Ecuador), under the project "Métodos de riego y control de erosión en suelos andinos" (grant P-BID-130). The authors wish to thank the farmers on which fields the experiments were conducted. Further the authors are very grateful for the technical staff of PROMAS, L. Van Elsen, J. Vanreusel, G. García and C. Ulloa for their assistance in the collection of the field data. Last but not least, the authors are indebted to G. Dercon for his useful comments and suggestions on the soil interpretation and his valuable assistance in fieldwork, and B. De Bièvre for the interpretation of field data and for carefully verifying the manuscript.

### 7. References

- Bossuyt, B., G. Dercon, B. De Bièvre, F. Cisneros and J. Deckers, 1997. Agro-ecological zoning of the Austro-Ecuatoriano. Diagnostic planning for nature conservation and sustainable land use. *The Land*, 1(3):159-170.
- Cuenca, R.H., 1989. Irrigation systems design: an engineering approach. Prentice-Hall, Inc., N.J., USA, 552pp.
- CREA, 1993. Indicadores básicos de la región de Azuay. Cañar y Morona de Santiago, Cuenca, Ecuador.
- Deckers, J.A., O.C. Spaargaren and F.O. Nachtergaele, 1998. World Reference Base for Soil Resources (in press).
- Dercon, G., B. Bossuyt, B. De Bièvre, F. Cisneros and J. Deckers, 1998. Zonificación agroecológica del Austro-Ecuatoriano. PROMAS, Ediciones Universitario, Cuenca, Ecuador, 148pp.

- Elliot, R.L. and W.R. Walker, 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASAE*, 25(2):396-400.
- Farnworth, J., 1997. *Agro Info: guidelines for world crop and livestock production*. John Wiley & Sons, NY, USA, 576pp.
- Feyen, J. and D. Zerihun, 1998. Assessment of the performance of border and furrow irrigation systems and the relationship between performance indicators and system variables. *Agricultural Water Management* (in press).
- Gates, T.K. and W. Clyma, 1984. Designing furrow irrigation systems for improved seasonal performance. *Trans. ASAE*, 27(6):1817-1824.
- Hart, W.E., H.G. Collins, G. Woodward and A.S. Humpherys, 1980. Design and operation of gravity or surface systems. In: *Design and operation of farm irrigation systems* (Jensen, M.E., ed.). ASAE Monograph, 3:501-580.
- Jury, W.A., W.R. Gardner and W.H. Gardner, 1991. *Soil physics*. Fifth Edition. John Wiley and Sons, Inc., NY, USA.
- Keller, J. and D.D. Biesner, 1990. *Sprinkle and trickle irrigation*. Van Nostrand Reinhold, NY, USA, 652pp.
- Landon, J.R. (ed.), 1984. *Tropical soil manual*. Booker Tate, Ltd., UK.
- Merriam, J.L. and J. Keller, 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Reddy, J.M. and W. Clyma, 1983. Optimizing furrow irrigation runoff recovery systems. *Trans. ASAE*, 26(4):1050-1056 and 1063.
- Solomon, K., 1988. *Irrigation systems and water application efficiencies*. Irrigation Notes, Center for Irrigation Technology Publication No. 880104, Fresno, CA, USA.
- Till, M.R. and M.G. Bos, 1985. The influence of uniformity and leaching on the field application efficiency. *ICID Bulletin*, 34(1):32-35, and 60.
- USDA, 1979. *Furrow irrigation*. Chapter 5, Sect. 15 (Irrigation). Soil Conservation Service National Engineering Handbook, Washington DC, USA.
- Walker, W.R. and G.V. Skogerboe, 1987. *Surface irrigation: theory and practice*. Prentice Hall, Inc., NJ, USA, 386pp.
- Zerihun, D., J. Feyen and J.M. Reddy, 1997. Empirical functions for dependent furrow irrigation variables: 1. Methodology and equations. *Irrig. Sci.*, 17:111-120.



**RESUMEN**

**L**a evolución del concepto de manejo de cuencas y las estrategias para lograr impactos a favor del ambiente, se ha demostrado que están relacionados con la incorporación e integración del factor social, tanto en el proceso de la planificación como en la implementación y seguimiento de las actividades. El enfoque antropocéntrico facilitará la determinación de acciones e interacciones entre el hombre y la naturaleza, por lo tanto el manejo de cuencas tendrá como propósito que el hombre tenga el interés, la capacidad y los medios para realizar el manejo sostenible de los recursos naturales.

Un reto que ha tenido que superar el manejo de cuencas ha sido pasar de la planificación a la ejecución, para lograr esta situación se han llevado a la práctica algunas estrategias claves basadas en procesos participativos y de gestión ambiental, tales como:

- Integrar a las poblaciones de las cuencas en los procesos de toma de decisiones, de planificación, de implementación y de monitoreo de las cuencas.
- Concientizar, motivar y capacitar a las poblaciones en la importancia de la gestión ambiental por medio de cuencas, enfatizando en los beneficios a lograr tanto al medio rural como urbano.
- Crear o fortalecer las capacidades de gestión, para organizar a las

\* Presentado en el II Seminario Taller Latinoamericano de Modelos de Ecodesarrollo. Cuenca-Ciudad, Cuenca, Ecuador, 6-8 de abril de 1998.

\*\* Ing. Agríc. PhD, CATIE, Turrialba, Costa Rica.

comunidades, para lograr recursos económicos y para administrar la ejecución de proyectos.

- Promover la participación de organizaciones locales y trabajar con enfoques de microcuencas, asociadas a problemáticas de interés directo de las comunidades y beneficiarios directos.
- Establecer mecanismos para definir la valoración de un manejo sostenible de las cuencas, involucrando posibles servicios ambientales, que redunden en la internalización de los beneficios del manejo de las cuencas, a favor de sus comunidades.

Estos aspectos de gestión se han llevado a cabo en varios proyectos de manejo de cuencas que el CATIE ha contribuido a ejecutar con diversas instituciones nacionales de los países de América Central y Panamá.

## 1. INTRODUCCION

En los últimos años los procesos de la degradación de los recursos naturales y los problemas ambientales han creado serios impactos en el bienestar del hombre, al grado de generar muchas preocupaciones, tanto por los países desarrollados y aquellos que están en vías del desarrollo, llegando a condiciones que solo en acción conjunta harían viables la aplicación de soluciones directas y reales. Foros, reuniones y acuerdos nacionales, regionales, sectoriales o mundiales están demostrando que los problemas no serán fáciles de resolver sin estrategias bien elaboradas y que respondan a las expectativas de los beneficiarios de planes y proyectos dirigidos a lograr la sostenibilidad de los recursos naturales y mantener la calidad ambiental.

Sin embargo estos procesos no han logrado revertirse, ni controlarse, por el contrario a pesar de haberse implementado importantes proyectos, parece que otros factores limitan resultados más favorables. Ya en muchas regiones la deforestación a llegado a casi eliminar la cobertura arbórea natural, como en Haití y El Salvador, en otros casos la tasa de deforestación continua casi estable.

También la erosión del suelo por acción de las lluvias continua generando importantes problemas en las tierras productivas y por la hidrodinámica del material erosionado que afecta los embalses hidroenergéticos, de agua potable o riego. Este es uno de los problemas, que indican la degradación del suelo, que a pesar de haber aplicado muchos recursos en proyectos de conservación de suelos, su contribución no ha sido suficiente o por lo menos sus impactos han sido poco relevantes.

En forma análoga el recurso agua "elemento vital para vida" esta sufriendo serios problemas y aún no ha logrado sensibilizar, en el nivel requerido, la atención de los políticos, decisores, planificadores, técnicos, científicos y de la sociedad en general. Existen algunos proyectos exitosos que están contribuyendo significativamente a mantener o mejorar la calidad del agua, a resolver los conflictos entre demanda y oferta de agua disponible, y a resolver problemas de inundaciones y sequías, por ejemplo en San Marcos de Ocotepeque, Honduras; en la Cuenca del Río Las Cañas en El Salvador; en la Cuenca del Río Purires de Costa Rica.

La interacción de la problemática de estos recursos naturales claves para muchos países, requiere de un enfo-

que de sistemas, estableciendo que el factor social tanto del medio rural como urbano, es el que movilizará las acciones e intervenciones sobre el medio ambiente y la naturaleza. La ciudad demanda una serie de servicios, productos y materia prima del sistema cuenca (agua, madera, productos agropecuarios, lugares de recreación, oxígeno, etc.) y de otro lado las poblaciones rurales distribuidas en las cuencas demandan servicios y productos de las ciudades (productos industriales, comunicación, comercio, maquinaria y equipo, etc.).

Estas interacciones del sistema cuenca-ciudad ocurren en una cuenca, subcuenca o microcuenca, grande, mediana o pequeña, que requieren un análisis con enfoque integral, de visión interdisciplinaria, con aplicación de principios de equidad, por medio de procesos participativos y criterios de sostenibilidad. Una cuenca mal manejada puede afectar significativamente a las ciudades ubicadas en ella o que dependen de la misma.

Muchas de las inundaciones y desastres similares de grandes ciudades o asentamientos menores ubicados en las partes medias o bajas de las cuencas, sufren el impacto por la deforestación de las tierras altas, estos desastres también afectan la infraestructura de comunicaciones y tierras dedicadas a la producción agropecuaria.

La falta de agua de muchas ciudades o la mala calidad disponible, depende de como se maneje el sistema hídrico de la cuenca (contaminación por agroquímicos excesivos, vertimiento de residuos, arrastre de sólidos, etc.). Los efectos se asocian a los elevados costos de tratamiento de las aguas o costos para controlar epidemias y enfermedades de las poblaciones.

El racionamiento de la electricidad generada por la disminución de la productividad de las hidroeléctricas, muchas veces se debe a que en la cuenca receptora se ha producido una alteración hidrológica que redundan en la sedimentación del embalse y por lo tanto hay menor capacidad de almacenamiento de agua, o porque hay menor infiltración y por lo tanto el flujo subsuperficial no es suficiente para alimentar embalses, o hay menor recarga de acuíferos que sirven como fuentes complementarias de agua o porque se produce mayor escorrentía superficial en eventos distribuidos en forma irregular en el tiempo.

Esta problemática orientada a visualizar algunos casos es mucho más amplia y requiere un análisis detallado para sustentar las posibles decisiones hacia los elementos biofísicos, sin embargo, la solución requiere de una visión y enfoque diferente. En general los casos mencionados anteriormente están vinculados tradicionalmente, sólo a la implementación de proyectos de conservación de suelos, de reforestación o de manejo hidrológico. En primera instancia haría falta un ordenamiento según el nivel de intervención (nacional, regional, local) y luego el planeamiento estratégico, pero con la visión de formar o fortalecer la capacidad de gestión y de implementación del hombre (sociedad organizada) para que por medio de procesos participativos alcancen logros sostenibles favorables al ambiente y al bienestar de las comunidades rurales y urbanas.

En esta visión y enfoque son necesarios el diseño y la implementación de estrategias ambientales basadas en la participación de los habitantes de las cuencas y su entorno, integrando a las poblaciones de las ciudades y de los asentamientos humanos rurales.

## 2. CONCEPTOS MODERNOS DE MANEJO DE CUENCAS

El concepto de manejo de cuencas ha evolucionado significativamente en los últimos años, el proceso señala que se inicia con un enfoque hidrológico hasta el planteamiento integral con base en el factor social como eje para lograr la sostenibilidad.

Este proceso permitió evaluar las necesidades metodológicas, técnicas o prácticas, estratégicas y enfoques, considerando a la cuenca como un sistema natural compuesto por elementos biofísicos y socioeconómicos que interactúan entre sí y desarrollan interrelaciones diversas, presentando diferentes dinámicas que evolucionan por efecto de las fuerzas naturales y por la intervención del hombre. El hombre modifica la cobertura vegetal y por esta intervención, por ejemplo, el suelo descubierto es susceptible de la erosión hídrica o eólica. Esta relación no implica necesariamente aplicar conceptos de preservación, se trata de valorar el recurso, analizar las condiciones y aplicar prácticas de aprovechamiento que permitan la conservación de los recursos.

Durante las primeras etapas el concepto del manejo de cuencas estuvo orientado a proteger el recurso agua, en su calidad y cantidad, un enfoque importante para garantizar la demanda del recurso para diferentes usos, entre las relaciones básicas de intervención se consideraban el bosque o la cobertura forestal y la producción de agua. Muchos proyectos importantes de almacenamiento de agua o aprovechamiento hidrológico estaban relacionados a proyectos de riego y de electricidad.

En la etapa intermedia el concepto de manejo de cuencas plantea la necesi-

dad de una visión integral de la problemática del manejo de los recursos naturales. Se plantea la necesidad del manejo integral de los recursos y de lograr la sostenibilidad de los mismos. Hasta este momento, la principal preocupación eran los recursos naturales y los planes de ordenamiento y manejo que se orientaban a establecer políticas de uso de los recursos y proyectos específicos para lograr su aprovechamiento racional.

La experiencia demostró, hasta estos momentos, que las cuencas seguían degradándose y que muchos planes de manejo solo quedaban en trabajos teóricos y se lograban pocos beneficios de los proyectos y planes implementados. Diversas preocupaciones en la planificación, implementación y evaluación, originan la necesidad de reorientar el enfoque, tomando como base los factores sociales.

La etapa reciente plantea que el manejo de los recursos naturales y todo lo que ocurre en el sistema de la cuenca hidrográfica, depende de las decisiones y acciones que realiza el hombre. Por lo tanto hay que crear capacidades, aptitudes y actitudes para que el hombre haga un uso sostenible de los recursos naturales. Esta posición implica crear una capacidad de gestión del hombre para que pueda lograr su bienestar y mantener la calidad ambiental del sistema cuenca.

Esta nueva visión y enfoque del manejo de cuencas además se integra con elementos de planificación e implementación que están acordes con los principios teóricos y prácticos del desarrollo sostenible. En este sentido se aplican los métodos de planificación estratégica, enfatizando los principios de participación y autogestión, también se armonizan con los criterios de

ordenamiento ambiental, ecológico y territorial. Un elemento importante que se ha considerado clave para el éxito de los proyectos y planes de manejo de cuencas ha sido el integrar la intervención a nivel de finca o parcela "**la célula del manejo de la cuenca**" en realidad esta es la unidad de manejo e intervención práctica y la cuenca como sistema es la unidad de planificación, de análisis de integración y evaluación global.

Estos conceptos indican que **el manejo de cuencas requiere de la participación directa de la población total**, con un adecuado sistema de extensión, educación, y mecanismos de coordinación institucional. Se contribuye así a fortalecer las acciones de manejo de cuencas a nivel de campo, para demostrar resultados y garantizando su continuidad y efectividad en el sistema. Por consiguiente es válido proponer el principio de: "**la implementación de cualquier acción de manejo de cuencas reside en su impacto a nivel de campo**" y para materializar esto se requiere de la "**mobilización y formación del poder social para globalizar los efectos en la finca y en el sistema**".

El manejo de cuencas y sus actividades han evolucionado según los ámbitos del desarrollo regional y de las decisiones de cada país, el concepto vertebral se mantiene, no obstante se han adoptado enfoques y metodologías para lograr una viabilidad más inmediata para pasar de la gestión teórica a las intervenciones prácticas. Las experiencias del CATIE en este sentido reúnen la evolución de los conceptos de manejo de cuencas aplicadas en más de 15 años de trabajo en la región de Centroamérica y Panamá.

A continuación se describen los principales aspectos modernos que se han

utilizado en la planificación e implementación:

### a) Enfoque antropocéntrico

Se considera que el hombre constituye el objetivo central del manejo de cuencas, porque de las decisiones de él dependen las acciones de manejar, conservar y proteger los recursos naturales. Por lo tanto se trata de entender por qué realiza malas prácticas, por qué no adopta las tecnologías disponibles o por qué no gestiona las soluciones en las cuencas. Se propone que en los nuevos enfoques el agricultor y los beneficiarios del manejo de cuencas se apropien de las tecnologías de manejo de cuencas y puedan lograr la sostenibilidad de los recursos naturales y una calidad de vida cada vez mejor para la población. La validación de este enfoque se demuestra en la rehabilitación de las microcuencas río Las Cañas (El Salvador) y río Nueve Pozas y Cerro Colopeca (Honduras).

### b) Visión gerencial

Es necesario crear capacidades de autogestión y autosostenibilidad, a todos los niveles participativos del manejo de cuencas. Decisores, planificadores, extensionistas, agricultores y comunidad requieren de una capacitación en aspectos gerenciales para que puedan propiciar las soluciones y gestionar el desarrollo económico y social inherente a la sociedad y al medio ambiente. Esta actitud es necesaria por cuanto el estado moderno no posee suficientes recursos para garantizar la atención integral y continua a la población. Asimismo se fortalecen los métodos para crear la capacidad de organización comunal y empresarial, formación de liderazgo y poder social. Los resultados en la rehabilitación de las microcuencas río



Nueve Pozas y Cerro Colopeca demuestran esta nueva visión.

**c) Participación responsable**

Se promueve que la participación de los agricultores, beneficiarios y actores del manejo de cuencas participen desde el inicio de las acciones, que sean de modalidad activa y responsable. Este es un "proceso" que debe ser de abajo hacia arriba y continuo hasta lograr el empoderamiento local y la conducción directa del manejo de cuencas con un facilitador institucional gubernamental. Validada en los estudios de caso como: río Las Cañas (El Salvador), río Nueve Pozas y Cerro Colopeca (Honduras), río Caldera (Panamá), río Virilla (Costa Rica).

**d) Extensión humanizada**

La extensión es la base estratégica para lograr impactos en el manejo de cuencas, pero esta debe superar los métodos y propósitos convencionales, se requiere una atención dirigida al hombre a comprender sus realidades, problemas y necesidades, pero principalmente a solucionar sus problemas. Esta debe estar dirigida a lograr actitudes positivas sobre el uso de los recursos naturales, la agricultura y el medio ambiente, se promueve una extensión al servicio del hombre, en búsqueda de su bienestar. Se distinguen resultados con la red de promotores de las microcuencas río Nueve Pozas y Cerro Colopeca de Honduras, y con los agricultores extensionistas de la cuenca del río Las Cañas de El Salvador.

**e) Coordinación interinstitucional local**

Se fortalece la necesidad de mecanismos de coordinación interinstitucional

central, que debe armonizar y complementar la coordinación local con base a los interesados inmediatos del manejo de cuencas. Esta debe integrar los lineamientos centrales de arriba hacia abajo con las acciones directas de las instituciones que estén localmente trabajando y que establecen las formas de intervención a nivel de campo. Aplicado a todos los estudios mencionados anteriormente.

**f) Finca como unidad de intervención**

En primera instancia es necesario clarificar que se mantiene la visión integral de la cuenca como sistema, como unidad de análisis para la planificación y sobre todo para evaluar los efectos e impactos globales. Pero en términos prácticos la unidad de manejo e intervención es la finca, este es el lugar principal de encuentro con el agricultor, allí se implementan las prácticas de producción y conservación y allí se inician a valorar los resultados del manejo de cuencas, otros espacios físicos y socioeconómicos importantes toman el nombre de complejos y unidades territoriales básicas (control de cárcavas y torrentes, áreas protegidas, etc.). En la finca se tienen que aplicar las tecnologías forestales, agroforestales, conservación de suelos, manejo de agua, manejo de cultivos, control de agroquímicos, agricultura orgánica, etc. **"por qué no utilizar el concepto de manejo de cuencas como un mecanismo horizontal para esta integración disciplinaria a nivel de finca"**. En la finca se aplican las decisiones tomadas para manejar el uso de la tierra y de ella dependen las subsistencias de las familias y el desarrollo agropecuario. La integración de fincas bien manejadas en un marco de planificación de los sistemas de producción de la cuenca, permiti-

rán un proceso sostenible del manejo de las cuencas.

A continuación se presenta el Cuadro N°1 que permite analizar los probables cambios que están ocurriendo con algunos conceptos de manejo de

cuencas y sustentan la necesidad de adoptar criterios modernos para fortalecer la base conceptual de los resultados y necesidad de acciones sostenibles, para garantizar la calidad de vida de las poblaciones y el uso sostenible de los recursos naturales.

**Cuadro N°1. Variación y ajustes a los conceptos de manejo de cuencas**

ANTES	ACTUAL	FUTURO
Coordinación institucional centralizada.	Coordinación institucional descentralizada.	Coordinación institucional integrado en base a acciones locales (ejemplo municipios).
Enfoque dirigido al manejo de los recursos naturales.	Enfoque del manejo de los recursos naturales en función de las necesidades del hombre.	Enfoque dirigido a mantener la calidad de vida y el equilibrio ambiental rural y urbano. El agua como recurso estratégico. Valorar servicios ambientales.
Planificación Integral de grandes áreas con diversos componentes y necesidades muy altas de recursos económicos	Planificación dirigida a pequeñas cuencas con problemas específicos e implementación de planes a nivel de campo	Implementación de planes operativos integrando los aspectos ambientales con la participación de la comunidad
Cuenca como unidad de planificación y manejo	Cuenca como unidad de análisis y planificación y finca como unidad de manejo	Cuenca como unidad de planificación, finca como unidad de manejo y cuenca como unidad de análisis y monitoreo ambiental. Intervención en unidades territoriales bases.
Instituciones nacionales responsables del manejo de cuencas	Instituciones nacionales gubernamentales, instituciones no gubernamentales, y productores facilitando la implementación del manejo de cuencas	Instituciones locales, municipalidad, comunidad organizada y productores gestionando, implementando y monitoreando el manejo de cuencas
Sistemas de extensión con bajo nivel de integración a las actividades de manejo de cuencas	Sistemas de extensión integrados a la planificación e implementación de planes de manejo de cuencas	Sistemas de extensión formales y no formales (red de productores) integrados a la implementación de planes de manejo de cuencas
Análisis de los problemas con visión puntual y sólo soluciones correctivas	Análisis de los problemas con visión integral, acciones correctivas y acciones preventivas	Análisis de los problemas con visión integral y acciones preventivas
Planes de manejo de cuencas diseñados de acuerdo a sistemas normativos con procesos de arriba hacia abajo	Planes de manejo de cuencas diseñados en base a características biofísicas y socioeconómicas y consultas a la comunidad	Manejo de cuencas en función de la planificación estratégica situacional con participación activa y responsable de las comunidades y los productores

En síntesis la nueva visión del concepto de manejo de cuencas plantea:

Considerar a la cuenca como un **"sistema global de interacciones e interrelaciones"** de componentes biológicos, físicos, sociales y económicos, en el cual la unidad de análisis, planificación y evaluación global es la cuenca y la unidad de manejo, intervención y evaluación en sitio de la finca (Fig. 1).

La **"visión integral"** para atender la problemática y soluciones, valorando los efectos en el sitio y fuera del sitio de intervención, estableciendo las relaciones entre las partes altas y bajas de la cuenca, definiendo las relaciones de reciprocidad entre agricultores y beneficiarios del manejo de la cuenca.

El desarrollo de **"acciones coherentes"** entre la capacidad de soporte de las cuencas, su vocación y las necesidades de las poblaciones, considerando que existe una dinámica físico natural que depende de las interacciones con las variables sociales, económicas y culturales.

Establecer la interacción en las cuencas manejando los factores sociales **"enfoque antropocéntrico"** mediante el cual se trata de manejar las cuencas en función a los intereses del hombre. La estrategia de campo es la extensión y educación dirigida a objetivos multipropósitos del medio rural y urbano.

Considerar que en la cuenca existen **"interacciones"** entre las partes altas y bajas. Un problema en la parte alta puede influir negativamente en las partes medias o bajas, por lo tanto debe plantearse un ordenamiento orientado a intervenir primero las partes altas, considerando la relación causa-efecto. En este enfoque, también se considera que una intervención

adecuada sobre las partes planas, disminuirían las presiones sobre las laderas y tierras frágiles (Fig. 2).

La **"participación y coordinación institucional"** a nivel local para resolver la problemática social y ambiental (servicios e infraestructura básica que son necesidades urgentes). La participación se orienta con responsabilidad en todo el proceso, facilitando la toma de decisiones en un proceso de abajo hacia arriba, creando las condiciones para la continuidad de los proyectos mediante la organización comunitaria y un mecanismo de seguimiento institucional formal.

El desarrollo de la capacidad de **"gestión e intervención interdisciplinaria"**, en la planificación, implementación y evaluación gerencial y ambiental de la cuenca. Los aspectos de énfasis en la gestión constituyen; la obtención de recursos y la estrategia para lograr un valor agregado a la producción primaria y uso de los recursos, fortaleciendo la economía del medio rural y las ciudades.

### 3. PROBLEMAS Y VOCACION DE LAS CUENCAS

#### 3.1. PROBLEMAS

Los problemas que están relacionados con el manejo de cuencas son diversos y se originan en causas biofísicas o socioeconómicas. La mayoría de los problemas están asociados a la deforestación o al uso inadecuado de la tierra, de allí se desprenden efectos o consecuencias que generan otros problemas como son la erosión, la contaminación de aguas, inundaciones, sequías, compactación de suelos, entre otros. Una forma de apreciar en forma sintética la problemática es mediante la relación causa y efecto, como se aprecia en el cuadro 2.

**Cuadro N°2. Ejemplo de problemas de las cuencas hidrográficas**

Problema	Causa/Origen	Efecto/Consecuencia
Contaminación de las aguas	Puede ser de origen físico, químico o biológico:  Uso inapropiado de agroquímicos. Vertimientos de residuos sin tratamiento. Remoción de partículas y masas de suelo.	Incremento en el costo para el tratamiento de las aguas. Enfermedades. Ausencia de vida acuática. Sedimentación.
Erosión del suelo	Deforestación. Uso inadecuado de la tierra. Manejo inapropiado de prácticas para la producción. Fragilidad natural	Desertificación. Conflictos por sobreuso Baja de la productividad de la tierra. Mayor uso de fertilizantes. Remoción de partículas.
Inundaciones	Deforestación. Uso inadecuado de la tierra. Compactación del suelo. Eventos extremos.	Pérdida de vidas humanas. Destrucción de infraestructura. Destrucción de tierras agrícolas
Compactación de suelos	Uso inadecuado de la tierra. Uso inadecuado de prácticas de labranza Sobrepastoreo Monocultivo	Inundaciones. Baja infiltración del agua en el suelo y poca capacidad de retención de humedad. Baja productividad.
Pérdida de fertilidad de los suelos	Manejo inadecuado de cultivos. Pérdida de la capa arable. Pérdida de materia orgánica.	Disminución del valor de la tierra. Incremento de costos de producción. Baja productividad.
Bajo nivel de tecnologías	Falta de asistencia técnica Falta de capacitación. Uso de tierras marginales.	Uso de tecnologías inapropiadas. Baja productividad. Degradación de la tierra.
Organización deficiente	Falta de interés y motivación. Falta de capacitación. Cultura y tradiciones.	Falta de capacidad de gestión. Problemas comunitarios sin solución y apoyo limitado.

#### 3.2. VOCACION DE LAS CUENCAS

De acuerdo al recurso o integración de recursos estratégicos se podrá indicar para qué sirve o qué podemos esperar de la cuenca, esto ayudará al proceso de ordenamiento y planificación, por cuanto en base a la vocación se determinan los niveles e intensidades del uso recomendado, para alcanzar los mayores beneficios sin el deterioro ambiental. Al determinar la vocación de las cuencas también se facilitará la identificación de los actores directos para implementar el manejo y definir la responsabilidad técnica y adminis-

trativa. Las cuencas pueden diferenciarse, (Cuadro 3) según la oferta sostenible de sus recursos en:

**Vocación hídrica**, por el comportamiento climático generando importantes cantidades de lluvia y excelentes condiciones para almacenar y retener el agua. La capacidad para producir agua, puede conducir a usos diferentes y múltiples, así se pueden distinguir cuencas con vocación hídrica para producción hidroeléctrica, abastecimiento de agua potable, riego o navegación.

**Cuadro N° 3. Identificación básica de vocación de la cuenca (Ejemplo)**

Vocación	Condiciones, características	Recurso Estratégico
Cuenca hidroenergética	Disponibilidad de agua en cantidad y calidad, sitios favorables de almacenamiento (vasos, presas, alturas). Cobertura vegetal favorable, estabilidad del suelo. Uso múltiple.	Hídrico
Cuenca para abastecimiento de agua potable	Disponibilidad de agua en cantidad y calidad, escurrimiento permanente. sitios favorables para captación y almacenamiento	Hídrico
Cuenca para abastecimiento de agua para riego	Disponibilidad de agua en cantidad y calidad, escurrimiento permanente para el caso de zonas áridas, sitios favorables para captación, conducción y almacenamiento. Suelos profundos, fértiles, pendientes menores a 20%. Riego tecnificado. Clima favorable.	Hídrico y suelos
Cuenca con disponibilidad de agua para navegación	Disponibilidad de agua en cantidad, calidad, escurrimiento permanente. Características favorables del cauce.	Hídrico
Cuencas para producción agrícola	Disponibilidad de suelos fértiles, profundos, planos. Condiciones climáticas favorables, disponibilidad de lluvias en forma regular o con potencial de riego	Suelo Clima
Cuencas para producción maderable	Disponibilidad de suelos fértiles, poca profundidad, pendientes medias, clima favorable (especies se adaptan según características). Bosques	Suelo Bosque
Cuencas para producción silvoagropecuaria	Posibilidades de uso múltiple o combinaciones forestales, agrícola y pecuaria. Cuando no existe predominancia de características fisiobiológicas. Se requiere de buenos suelos, clima y pendiente no muy pronunciada.	Suelo Hídrico Clima
Cuencas para producción pecuaria	Disponibilidad de suelos fértiles, medianamente profundos, planos. Clima favorable para crecimiento de pastos y forrajes.	Pastos naturales Suelos Clima
Cuencas para desarrollo turístico	Valor escénico de sitios, belleza natural, patrimonio cultural, sitios históricos, accesibilidad y condiciones de seguridad.	Naturaleza y patrimonio
Cuencas para control ecológico	Grandes áreas que por su conservación influyen en el control ambiental. Uso dilutivo. Regulación natural y disminución de impactos sobre áreas costeras.	Hídrico Clima

**Vocación forestal**, por las condiciones ecológicas y potencial de sitio para el desarrollo de bosques y manejo silvicultural. La predominancia de especies puede dar lugar a zonas especiales de las cuencas (partes altas y medias) con importantes coberturas arbóreas de producción o protección. Para producción de madera y leña.

**Vocación agrícola**, por las condiciones agroecológicas, potencial del sue-

lo, pendientes, precipitación o disponibilidad de agua para riego. En este caso es muy importante la calidad del suelo (función de características y cualidades). Ejemplo, cuencas hortícolas, granos básicos, caña, etc.

**Vocación pecuaria**, por las condiciones agroecológicas, potencial de suelo para pastos y forrajes, pendientes y clima. Ejemplo, cuencas lecheras.

**Vocación recreativa**, por las condiciones naturales de valores escénicos, sitios históricos, accesibilidad y ambiente seguro. Ejm. cuencas para "canotaje"

**Vocación ecológica**, por las condiciones naturales de valor biológico (biodiversidad, control ambiental)

Es el recurso importante en calidad y cantidad o condiciones de sitio, integrado a su capacidad de soporte, el que define la vocación predominante de la cuenca, en función de ella se puede definir el uso estratégico. Esta determinación debe analizarse en función de los valores socioculturales y económicos, el hombre con sus necesidades e intereses adquiere un rol relevante en el uso de la cuenca. De la armonía y concertación entre los dos aspectos se establecerá la estrategia de desarrollo de los recursos y el manejo de la cuenca.

La mayor expectativa es posibilitar un uso múltiple que combine, asocie e integre dos ó más usos complementarios y no competitivos en la intensidad de uso de los recursos naturales de la cuenca, por ejemplo, en el caso de vocación hidroeléctrica como el uso del agua no es consuntivo, se puede aprovechar parte en agua potable, parte en riego, acuicultura y en turismo o recreación.

**4. LA GESTION PARA EL MANEJO AMBIENTAL DE CUENCAS, ESTRATEGIAS**

**4.1. LA GESTION**

El concepto de gestión se refiere a **"realizar actividades y crear medios para lograr un fin o negocio"**. En el caso de manejo de cuencas este concepto ha adquirido gran importan-

cia, por la responsabilidad y el rol del hombre y de la comunidad en el manejo de los recursos naturales. La definición moderna plantea que el hombre tiene que desarrollar acciones y participar en los diferentes procesos del manejo de cuencas, tiene que integrarse en la planificación y sobre todo en cómo lograr los medios y recursos para garantizar la implementación y seguimiento a la ejecución de los planes de manejo. La capacidad de gestión para manejar las cuencas dependerá de muchos factores, pero se pueden indicar las condiciones siguientes:

- Un nivel de conocimiento de la realidad y compromiso con el desarrollo de las comunidades, para posibilitar la armonización entre la naturaleza y calidad de vida de los habitantes rurales y urbanos.
- Claridad y seguridad sobre el conocimiento para lograr recursos y medios adecuados para resolver los problemas claves para el bienestar humano y el mantenimiento del capital base sobre los recursos naturales.
- Un marco institucional que permita y garantice las intervenciones en favor de las entidades sociales y sus respectivos entornos físico biológicos.
- La formación de la capacidad de los recursos humanos debe ser equilibrada en todos los niveles organizacionales, institucionales e individuales (gerentes, expertos, extensionistas, líderes, agricultores, productores, educadores, etc.).
- Visión para crear una imagen futura o imagen prospectiva del medio bio geofísico y socio económico.
- Formación o fortalecimiento del liderazgo en los diferentes niveles y sectores, principalmente actuan-

do en la niñez y jóvenes, para asegurar la continuidad y perennizar la filosofía de la sostenibilidad.

- Tener una clara visión y concepción del desarrollo socio económico, de la equidad y de las garantías ambientales en torno a la sociedad y en particular a las poblaciones localizadas en zonas críticas de las cuencas hidrográficas.

Sobre esta base de condiciones teóricas la gestión para el manejo de cuencas debe desarrollar estrategias, métodos, tácticas, sistemas, procedimientos y formas específicas según las diferentes problemáticas, capacidad de soporte y vocación de las cuencas.

Este proceso de gestión debe fortalecerse en los niveles sociales con procesos de abajo hacia arriba, también debe considerarse que se necesita contribuir con el estado para compartir las funciones y responsabilidades, hoy en día la administración moderna del estado tiende a modelos descentralizados y privados que requieren una reacción de la comunidad y lógicamente esto exige una preparación adecuada para enfrentar tales tendencias. Lo importante en este caso consiste en lograr tres aspectos fundamentales:

- Capacidad gerencial para dirigir, liderar, proyectar, promover y conducir procesos efectivos del manejo de cuencas, aun en condiciones mínimas y de severas restricciones.
- Lograr recursos y medios para implementar acciones en el corto, mediano y largo plazo, sin riesgos e incertidumbres, por el contrario con rápidos y significativos beneficios, para la sociedad y para la naturaleza.

- Organización para la continuidad de acciones, en forma participativa e integración de los diferentes sectores responsables. Desarrollar una nueva forma de responsabilidad y actitudes positivas sobre el ambiente y la calidad de vida, formando organizaciones efectivas y una nueva cultura institucional.

#### 4.2. LA GESTIÓN E INTERACCIONES CUENCA - CIUDAD

Existen diversos planteamientos relacionados con las interacciones en el sistema cuenca que se articulan a las ciudades por un lado ésta demanda recursos (agua, madera), productos primarios (agrícolas, pecuarios) y servicios ecológicos del ámbito de la cuenca, por otro lado existe una oferta o disponibilidad actual y potencial que depende de las características biofísicas de la cuenca. El crecimiento poblacional de las ciudades debe así mismo satisfacer nuevos espacios para el desarrollo de sus asentamientos, muchas veces la migración del medio rural al urbano crea desequilibrios sociales y ambientales que afectan la calidad de vida en ambos casos. La experiencia en relación a la interacción cuenca-ciudad sugiere considerar los siguientes aspectos:

- Existe una relación directa entre el desarrollo de las ciudades y las capacidades naturales de las cuencas, sus recursos estratégicos potencializan un crecimiento adecuado de los centros urbanos, por ejemplo la calidad y cantidad de agua, la disponibilidad de hidroenergía y los servicios ecológicos.
- Es necesario un ordenamiento territorial y ambiental para asegurar las demandas de sitios adecuados para atender el crecimiento de las ciudades.

- Se debe lograr una articulación social entre las poblaciones rurales de las cuencas y de las ciudades para lograr un equilibrio entre la migración y emigración entre ambos. El hombre del medio rural debe lograr oportunidades y la satisfacción de necesidades en igualdad de competencia que el hombre de la ciudad.
- El proceso de descentralización institucional y los procesos de participación popular permitirán distribuir las responsabilidades del manejo de la cuenca involucrando la demanda de las ciudades y la contribución económica equitativa para garantizar el manejo de la cuenca.

#### 4.3. ¿QUIÉN PAGA POR EL MANEJO DE CUENCAS?

Así como parte de los lineamientos es definir la responsabilidad de quien debe manejar la cuenca o bajo que modalidades se debe administrarla, también es necesario determinar quien debe pagar por todas las acciones requeridas. En principio esta preocupación aún no esta resuelta, teóricamente deben pagar los que reciben beneficios a nivel de finca y a nivel de sistema, es decir agricultores, pobladores rurales, comunidades urbanas, instituciones de servicios y otros que están integrados en el funcionamiento de la cuenca y su entorno. Muchos de los agricultores están preocupados porque no se les reconoce cuando ellos realizan conservación de suelos, reforestación o uso racional de plaguicidas, es cierto que algunos efectos se producen en la finca y de la cual se logran beneficios pero esto no es suficiente para equilibrar el costo de la aplicación de las prácticas. Si no se consideran los efectos fuera de la finca y sus beneficios, revertiendo parte de ellos a

quienes aplican las prácticas, no sería justo esperar el mantenimiento e intensificación del uso de las mismas.

Muchas instituciones reconocen estas relaciones pero es muy difícil definir reglas permanentes, aquellas que esperan agua limpia y en cantidad para uso poblacional, hidroenergético o riego deben valorizar el recurso y pagar por el aprovechamiento, de lo contrario existen riesgos de incrementar costos de tratamiento, o de realizar inversiones adicionales para satisfacer la demanda de los usuarios.

En este sentido, es necesario determinar el valor del recurso en situaciones de función social y ambiental. Dicen algunas leyes y reglamentos que quien contamina paga, lo cual puede ser justo y aplicable por el uso incorrecto, pero cuando ello ocurre por composición del sistema obliga a considerar otros aspectos. Algunos ejemplos de instituciones hidroenergéticas de Costa Rica, Panamá y El Salvador (CNFL, IRHE, CEL) están implementando proyectos de rehabilitación y manejo de cuencas para garantizar agua en calidad y cantidad, sus inversiones y gastos se dirigen a realizar actividades de conservación de suelos, reforestación, descontaminación, educación ambiental, agricultura de laderas y control de inundaciones; referencia que demuestran avances prácticos relacionados con este punto.

#### 4.4. LINEAMIENTOS ESTRATEGICOS

Las estrategias modernas deben ser flexibles y dinámicas para adaptarse a las tendencias y tener capacidad de respuesta efectiva frente a los problemas de manejo de cuencas. Por esta razón los lineamientos que se presentan a continuación pueden evolucionar

nar en su concepto e incorporar nuevas propuestas según las condiciones y épocas futuras.

### a) Planificación estratégica

Una de las preocupaciones de los decisores de la planificación y responsables de la implementación de planes de manejo de cuencas, es determinar si estos realmente han logrado impactos relevantes sobre el manejo de los recursos naturales y la calidad de vida de las poblaciones. Los antecedentes no son amplios y existen muy pocas experiencias de éxito sobre planes de manejo de cuencas implementados, con evaluaciones que sustenten los beneficios y ventajas.

La efectividad de la planificación como proceso es amplia y diversa, se han elaborado planes de manejo para diferentes propósitos, con diversos enfoques, componentes y necesidades de recursos. Muchos han involucrado grandes áreas y el detalle del diseño a veces no ha logrado ser muy específico. El proceso tradicional ha sido normativo, ordenador, bajo criterios técnicos y con poca base social. Los planes de manejo de cuencas se conceptualizan como **"instrumentos directrices para ordenar las acciones que requiere una cuenca hidrográfica, para lograr un uso sostenible de sus recursos naturales"**. El diseño del plan de manejo de cuencas, requiere de una formulación y enfoque, luego definir el modelo que le corresponde y finalmente el proceso técnico.

En los últimos años se ha indicado que la planificación participativa es clave para facilitar el diseño de los planes de manejo, sin embargo muchas veces este proceso de participación no es tan fácil lograrlo con eficiencia, a veces la

participación es débil desde el inicio, por tal razón (las causas de esta debilidad) deben descubrirse a tiempo. A continuación se señalan posibles razones:

- Falta de conocimiento, conciencia y actitudes de conservación sobre los recursos naturales.
- Falta de políticas, leyes y mecanismos para motivar y garantizar la participación en el manejo de los recursos naturales.
- Falta de percepción, valoración e interpretación sobre los costos y beneficios del manejo de cuencas, a nivel de finca, fuera de la finca, a nivel de la sociedad y sobre el ambiente.
- Heterogeneidad e inestabilidad de la población, sin cohesión ni patrones comunes de interés.
- La cuenca es muy grande y compleja que limita la participación conjunta de la población para tomar decisiones y responder a la verdadera mayoría.
- Ausencia de organizaciones comunitarias, falta de liderazgo y debilidad en las capacidades gerenciales.
- Problema con la tenencia de la tierra, los propietarios no viven en la cuenca y existe una deficiente distribución de la tierra.
- Desconfianza ante extensionistas, autoridades e instituciones.
- Coordinación institucional deficiente, crea confusión e inseguridad.
- Debilidad en la comunicación (limitante por idioma, métodos inadecuados y oportunidad)

El enfoque metodológico, debe expresar la visión prospectiva para solucionar los problemas, el equipo de trabajo interdisciplinario, debe integrar y correlacionar la información y el cono-

cimiento de la realidad. La formulación técnica consiste en definir la forma de solucionar el problema, para pasar del modelo de estado al modelo de soluciones. Este paso es estratégico y orienta las decisiones técnicas del planificador, considerando:

- Gestión administrativa, bajo una eficiente organización que permita el ordenamiento institucional para apoyar las acciones del plan.
- Visión integral, involucrando a todos los sectores, en forma coherente.
- El plan debe ser único, no debe existir duplicidad ni competencia.
- Carácter dinámico y continuo.
- Proyectivo, para establecer logros en plazos diferentes.
- Horizonte definido en función de demanda, oferta, tiempo.
- Modelos típicos; protección, conservación, rehabilitación, uso múltiple, aprovechamiento.

### b) Directrices para la gestión

Una vez formulado el plan se debe continuar con la gestión para obtener el financiamiento; los decisores y planificadores deben haber desarrollado todo un proceso de consultas, compromisos y cumplimiento de especificaciones para que la sustentación del plan desde el punto de vista técnico y económico tenga la factibilidad de lograr donaciones o préstamos de recursos económicos.

Es muy importante que los técnicos y especialistas conozcan todos los requerimientos de las entidades financieras y puedan respaldar con éxito la gestión de aprobación del plan. Desafortunadamente existen debilidades en esta capacidad de gestión, limitándose, por lo general, a seguir un trámite administrativo, carente de un ma-

nejo gerencial, por lo tanto, hay que preparar y dirigir a los futuros decisores y responsables de la gestión para que adquieran las destrezas, conocimientos y capacidades de acuerdo a los diferentes organismos donantes o financieros.

La determinación económica de costo del plan, debe compatibilizar el nivel de inversiones con los beneficios proyectados, maximizando el impacto al más corto plazo posible. Se recomienda que esta capacidad de gestión, permita la conducción y seguimiento al proyecto más allá del período de financiamiento. La expectativa es lograr que la comunidad organizada u otra instancia similar adopten el plan y genere la autosostenibilidad de la implementación del manejo de cuencas. En el diagnóstico socioeconómico se deben identificar cuáles son las formas de organización y como es la administración de los recursos naturales. El análisis debe explicar cómo se realiza la gestión para manejar los recursos naturales y hacer más eficiente la producción; y cuáles son las acciones de gestión ambiental.

En la mayoría de las cuencas existen pocas fortalezas para la gestión ambiental y de manejo de cuencas. Los agricultores, extensionistas, especialistas, planificadores y decisores, no tienen suficientes capacidades para desarrollar acciones gerenciales para el desarrollo sostenible. Existen debilidades y limitantes en la gerencia ambiental, caracterizado por:

- Falta de conocimiento sobre las técnicas, métodos y criterios de la gerencia ambiental.
- Modelos de administración y gerencia convencionales, enmarcados en políticas y estrategias débiles en el concepto ambiental.

- Cultura institucional y de las organizaciones comunitarias, deficientes en orientaciones dirigidas a formar y fortalecer la cultura ambiental.
- Intereses económicos y de poder no compatibles con la conservación de la naturaleza y del medio ambiente.

**Algunas recomendaciones para la gestión de recursos pueden ser:**

Considerar la disponibilidad de fuentes financieras a nivel local, identificando los proyectos en ejecución, muchas veces es posible reorientar acciones en el marco conceptual de manejo de cuencas. Luego se podría consultar en la empresa privada y bancos la posibilidad de lograr recursos económicos no reembolsables o préstamos con intereses convenientes para las actividades. También consultar algunas instituciones del gobierno central, ONGs, banca privada o estatal, empresas, cooperativas de crédito, proyectos bilaterales, etc.

Identificar las fuentes de financiamiento externo del tipo no reembolsable y mediante préstamos de largo plazo con intereses adecuados a proyectos ambientales y de recursos naturales. Generalmente en las oficinas de cooperación internacional se pueden obtener los datos y referencias de estas instituciones, ejemplos, Banco Mundial, Banco Interamericano de Desarrollo, AID, ACDI, GTZ, COSUDE, CEE, etc.

Lograr el respaldo y credibilidad técnica, social y política, para desarrollar un acercamiento y relacionamiento con los decisores, conocer así mismo las finalidades de cada una de las instituciones de financiamiento.

Conocer el interés del tipo y naturaleza de proyectos que los donantes pueden apoyar, identificar los elementos sensibles de la oferta disponible (ecología, calidad de vida, pobreza, biodiversidad, género, participación, medio ambiente, contaminación, agricultura orgánica, calidad total, autogestión, sostenibilidad), caracterizar sus limitantes y restricciones. Se sugiere revisar y tomar como ejemplo experiencias positivas sobre proyectos aprobados.

Conocer las características técnicas y económicas de negociación, lograr experiencia o tener referencias de los formatos y su contenido, exponer capacidad de contrapartida de recursos locales, valorizando personal, infraestructura, equipo, mobiliario, etc. Demostrar solvencia técnica adecuada para realizar un uso eficiente de los recursos solicitados. Estructurar con flexibilidad y autocontrol la propuesta técnica y económica, principalmente para tener liderazgo en el manejo del proyecto.

Demostrar respaldo social de parte de los beneficiarios y voluntad de generar un proceso de autosostenibilidad. Mediante acuerdos comunitarios y participación desde el inicio de la idea del proyecto.

**c) Organización y movilización social**

Entre los criterios estratégicos el rol de la organización social es muy importante por cuanto respalda y moviliza cada una de las actividades en las cuencas. Por esta razón deben identificarse las organizaciones básicas y tradicionales para definir la trayectoria cultural y potenciar adaptaciones o incorporaciones de nuevos modelos y sistemas. La organización debe ser

un resultado de un proceso horizontal, coherente con las necesidades socioculturales y ambientales; este debe considerarse desde el inicio de los proyectos, para garantizar una base social responsable de la continuidad de las acciones. La organización también responde a situaciones de interés común, para resolver problemas que individualmente serían improductivos y de alto riesgo. Problemas de interés social como la falta de agua, accesibilidad inadecuada, falta de crédito, dificultad en la comercialización, conlleven respuestas típicas para despertar el interés organizacional de la comunidad, productores y público en general. Al alcanzar los resultados se tendrá disponible una fuerza social dirigida a catalizar, respaldar y proteger el interés de usuarios y beneficiarios del manejo de cuencas.

**d) Intervención rápida y planes de acción**

La estrategia de intervención rápida debe conducir a preparar las actividades específicas y directas, con métodos de aprender haciendo, demostrativos y capacitación adecuada. Emplear pasos sencillos, con recursos propios y resultados inmediatos de beneficios tangibles, esto se puede lograr con la elaboración de planes de acción. El plan de acción dimensiona el nivel de esfuerzo y las necesidades inmediatas, pero sobre todo es para lograr demostrar que las acciones pueden inducir a cambios favorables. Nos debemos asegurar que la capacitación y dominio de las técnicas ofrezcan resultados con base a una estrategia, cuando el agricultor se haya apropiado de las técnicas o transforme lo aprendido, adquiera la capacidad de explicar lo aprendido y pueda aplicarlo en forma práctica.

Uno de los componentes fuertes del plan de acción puede ser la capacitación (tratar de educar y transformar el conocimiento y capacidad del agricultor, en el sentido positivo) respetando su cultura, tradiciones. Se debe conducir a su autogestión, organización, independencia y suficiencia.

**e) Autogestión**

Para superar la falta de continuidad, dependencia y poca ejecución de proyectos y planes de manejo de cuencas se ha fortalecido el concepto de autogestión, creando una capacidad propia para garantizar procesos de largo plazo y materializar los resultados de las acciones a nivel de campo. Los aspectos de autogestión involucran elementos sociales, porque deben partir del supuesto que toda persona, familia, comunidad y sociedad en general desee lograr el desarrollo, y por lo tanto, debe tener interés en posibilitar este objetivo. Muchas de las actividades en manejo de cuencas dependen de crear las condiciones para lograr recursos económicos, lograr la organización, alcanzar la capacidad de dirigir y ejecutar, requiriendo formación y educación en las diferentes acciones a nivel de finca, sistemas de producción, etc. La autogestión debe caracterizarse por su relevancia, practicidad, efectividad, oportunidad y continuidad en el contexto de la movilización y superación social, formando un poder decisorio comunitario o poblacional. Algunas actividades de autogestión pueden ser:

- Desarrollo organizacional y de asociación o integración de capacidades comunitarias, empresariales y culturales.
- Habilidades y destrezas para dirigir acciones integrales para el manejo de los recursos naturales.

- Liderazgo sociocultural y económico para impulsar actividades en respaldo del desarrollo sostenible.
- Capacidad para obtener recursos financieros para implementar proyectos, administrarlos y generar nuevos procesos productivos en favor del bienestar de la comunidad.

**f) Búsqueda de la calidad ambiental y calidad de vida**

Uno de los propósitos del manejo de cuencas es lograr el mejoramiento de la calidad de vida de las poblaciones urbanas y rurales de las cuencas, sin el detrimento del ambiente. Para hacer viable esta proposición es necesario conocer, cuales son las prioridades de la población en cuanto a necesidades básicas (salud, educación, vivienda, alimentación, recreación) y compatibilizar con la oferta de oportunidades y de utilización de recursos o participación en actividades económicas de las cuencas. Se busca alcanzar un ambiente seguro, consistente con las variables de la naturaleza y en armonía con las actividades económicas.

Se incorpora el concepto de calidad de vida en manejo de cuencas para sustentar una intervención equilibrada que garantice el bienestar humano, eliminando las presiones desordenadas sobre el uso de los espacios y recursos disponibles. Sin embargo, la calidad de vida debe ser un efecto total de todas las intervenciones en las cuencas, si se mejora la calidad de agua, esto tendrá efectos en la salud, si se protegen las carreteras se dispondrá de mejores servicios de comunicación, etc.

**g) Intervención a nivel de finca**

Esta es una de las innovaciones del enfoque moderno de manejo de cuencas, se promueve que la cuenca en su conjunto esté formado por fincas, parcelas o sistemas de producción (agrícola, pecuario, forestal, hídrico, servicios ecológicos, etc.), por lo tanto, la intervención y manejo de finca en finca permitirá el manejo total e integral de la cuenca. La finca es el lugar de encuentro, allí se toman las decisiones día con día de cada uno de los usos de los recursos naturales, allí se aplican las tecnologías disponibles para los sistemas de producción, y por lo tanto, es el lugar donde se inicia en forma operativa en el terreno y en el cual participan el productor y el agente de cambio como elementos claves para viabilizar los procesos de manejo de cuencas.

La intervención a nivel de finca requiere de un pleno dominio y conocimiento de las realidades biofísicas y socioeconómicas del terreno y de la familia, por lo tanto, el agente de cambio debe poseer la seguridad y capacidad para operativizar cada una de las actividades en un proceso continuo de alta calidad técnica y social. Una modalidad que garantiza este enfoque es la definición de planes de acción a nivel de campo para implementar los planes de manejo de cuencas; este se define en forma participativa entre productor y agente de cambio.

**5. LA EXPERIENCIA DE MANEJO DE CUENCAS EN CENTROAMERICA Y PANAMA**

El CATIE aproximadamente en los últimos 15 años ha ejecutado dos proyectos importantes: De 1984 a 1989 el Proyecto Regional de Manejo de Cuencas para Centroamérica y Panamá

(Convenio CATIE/AID) y de 1990 a 1995 el Proyecto RENARM/Componente Manejo de Cuencas para Centroamérica y Panamá. Producto de estas experiencias se ha logrado los siguientes avances:

- Metodologías para elaborar planes de manejo de cuencas
- Metodologías para determinar áreas críticas
- Metodologías para determinar prioridades
- Diagnósticos nacionales de manejo de cuencas
- Diagnósticos institucionales sobre manejo de cuencas
- Metodologías para la selección de cuencas prioritarias
- Planificación para el manejo de cuencas prioritarias a nivel de proyectos bancables
- Planes de acción para el manejo sostenible de cuencas
- Implementación de proyectos de rehabilitación de cuencas a nivel de microcuencas y subcuencas
- Planes de acción a nivel de campo para implementar proyectos
- Evaluación de la implementación de proyectos de manejo de cuencas
- Investigación para rehabilitar suelos en proyectos de manejo de cuencas
- Modelación hidrológica e implementación a nivel de campo
- Investigación sobre erosión, escorrentía y lixiviación aplicados a manejo de cuencas
- Metodología aplicada a nivel de finca sobre planificación del uso de la tierra.
- Validación de tecnologías y prácticas aplicable a manejo de cuencas
- Métodos de extensión en implementación de proyectos de manejo de cuencas
- Constitución de un laboratorio de

análisis de información geográfico con capacidad para desarrollar actividades de capacitación, investigación y servicios técnicos.

- Utilización de sensores remotos y técnicas de teledetección aplicados a manejo de cuencas
- Diseño y organización de sistemas de información geográfico SIG en instituciones nacionales, aplicables a manejo de cuencas, recursos naturales y agricultura
- Organización de bases de datos y operación de los sistemas nacionales SIG.
- Aplicaciones de SIG en proyectos de manejo de cuencas, recursos naturales y ramas afines
- Formulación de propuestas técnicas y económicas para la gestión de proyectos de manejo de cuencas, en procesos de licitación

Como resultado de la importancia del manejo de cuencas y la viabilidad de operativizar la continuidad de acciones desde 1996 se constituye la Unidad Técnica de Manejo de Cuencas Integrada en el Area de Cuencas y Sistemas Agroforestales. La unidad opera con los países mediante la modalidad de esfuerzos compartidos, servicios de asesoría, servicios técnicos y en función de proyectos con financiamiento. Esta capacidad operativa permite señalar que el CATIE puede ofrecer servicios de asistencia técnica, investigación, proyección externa, posgrado y capacitación en los siguientes temas:

- Diagnóstico, planificación, implementación y evaluación en manejo de cuencas
- Zonificación agroecológica aplicado a manejo de cuencas, sistemas de producción y proyectos de recursos naturales
- Agroambiente aplicado a proyec-

tos de cuencas, recursos naturales y agricultura

- Planificación y manejo del uso de la tierra
- Evaluación de impacto ambiental en proyectos de manejo de cuencas
- Manejo de recursos hídricos a nivel de cuencas y sistemas de producción
- Conservación de suelos y aguas
- Sistemas de información geográfica aplicado a recursos naturales, manejo de cuencas, agricultura y campos afines
- Socioeconomía ambiental aplicado a manejo de cuencas
- Formulación de proyectos de manejo de cuencas

Entre las principales experiencias que ha realizado el CATIE en acción conjunta con instituciones nacionales, se pueden presentar los siguientes casos:

**a) El caso del Plan de Manejo Ambiental de la Cuenca Alta del Río Virilla (Costa Rica)**

La intervención en la Cuenca Alta del Río Virilla se inicia en el año 1993, bajo el liderazgo de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, una de las empresas que produce y administra la energía eléctrica en Costa Rica. El área de la cuenca (141 Km<sup>2</sup>) es parte de la ciudad capital, San José, que tiene aproximadamente 1 millón de habitantes, la cual demanda agua potable, energía, materiales productos y otros servicios de la cuenca. La problemática de la cuenca presenta contaminación ambiental (agua, desechos del medio urbano y rural), degradación del suelo y bosque. El plan de manejo contempla tres componentes integrados principalmente a la utilización del agua como recurso de uso múltiple:

educación ambiental, descontaminación y reforestación.

Los aspectos de interés para la implementación del plan de manejo son: mejorar la calidad y cantidad de agua para incrementar o mantener la productividad hidroenergética (producir 10% de la energía consumida por el país) proveer calidad y cantidad de agua al 55% de la población de la ciudad capital (más de 1 millón de habitantes), mejorar la productividad agropecuaria y restablecer la cobertura forestal en las áreas críticas (márgenes de cauces, tierras forestales). El proceso de intervención es participativo y de autogestión, integrado por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz CNFL, Centro Agrícola Cantonal, Ministerio del Ambiente y Energía, Ministerio de Educación Pública, Instituto de Acueductos y Alcantarillados, Productores y otras organizaciones locales, el CATIE desarrolló una labor de asistencia técnica. La CNFL aporta los principales recursos económicos (en el período 1993-96 el presupuesto de operación ha superado los \$400,000) también deben valorarse los apoyos de las otras instituciones (logística y personal).

Los resultados más importantes están relacionados con la educación ambiental como producto de la participación de los educadores del Ministerio de Educación así como por el personal del Proyecto, los maestros reciben capacitación sobre temas ambientales que son aplicados en los programas de enseñanza formales y no formales. También los extensionistas del proyecto capacitan a productores y a la comunidad en temas ambientales y en el uso apropiado de los recursos naturales. Anualmente se trabaja con una población escolar de 3,000 alumnos y 100 productores, que participan en jornadas ambientales para proteger a

la ciudad. En el componente de descontaminación se aplican técnicas de agricultura orgánica, reciclaje de desechos y agroforestería. En el componente de reforestación se ha logrado establecer viveros en fincas privadas, plantaciones de especies arbóreas y arbustivas en 10 fincas demostrativas. Los primeros resultados del monitoreo ambiental sobre la calidad del agua presentan indicadores positivos.

La interacción cuenca-ciudad, en este caso, logra el mayor énfasis por las necesidades de agua para energía y uso poblacional de los habitantes de la cuenca y de una población adyacente de alta concentración. La calidad y cantidad de agua dependen de como se maneje la cuenca, sin embargo también se debe mejorar la eficiencia en el uso de estos servicios, por lo tanto la población de las ciudades deben contribuir con el financiamiento y operatividad de la cuenca.

**b) El caso de la Rehabilitación de la Cuenca del Río Purires (Costa Rica)**

La intervención en la Cuenca del Río Purires se inicia en el año 1991, bajo el liderazgo del Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento, una de las instituciones administradoras del recurso agua en Costa Rica. El área de la cuenca (80 Km<sup>2</sup>) es parte de la ciudad de Cartago, Valle del Guarco, que tiene aproximadamente 15,000 habitantes integrado a la ciudad de Cartago con más de 350,000 habitantes. La problemática de la cuenca presentaba inundaciones y destrucción de las tierras agrícolas, áreas urbanas (viviendas) e infraestructura de obras civiles (carreteras, puentes, líneas de conducción). En la década de los 80 las tierras agrícolas desarrollan 250 has de invernadero para cultivos de flores de exportación (2 millo-

nes de dólares por mes), con una inversión de 50 millones de dólares USA. El Plan consideró tres acciones fundamentales: el encauzamiento y obras de defensas de riberas, ordenamiento del uso de la tierra y fortalecimiento institucional.

Los aspectos de interés para la implementación del proyecto fueron: controlar las inundaciones, proteger las tierras de cultivo, proteger la ciudad e infraestructura civil y fortalecer la capacidad de las instituciones locales para la continuidad del proyecto. Las tierras de cultivo dedicadas a floricultura y cultivo de hortalizas demandan gran cantidad de mano de obra de la ciudad, las mismas que sufren los efectos por falta de empleo si no se garantiza la protección de las tierras cercanas al cauce del río. Así mismo la intervención en las partes planas disminuye la presión sobre las tierras de laderas lo cual permite amortiguar el proceso de escorrentía, disminuyendo el potencial de inundaciones aguas abajo en las poblaciones. El proceso de intervención permitió la coordinación entre las instituciones del gobierno central y de la comunidad (Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento, Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Comité Nacional de Emergencia, Municipio y Productores), el CATIE desarrolló una labor de asistencia técnica.

Las acciones se desarrollaron bajo la orientación de un modelamiento hidrológico e hidráulico que integra obras físicas sobre el cauce del río y protección en las tierras altas. Se realizó el ordenamiento de las tierras de cultivo cercanas al cauce principal, el encauzamiento, construcción de defensas, diseño de puentes y ordenamiento del uso de la tierra en las partes altas. La gestión municipal y el comité inter-



institucional desarrollaron importantes negociaciones para concientizar a los productores y población, lograr la reubicación del cauce y valorar las tierras de cultivos. Las obras físicas se implementaron entre 1991-92, controlando las inundaciones por 4 años consecutivos, este efecto a su vez permitió la seguridad de las actividades agrícolas de 3000 puestos de trabajo y el incremento de 1500 nuevos puestos, evitando gastos en reconstrucción de viviendas, carreteras, puentes, alcantarillados y control de enfermedades. Así mismo se inician procesos positivos de regeneración en la cobertura arbórea en las tierras altas.

La interacción cuenca-ciudad, en este caso, ha logrado neutralizar los problemas de inundaciones que afectan a la ciudad, las obras y acciones benefician a los agricultores y población total.

#### **c) El caso de la Rehabilitación de la Cuenca del Río Turrialba (Costa Rica)**

La intervención en la Cuenca del Río Turrialba se inicia en el año 1992, bajo el liderazgo del Municipio de la ciudad de Turrialba. El área de la cuenca (90 Km<sup>2</sup>) tiene aproximadamente 30,000 habitantes. La problemática de la cuenca presentaba inundaciones y destrucción de las áreas urbanas (viviendas) e infraestructura de obras civiles (carreteras, puentes, líneas de conducción). Una característica natural de la cuenca es tener un comportamiento favorable a procesos de alta escorrentía y descarga de grandes caudales que superan la capacidad de conducción del río, además el punto crítico es haber permitido la ubicación parcial de la ciudad en el cauce y desviar parte del curso del mismo. El Plan de rehabilitación consideró tres acciones fundamentales: el encauzamiento

y obras de defensas de riberas, ordenamiento del uso de la tierra y fortalecimiento institucional.

Los aspectos de interés para la implementación del proyecto fueron: Controlar las inundaciones, ordenamiento territorial, proteger la ciudad e infraestructura civil y fortalecer la capacidad de las instituciones locales para la continuidad del proyecto. En los últimos eventos el desastre de las inundaciones no solamente afectó las obras físicas sino también vidas humanas, conflictos sociales y graves peligros de enfermedades. El proceso de intervención permitió la coordinación entre las instituciones del gobierno central y de la comunidad (Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Comité Nacional de Emergencia, Ministerio de Vivienda y Municipio), el CATIE desarrolló una labor de asistencia técnica.

Las acciones se desarrollaron bajo la orientación de un modelamiento hidrológico e hidráulico que integra obras físicas sobre el cauce del río y protección en las tierras altas. Se realizó el ordenamiento de las tierras altas y de las áreas próximas a la ciudad, el encauzamiento, construcción de defensas, protección de puentes y la concientización de la población. La gestión municipal y el comité inter-institucional desarrollaron importantes negociaciones para obtener los recursos económicos, lograr la reubicación de viviendas y desarrollar un plan de asentamientos. Las obras físicas se implementaron entre 1992-93, controlando las inundaciones por 3 años consecutivos, este efecto a su vez permitió la seguridad de las actividades civiles, evitando gastos en reconstrucción de viviendas, carreteras, puentes, alcantarillados y control de enfermedades.

La interacción cuenca-ciudad, en este caso, ha logrado la protección de la infraestructura urbana con base en la construcción de obras de defensas fundamentadas en la comprensión del funcionamiento de la cuenca y de las condiciones físicas-naturales, además queda demostrada la necesidad de aplicar un reordenamiento de la ciudad para superar los riesgos de inundaciones.

#### **d) El caso de la Rehabilitación de las Microcuencas de los Ríos Nueve Pozas y Cerro Colopeco (Honduras)**

La intervención en las Microcuencas de los Ríos Cerro Colopeco y Nueve Pozas se inicia en el año 1991, bajo el liderazgo de la Asociación Ecológica de San Marcos de Ocotepeque. El área de las Microcuencas (80 Km<sup>2</sup>) tiene aproximadamente 30,000 habitantes. La problemática de la cuenca presentaba escasez de agua para las poblaciones, contaminación ambiental (calidad de agua, basuras, incendios), baja productividad de la tierra, deforestación, degradación del suelo y migración del campo a la ciudad. Una característica natural de la cuenca es tener predominantemente tierras con aptitud forestal, baja calidad de suelos y poca pluviosidad. El Plan consideró tres acciones básicas: Conservación de suelos, Forestería y Agroforestería, Extensión y Educación Ambiental.

Los aspectos de interés para la implementación del proyecto fueron: Mejorar la producción y productividad agropecuaria y forestal, mejorar la calidad de agua, incrementar la disponibilidad de agua, controlar los incendios forestales, concientizar a la población y fortalecer la capacidad de las instituciones locales para continuidad del proyecto. El proceso de intervención permitió la coordinación entre institu-

ciones internacionales, del gobierno central y de la comunidad (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Secretaría de Recursos Naturales, Asociación Ecológica de San Marcos de Ocotepeque y Municipio de San Marcos de Ocotepeque), el CATIE desarrolló una labor de capacitación y asistencia técnica.

Los resultados más importantes están relacionados con el mejoramiento de la producción y productividad de los cultivos (café, maíz, frijol, hortalizas), rehabilitación del bosque, protección de fuentes de agua, uso racional de agroquímicos, educación ambiental y organización de los productores. El rendimiento y productividad del cultivo de café se incrementó en un 20% (por efecto de manejo, conservación de suelos y valor agregado), para el caso del maíz el incremento fue de 400% hasta 1995, la calidad y cantidad de agua se incrementó en un 50% para favorecer a la ciudad centro de 15,000 habitantes. Los incendios forestales fueron controlados en más del 90%, y se estableció una red de promotores de extensión en manejo de cuencas constituida por 25 agricultores para atender a más de 600 familias involucradas en el proyecto, en educación ambiental los programas radiales lograron una cobertura efectiva a más del 60% de la población total.

La interacción cuenca-ciudad, en este caso, refleja la necesidad de mejorar las condiciones de manejo de los recursos suelo, agua y bosque, a través de una agricultura sostenible que permita un restablecimiento de la calidad y cantidad de agua para la población urbana.

### e) El caso de la Rehabilitación de la Subcuenca del Río Las Cañas (El Salvador)

La intervención en la Subcuenca del Río Las Cañas se inicia en el año 1991, bajo el liderazgo de la Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa de El Salvador, la principal empresa de servicios hidroeléctricos del país. El área de la subcuenca (80 Km<sup>2</sup>) tiene aproximadamente 20,000 habitantes, integrada en parte a la población de la metrópoli de la capital de San Salvador con aproximadamente 3 millones de habitantes. La problemática de la cuenca se caracterizaba por serios conflictos sociales y ambientales, población con pocas oportunidades de trabajo después de la guerrilla, migración a la ciudad capital y abandono del campo, degradación del suelo y arrastre de sedimentos al embalse Cerrón Grande (una de las más importantes del país), baja producción y productividad de la tierra, escasez de agua para consumo humano y riego. Una característica natural de la cuenca es tener un comportamiento favorable a procesos de alta escorrentía y descarga de sedimentos por la falta de cobertura o falta de medidas de conservación de suelos y aguas. El Plan de rehabilitación consideró tres acciones fundamentales: Conservación de suelos, Agroforestería y Reforestación, Control de Torrentes y Mejoramiento del Hogar.

Los aspectos de interés para la implementación del proyecto fueron: lograr la disminución de sedimentos a nivel de finca y cauce, mejorar la producción y productividad, recuperar suelos degradados, incrementar la calidad y cantidad de agua, mejorar las condiciones del hogar, estabilizar a la población rural y fortalecer la capacidad de las instituciones para la conti-

nuidad del proyecto. El proceso de intervención permitió la coordinación entre instituciones internacionales, gobierno central y de la comunidad (Agencia Internacional para el Desarrollo de Estados Unidos/El Salvador, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa, Ministerio de Agricultura y Ganadería), el CATIE desarrolló una labor de capacitación y asistencia técnica.

Los resultados más importantes están relacionados con el mejoramiento de la producción y productividad de los cultivos (café, cítricos, musáceas, piña, maíz, frijol, hortalizas) rehabilitación de suelos, conservación de agua, incorporación de agroforestería y forestería, uso racional de agroquímicos, educación ambiental, ahorro de leña mediante estufas, retención de sedimentos y organización de los productores. El efecto más importante fue la adopción de las prácticas de manejo de cuencas y la estabilización de la población rural incorporados a una actividad agrícola rentable y mejor bienestar en la familia rural. Se formó una red de 10 promotores-extensio-nistas y 900 familias beneficiadas directamente.

### 6. RETOS DEL MANEJO DE CUENCAS

Plantear las interrogantes y desafíos a largo plazo no es teórico, por cuanto los procesos de rehabilitación y manejo de cuencas requieren períodos largos de trabajo. En este sentido es real proyectar las preocupaciones en un horizonte de 20 años, por lo general para lograr efectos totales en el sistema de la cuenca hidrográfica, se requerirán intervenciones de mínimo 10 años extendiéndose en algunos componentes hasta en 15 o más años. El pensamiento de técnicos, agriculto-

res, planificadores y políticos obliga a definir cuales podrían ser los paradigmas del manejo de cuencas en un contexto prospectivo y holístico, caracterizado por los siguientes aspectos:

- *Cómo dimensionar integralmente el valor de recursos estratégicos como el agua?*
- *Cómo conciliar los inminentes conflictos sociales y económicos por el uso del agua?*
- *En qué medida y cómo se debe integrar el concepto de aplicación de externalidades para financiar el manejo de cuencas?*
- *Cuál será la relación entre los servicios ecológicos y manejo de cuencas?*
- *Cómo lograr el reconocimiento, político, institucional, científico, técnico y social sobre las ventajas de trabajar en forma ordenada, integrada, coordinada y eficiente en el sistema de la cuenca hidrográfica?*
- *Será imprescindible formar la capacidad gerencial a todos los niveles en manejo de cuencas?*
- *Cómo viabilizar la contribución de manejo de cuencas a contrarrestar la pobreza?*
- *Será conveniente aplicar una extensión humanizada y quién debe financiarla para hacer el manejo de cuencas?*
- *Es factible implementar una acción pragmática para contribuir a la solución de problemas de mercado y*

*comercialización integrados al manejo de cuencas?*

- *Cómo incorporar criterios de agricultura orgánica rentable en manejo de cuencas?*
- *La participación y autogestión permitirán una mayor eficiencia de la planificación e implementación de planes y proyectos de cuencas?*
- *Hasta dónde será viable y factible desarrollar la rehabilitación y recuperación de cuencas?*
- *Cómo lograr información oportuna para la toma de decisiones favorables al manejo de la tierra y sus sistemas productivos en las cuencas?*
- *La educación y capacitación lograrán un cambio generacional en favor de la sostenibilidad de los recursos y de proteger el ambiente?*
- *Cuál será la modalidad de interacciones y qué políticas públicas se deben seguir para lograr una relación eficiente entre las ciudades y el manejo de cuencas?*
- *Cuál será el rol de los agentes de cambio no formales en manejo de cuencas?*
- *Será posible considerar un rol protagónico a las municipalidades y otras organizaciones afines para el manejo de cuencas, en procesos prácticos de descentralización y participación popular?*
- *Qué modelos de gestión y organización serán más efectivos para lograr el manejo de cuencas?*

### 7. BIBLIOGRAFIA

- Current et al 1995. The cost benefits of agroforestry to farmers. The World Bank Research Observer.
- Dourojeanni A. 1994. Políticas públicas para el desarrollo sustentable, la gestión integrada de cuencas, INRENARE, Lima Perú.

Ferrán I. 1993. Sistemas culturales en el trópico americano: dos casos de América Central. CATIE. Costa Rica.

Ferrán I. 1993. Entre la guerra y la conservación: Estudio de caso de los antecedentes a la rehabilitación de la subcuenca del río Las Cañas, El Salvador. CATIE.

Medina B. J. 1995 Identification of critical areas and a reforestation plan using a geographic information system in the Purires River watershed, Thesis Master Degree CATIE, Costa Rica.

REDNAMAC 1995. Memorias del III Encuentro de la Red Nacional de Manejo de Cuencas del Perú, Cajamarca, Perú.

SENARA-CATIE 1991 Estudio hidrológico hidráulico para el control de las inundaciones en la Cuenca del Río Purires, Valle del Guarco. CATIE. Costa Rica.

Shultz S. 1994. Economic analysis of the 1991 CATIE/SENARA Purires River flood control project. Draft report Watershed Management Area, CATIE, Costa Rica.





RESUMEN

**L**a gestión sostenible de microcuencas es un concepto que está muy asociado a otros dos conceptos: la gestión de montañas y la demostración, con experiencias concretas, del concepto desarrollo sostenible con respecto a la primera. La gestión de montañas en el mundo es todo un reto planteado bajo la pregunta ¿son viables las montañas hoy?. Existen posiciones, sobre todo desde la economía, que ponen en duda su viabilidad en las condiciones económicas actuales.

En cuanto a la gestión de cuencas, hay que destacar que existen un sinnúmero de definiciones, el presente grupo resalta el carácter organizativo de esta propuesta de administración, definiéndola como una **estrategia de organización de la población para el desarrollo sostenible dentro de una unidad espacial natural**, como es la CUENCA. La estrategia tiene un componente tecnológico de manejo de los recursos naturales dentro de una oferta ambiental determinada que está muy unida al nivel de organización de la población propietaria, en el cual la capacidad de llegar a **consensos** es fundamental y para ello, las cuencas constituyen espacios que crean condiciones favorables a los consensos. Por otro lado, se reseña que esta es una estrategia especial para ecosistemas de montaña.

\* Coordinadora de Ciencia y Tecnología en los Andes  
torvel@ccta.org.pe

La presente experiencia se ha realizado a nivel de 4 microcuencas (cuencas menores de 10,000 ha.), distribuidas en la Sierra norte (2), centro (1) y sur (1), implicando a aproximadamente 13,000 habitantes y 4 Instituciones: ONG's (CEPESER-Piura, Centro IDEAS-Cajamarca, CADEP-Cusco, IDMA-Huánuco) desarrollándose específicamente en el área de la oferta ambiental incluido el hombre en su relación con el medio natural.

El grado de avance está a nivel de diagnóstico y monitoreo, incluyendo inventarios y evaluaciones, aunque esto no implica que no se estén realizando acciones de transformación en las microcuencas trabajadas por parte de las instituciones y poblaciones implicadas directamente (infraestructura de riego, conservación de suelos, semillas, técnicas agroecológicas...). Se han generado mapas, maquetas, modelos estructurales y de flujos de las microcuencas, material de difusión: revistas, manuales, contando para todo esto con la participación de las comunidades propietarias de las microcuencas.

## II. INTRODUCCION

### ¿Quiénes Participan?

En el trabajo han participado proyectos ubicados en cinco microcuencas de la sierra sur (Cusco), centro (Huánuco) y norte (Cajamarca y Piura); en ellas se llevan adelante acciones de desarrollo rural que vienen implementándose desde hace más de 5 años por las siguientes instituciones: CADEP, CCAIJO (1992-1994), CEPESER, Centro IDEAS e IDMA. Ver el Cuadro N° 1. El proceso ha sido desarrollado por un equipo interdisciplinario de la CCTA. En cada caso el trabajo se ha realizado en forma conjunta con los ingenieros y técnicos de los proyectos mencionados que laboran en las microcuencas y de las autoridades y campesinos de las comunidades correspondientes.

### Instituciones Participantes actualmente

- CEPESER (Piura)
- IDMA (Huánuco)
- CADEP (Cusco)
- Centro IDEAS (Cajamarca)

Cuadro N°1

Microcuenca	Departamento	N° de Beneficiarios		Institución
		Población Total	N° de Familias	
SIMIRIS	Piura	1,765	353	CEPESER
SHITAMALCA	Cajamarca	6,500	1,300	Centro IDEAS
WARMIRAGRA	Huánuco	920	184	IDMA
MANCHOJLLA	Cusco	3,671	374	CADEP
<b>Total</b>		<b>12,856</b>	<b>2,211</b>	

### 2.1. Breve Reseña Histórica

La gestión integral de microcuencas surge después de 2 grandes experiencias:

- Los grandes traslados de masas de agua (extraer agua del río para irrigar grandes extensiones: Represas).
- Proyectos sectoriales de desarrollo rural (proyectos de irrigación, agrícolas, forestales, ganaderos,...).

Frente a estos surgió el planteamiento de la gestión integral de cuencas que destacaba:

- El fortalecimiento de las zonas de escurrimiento.
- Proyectos integrales que relacionan a los diferentes aspectos que componen a la realidad, a través de propuestas holísticas.

La gestión integral de cuencas implicaba, e implica, espacios muy grandes y, en muchos casos, a grandes poblaciones haciendo sumamente complejo el proceso de la administración de estos ecosistemas. Entonces, surge el planteamiento de la gestión integral de microcuencas (es decir, cuencas menores de 10,000 ha), espacios en donde la administración podría concentrarse de una forma más clara y en plazos menores.

A continuación se presenta un cuadro resumen con algunos de los hitos más importantes de la historia de cuencas en el Perú durante el siglo XX (ver Cuadro N°2).

### 2.2. Características Ecológicas del Area de Trabajo: Las Montañas, Los Andes

Administrar ecosistemas de montaña demanda de la consideración de un gran número de variables específicas que la hacen característca, sea en América, Africa o Asia (ver Fig.N° 1).

Hacer gestión de recursos naturales en montañas tropicales, como son los Andes, demanda el no olvidarnos de algunos de sus rasgos más importantes como son la **diversidad** y la **inestabilidad climática**, y estos rasgos nos van a acompañar en todas las actividades humanas realizadas en las montañas. (Ver Fig.N°2).

Las montañas son ecosistemas muy particulares a nivel mundial. Constituyen el 20% de la superficie terrestre y sobre ellas se asienta el 20% de la población mundial (ver Recuadro N° 1).

En cuanto a los Andes mismos, substrato sobre el cual se realiza toda la actividad humana que nos interesa ahora, hay que destacar que es la cadena montañosa más poblada del mundo, a lo largo de sus 7,250 km de Norte a Sur cruzando de lleno el trópico, lo cual agudiza algunos rasgos propios de estos ecosistemas, ver Recuadro N°2).

En el Perú hablar de los Andes se refiere a la Sierra, una región estratégica para el desarrollo sostenible. Fuente de agua, suelos, minerales, energía, alimentos, entre otras cosas fundamentales, constituyen la columna vertebral del país, cubriendo el 30% del territorio nacional (39.2 millones de ha) y sobre ella se asienta aproximadamente el 35% de la población peruana.

En estos Andes centrales, los procesos de domesticación de plantas se iniciaron por lo menos hace 10,000 años, originándose en los valles interandinos y desplazándose posteriormente hacia el piedemonte costero (ver Recuadro N°3).

Sin embargo, la gestión de los recursos naturales en la Sierra ha mostrado hasta hoy lo errado de las políticas y estrategias de desarrollo que se han propuesto e implementado para esta región, habiendo generado procesos de deterioro de sus tierras, agua y calidad biológica, es decir, de **desertificación**, un proceso de larga historia en nuestro país. En estas condiciones surge como una alternativa de administración sostenible de los recursos naturales y el ambiente: LA GESTION INTEGRAL DE CUENCAS.

**3.2. Características Básicas de las Propuestas de Gestión Integral de Microcuencas**

CRITERIOS	CARACTERISTICAS
1. Ecológicas :	Especialmente para ecosistemas de montañas.
2. Espaciales :	Es para cuencas con una extensión menores de 10,000 ha: Microcuencas.
3. Enfoque :	Integral, sistémico. Es decir, que entrelaza (dando unidad) a los diferentes proyectos sectoriales existentes. Ejemplo: en torno al factor agua (ver Fig.N° 3 ).
4. Población :	Para poblaciones relativamente pequeñas, menores de 2,500 hab.
5. Duración :	3 - 5 años.
6. Costos :	200 - 250 mil dólares USA / año.
7. Fuentes de financiación:	Internas: estatales y provadas. Externas: cooperación internacional y fondos de contravalor.
8. Organización :	- Concertación: consensos. - Mesas de trabajo. - Autoridades <i>ad hoc</i> . - Gobiernos locales, comunales,...

Las condiciones ecológicas y socioeconómicas en las que se lleva adelante la gestión de microcuencas en nuestro país aparecen resumidas en el Cuadro N°4.

**III. METODOLOGIA**

**3.1 Secuencia Metodológica**

La secuencia está marcada por 2 etapas:

La primera, asociada al **diagnóstico** especializado y holístico, con un eminente trabajo por disciplinas (etapa multidisciplinaria).

La segunda etapa es básicamente transdisciplinaria, de síntesis, es la etapa de la elaboración de **propuestas**.

Un resumen de la secuencia antes descrita se puede apreciar en el Cuadro N°3.

**IV. AVANCES**

La experiencia se inicia por parte de la CCTA, en 1987, con seminarios referidos al manejo de cuencas en diferentes partes del país (Piura, Cusco, Arequipa,...).

En 1992, el objetivo central fue compartir los trabajos de inventario, evaluación y diagnóstico con 3 microcuencas: Shitamalca (Cajamarca-IDEAS), Picomayo (Arequipa-DESCO) y Wancarmayo/Collpamayo (CUSCO-CCALJO), hasta llegar a una metodología que hoy se tiene como una propuesta del grupo de trabajo, aparte de haber generado propuestas básicas de información, tales como mapas a escala 1:25,000 de tres tipos: uso actual, uso potencial y conflictos de uso; maquetas (con los mismos temas anteriores); modelos gráficos y matrices. (Ver Figs.N°4, 5 y 6)

A partir de 1995, se decide iniciar la fase del MONITOREO, así como la creación de una BASE DE DATOS que nos permita establecer criterios mínimos o básicos que debería tener todo diagnóstico de microcuencas.

Actualmente, se ha conformado una red de 4 instituciones que trabajan en microcuencas y que están asociadas a la CCTA. En cada caso se está implementando y ejecutando un sistema de **monitoreo ambiental** (en el cual destacan los indicadores hídricos) y de intervención de los proyectos, con participación de la población (ver Fig N°7).

Entre las variables que se están monitoreando tenemos:

En cuanto a la intervención del Proyecto, los indicadores son discutidos y escogidos por cada institución según las particularidades de cada Proyecto.

El sistema de monitoreo viene funcionando prácticamente desde hace 2 años (setiembre 1995); está concebido para 5 años como una forma de darle consistencia a los resultados obtenidos y, de esta manera, identificar, en detalle, algunas tendencias en el comportamiento de estos ecosistemas tan inestables como son los de montañas, así como contar con información para realizar sólidas evaluaciones de Impacto Ambiental en los siguientes años.

Otro de los componentes del trabajo es la CAPACITACIÓN, la cual tiene la forma de talleres de gestión integral de microcuencas, pero dirigidos especialmente a los propietarios de las microcuencas (autoridades comunales y de municipalidades, productores, comités de riego, ...), habiéndose generado una bibliografía básica en el tema, dirigida a los campesinos y productores básicamente.

Finalmente, el componente INFORMACIÓN, que consiste en manejar el conocimiento generado en los diagnósticos y el monitoreo bajo un sistema de información geográfica (SIG), lo que nos permite relacionar mapas temáticos con bases de datos georreferenciadas. Actualmente, se está usando un *software* adecuado a nuestras necesidades, entre los que están el Idrisi y el Surfer (ver Recuadro No. 4), y se cuenta con una *ficha de información básica*, cuyo objetivo es la de estandarizar la información mínima que se necesita por microcuenca. Actualmente, se ha logrado un sistema de información sobre microcuencas serranas andinas de alcance nacional, que funciona sobre la base de la Red CINTEL (ver Fig. N°8) impulsada por el Centro de Información Tecnológica (CENITEC) de la CCTA, y a través del cual circula tanto la información georreferenciada como material documental especializado en

el tema (boletines, alertas e investigaciones bibliográficas,...) utilizando tanto los medios de comunicación convencionales como los telemáticos (correo-e, gopher, WWW,...).

### V. LAS LIMITACIONES DE LA GESTIÓN EN MICROCUENCAS

En el quehacer en las microcuencas, hoy, podemos observar algunas limitaciones con las que nos encontramos quienes tratamos de llevar a cabo una gestión integral de microcuencas y que están siendo superadas por las experiencias antes mencionadas:

1. La falta de **integralidad** en los proyectos en ejecución, manifestada en la dispersión y desconexión de las acciones que se implementan en las microcuencas. Por ejemplo, en el aspecto hídrico: el concepto de gestión del ciclo hidrológico no es utilizado para referirse a la unidad que existe entre la construcción de la infraestructura de riego (reservorios, canales) con la conservación de suelos (terrazas, zanjas), la protección de los bosques y matorrales y, por último, la conservación de los bofedales y manantes de las cabeceras. Estos componentes se ven aislados unos de otros y, espacialmente, no guardan una secuencia.
2. Una débil **institucionalidad** que ejecute las estrategias y acciones que demanda una gestión integral y sostenida de la microcuenca (inestabilidad de los Proyectos). Sin embargo, existen algunas experiencias de institucionalidad para la gestión integral: el Comité de Desarrollo de la Microcuenca (CCAJO, Cusco), el Consejo de Desarrollo de la Microcuenca (IDMA, Huánuco) o la Casa de la

Cultura Indígena (CADEP, Cusco). Otras instituciones están en proceso de cambio hacia la gestión de microcuencas, como son los Comités de Desarrollo Distrital (CDD) en Abancay (experiencia PREDES 1995). A nivel nacional y por parte del estado existe la experiencia de PRONAMACHCS, con más de 10 años de trabajo.

3. Situación **económico-cultural** difícil, tales como la extrema pobreza, con altas tasas de mortalidad infantil: mayores de 100 por mil en la Sierra Sur, por ejemplo; subordinación cultural, alcoholismo, entre otros. Todos estos problemas se manifiestan en procesos de presión y degradación de los recursos naturales, DESERTIFICACION, los que a su vez agudizan la pobreza, creando lo que se ha llamado "el círculo perverso: pobreza-desertificación-pobreza". Además de un entorno mayor cultural contrario a lo comunitario y más bien impulsor del individualismo.
4. Desinformación: Carencia de **información sistematizada básica**: mapas sobre todo.
5. Ausencia de sistemas de vigilancia, seguimiento, control (SISTEMAS DE MONITOREO). Un ejemplo de esta carencia es la casi ausencia total de estaciones meteorológicas en microcuencas a diferentes niveles altitudinales.
6. El doble discurso con respecto a la educación, es decir: que todo el mundo habla de ella y la defiende pero en los presupuestos apenas si aparece.

### VI. PERSPECTIVAS

Las grandes preocupaciones y temas centrales en microcuencas para los próximos 2 años (1998-2000) en el Perú

1. La **cuestión conceptual**: Una revisión de varios conceptos utilizados (desarrollo, sostenibilidad, equilibrio,...) que hoy son verdaderos "actos de fé", así como la incorporación de otros: (1) microclima, (2) diversidad biológica, (3) ciclo del agua, (4) capacidad de carga, (5) impacto ambiental.
2. Los **sistemas de monitoreo participatorios**: armados y puestos en funcionamiento.
3. La conformación de **sistemas de expertos** con flexibilidad y capacidad de ponerse en funcionamiento de acuerdo a las posibles situaciones que se podrían presentar.
4. La **tenencia de tierras** y la **privatización del agua**: Dos situaciones que van a cambiar las reglas de juego y de planificación significativamente.
5. El **mercado**: La generación de excedentes, en forma sostenida, como condición para el ingreso al **mercado**.
6. La **institucionalidad**: Reconocimiento y fortalecimiento de las instituciones existentes como las nuevas en función de la gestión integral de microcuencas.
7. El trabajo social: **Educación**. Las escuelas sobre todo, los currícula con temas relacionados con las ofertas y limitación del medio en que se hallan (microcuenca).

8. El tema **hábitat humano** (vivienda, servicios,...) en el caso de los proyectos de desarrollo rural son frecuentemente postergados y es necesario trabajarlo con mayor fuerza.
9. La **seguridad alimentaria** como un indicador de gestión integral y de sostenibilidad.
10. La **identidad cultural** como componente básico de la gestión e indicador de capacidad de uso y conservación de los recursos naturales y medio ambiente.
11. Las microcuencas como espacio de concertación, que crean condiciones para los **CONSENSOS**.

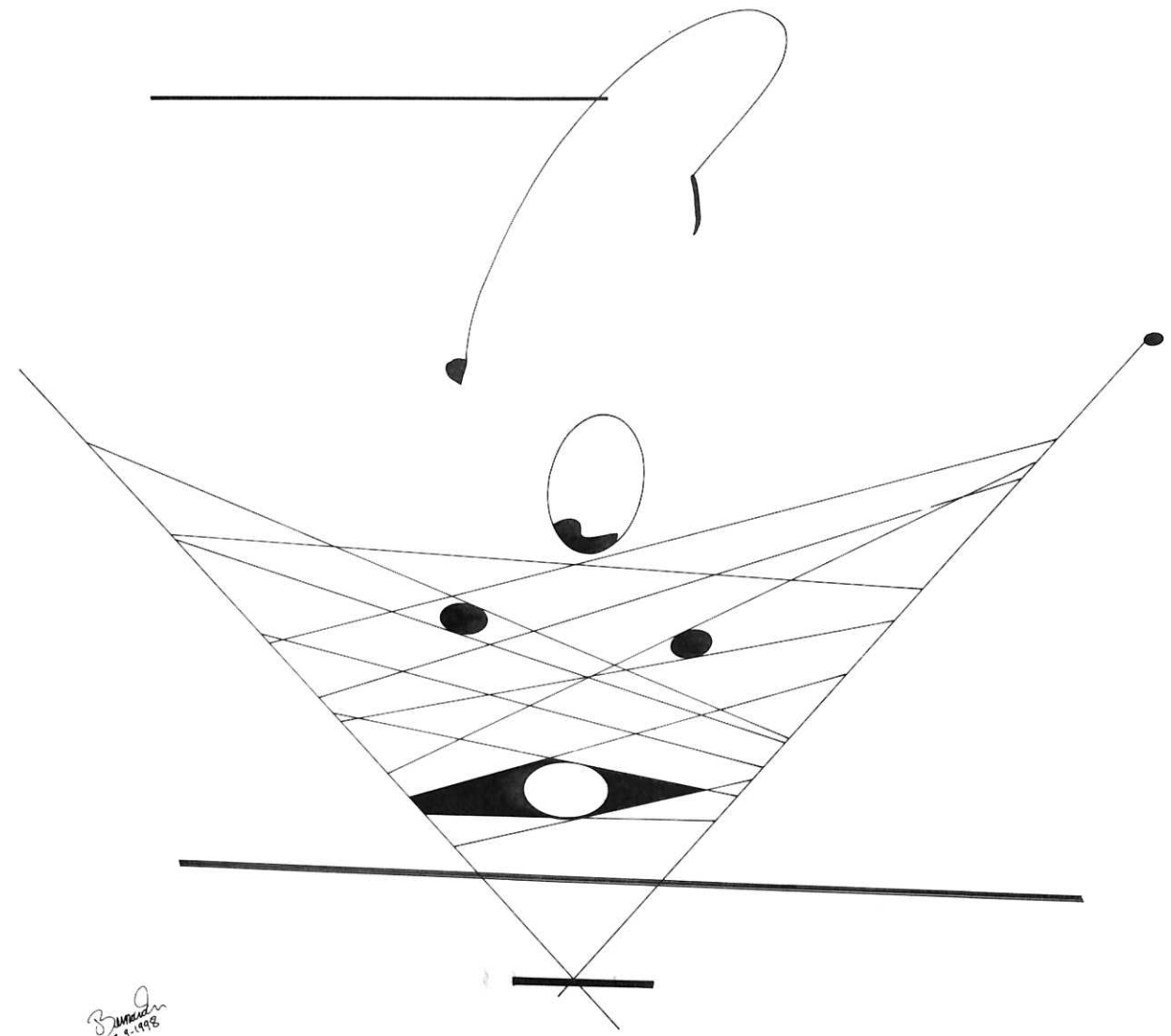
### VII. CONCLUSIONES

1. La **gestión integral de microcuencas** constituye la propuesta sostenible más viable para la administración de espacios tan complejos como son las **montañas**.
2. La gestión integral de microcuencas es una propuesta eminentemente **organizativa** con componentes tecnológicos.
3. La **seguridad alimentaria** puede constituirse en un indicador básico de la sostenibilidad de la gestión integral de microcuencas.
4. El **agua** puede ser el recurso interdisciplinario, vertebrador, bisagra y consensuador que sea capaz de darle integralidad a las propuestas de gestión integral de cuencas.
5. La gestión integral de microcuencas nos permite, en la medida que reconoce y acepta la verticalidad, administrar la **diversidad**

desde la biológica hasta la cultural y el **riesgo**.

- 6. La **educación y capacitación** son fundamentales para garantizar el éxito de la propuesta.
- 7. Es la etapa del **monitoreo** de los proyectos de gestión sostenible de microcuencas.

- 8. El intercambio de **información** diaria ente los proyectos, a nivel de países andinos, deberá ser uno de los rasgos de los próximos 5 años.



B. M. G.  
4.1.1998





**DECLARACIÓN DE MONTEVIDEO:**

**E**ntre las conclusiones del II Encuentro de las Aguas, una de las premisas básicas evidencia que el agua es esencial para la sustentación de la vida, para el desarrollo económico y para la preservación de los ecosistemas

Los indicadores disponibles muestran una situación de gran preocupación. Diversos puntos en Latinoamérica y en el Caribe podrán sufrir las consecuencias de un fenómeno no experimentado por generaciones anteriores. "La escasez de agua". Para disminuir esta crisis, cambios radicales en las prácticas y actitudes relativas a la gestión y desarrollo de los recursos hídricos son necesarios incluyendo creatividad y el desarrollo de una nueva cultura hídrica, no solamente entre los usuarios, pero también, y principalmente entre los formadores de opinión y aquellos que formulan las agendas políticas de los gobiernos de los países y de los foros internacionales de asistencia técnica y financiera.

El II Encuentro de las Aguas, a través del programa propuesto concentró su atención en estos problemas globales y ciertamente contribuye como medio extraordinario para deliberar y discutir los temas hídricos regionales, así como en el escenario internacional bajo un enfoque preciso, con el objetivo de incluir los temas en las agendas técnico/políticas de los participantes.

En el II Encuentro de las Aguas se busco un paso adelante y fue una oportunidad para realizar un balance de las actividades desarrolladas e iniciativas recientes desde Mar del Plata; Río 92-Agenda 21 y su Capítulo 18 Agua Potable. Los Diálogos Interamericanos de Recursos Hídricos de Miami Buenos Aires y hace poco tiempo, de Panamá en Marzo de 1999; La Cumbre de Santa Cruz de la Sierra y su Plan de Desarrollo de las Américas y otras iniciativas que orientan el tema como el Consejo Mundial del Agua-WWC; Sociedad Global del Agua-GWP; y la Visión del Agua para el año 2000.

El conjunto los 368 participantes del II Encuentro de las Aguas, incluyendo Ministros, Secretarios, Técnicos Investigadores, Autoridades Públicas y Especialistas en Recursos, Hídricos de los Países aquí presentes, expresan su reconocimiento al Ministerio de Relaciones Exteriores, al Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca de Uruguay y al Instituto Interamericano para la Agricultura (IICA) - Centro Regional Sur y Agencias de Cooperación Técnica de Uruguay y de Brasil, por la organización del evento.

El II Encuentro de las Aguas en su programa presentó temas generales en los recursos hídricos que son de fundamental importancia para la sociedad.

Las sociedades humanas siguen valorando y dependiendo directamente de estos recursos para la producción de alimentos. La seguridad alimentada mundial por si sola, demanda recursos hídricos y sistemas costeros y marítimos saludables.

Las soluciones a los crecientes problemas costeros y marítimos que enfrenta el globo tendrán que tomar en cuenta

un complejo conjunto de cuestiones sociales, económicas y ambientales que los tradicionales enfoques sectoriales nunca han podido resolver. Hacen falta, más bien enfoques integrados de gestión, multisectorial que reconozcan la interconexión entre los recursos y los usos que se les da y en los que la mitigación de la pobreza y la gestión ecosistémica desempeñen un papel central.

El desarrollo y la implementación de enfoques de gestión integrados requerirán de un liderazgo fuerte por parte de los gobiernos y las comunidades. Sin este liderazgo, el deterioro de los recursos costeros y marítimos seguirá acelerándose, y se perderán las oportunidades todavía disponibles para responder en forma "proactiva" a estos problemas, antes de que se ponga en peligro el desarrollo sostenible. Estos temas fueron resaltados en la Declaración de Santa Cruz de la Sierra y en su Programa para el Desarrollo Sostenible de las Américas, que firmaron y acordaron ejecutar los Jefes de Estado de todos los países miembros de la Organización de los Estados Americanos (OEA).

Como avanzar hacia nuevas soluciones en la toma de decisiones:

1. Destacar la voluntad política expresada por el Gobierno del Uruguay sobre la necesidad de focalizar el tema del manejo y utilización de los recursos hídricos, en forma técnica, política e institucional;
2. Fortalecer la transferencia de la transferencia de experiencias y tecnologías en el uso y manejo de los recursos hídricos entre los países en desarrollo (sur - sur) y de los desarrollados y en desarrollo (norte - sur);

3. Replantear y rediseñar los programas de manejo de datos para que resulten más precisos, prácticos y eficientes; generen mayor información a partir de menos datos; y satisfagan los objetivos programáticos en términos económicos mensurables. Esto es posible gracias a los nuevos avances en la tecnología de monitoreo, junto con la modernización institucional de los programas de vigilancia. Si bien no se está dando en forma exclusiva en la agricultura, los ministerios del ramo pueden sacar provecho de estos avances, al garantizar que la recolección de datos ofrezca valiosas enseñanzas sobre el impacto de la agricultura en la calidad del agua.
4. Adoptar los avances recientes en la tecnología de la información que ofrecen nuevos mecanismos eficientes en cuanto a costos que aumentan la eficacia de la toma de decisiones, tanto en cuestiones de gestión en un sitio como para fines de planificación e inversión en la agricultura. Si bien hay bastante información y conocimiento acumulado sobre las necesidades de calidad del agua para la producción sostenible de cosechas, mucho de esto se encuentra sistematizado en textos prescriptivos o pautas que no pueden ser usadas con facilidad por las personas involucradas en la planificación y desarrollo de la agricultura ni por los agricultores al juzgar cuáles son sus opciones alternativas de cultivos y gestión agrícola en las circunstancias concretas que enfrentan en el campo.
5. Desarrollar una cultura del agua que permita una participación responsable de la sociedad en su conjunto en la toma de decisiones con respecto al uso y manejo del recurso.
6. Capacitar profesionales como uno de los requisitos más importantes para lograr el desarrollo de los recursos humanos, con que cuenta una institución. En especial debe fomentarse la realización de eventos de formación profesional con la participación de los funcionarios encargados de instrumentar la gestión de los recursos hídricos en los mismos.
7. Disponer de los mecanismos necesarios tendientes a lograr una óptima calidad del agua utilizable por el sector primario en toda la cadena agro - alimentada, que permite la obtención de un producto final acorde con los requerimientos del comercio internacional.
8. Coordinar en forma - adecuada, la acción de los distintos organismos competencia en el tema de los recursos hídricos; promoviendo la integración de equipos de trabajo interinstitucionales e interdisciplinarios, evitando así la superposición de esfuerzos.
9. Gestión de la demanda y conservación del agua: La mayor participación de los diversos actores es un poderoso mecanismo para crear conciencia sobre el valor del agua y la necesidad de conservarla, tanto en términos de su calidad como de su cantidad. Los enfoques de gestión de la demanda, que recurren a instrumentos económicos, medidas de conservación, etc., son parte clave de las estrategias dirigidas a extender la vida de los recursos existentes y a posponer la inversión en costosos proyectos

de desarrollo hidráulico. El viejo enfoque, orientado a la oferta ya no es una forma aceptable de planificar y ejecutar proyectos. El reciclaje y reutilización del agua en el sector agrícola es un tema de alta prioridad.

10. Compartir equitativamente los recursos internacionales: El hecho de que talleres y encuentros recientes hayan tratado repetidamente el tema de los problemas hídricos transfronterizos es un indicio de la prioridad que se le asigna a esta cuestión en todo el hemisferio. Compartir equitativamente las aguas transfronterizas es importante para todos los países y clave para el crecimiento económico futuro en varios países o estados río abajo. Los participantes discutieron los avances recientes tanto en el campo de los acuerdos bipartitos como en los protocolos regionales, pero permanecen vigentes muchas discrepancias en cuanto a compartir información, conducir investigaciones conjuntas, desarrollar mecanismos para la resolución de conflictos, firmar nuevos tratados y acuerdos.

11. Se propone la institucionalización de los Encuentros del Agua con integración e interacción con otras iniciativas de interés regional. También se incluye la creación de una Secretaría Ejecutiva itinerante con representantes de los países del Mercosur y de otros centros regionales del IICA;

12. Reconocer que el IICA, como organismo interamericano especializado, ya ha propiciado y consolidado experiencias relevantes en el tema como el I y el II Encuentro de las Aguas.

13. Enfatizar la necesidad que los diferentes organismos y agencias de cooperación que trabajan a nivel internacional en el manejo de los recursos hídricos, hagan un esfuerzo para compatibilizar sus programas y objetivos. Deberán coordinar las distintas actividades, foros y conferencias posibilitando un intercambio de información, que permita el establecimiento de prioridades para la asistencia técnica y las inversiones tanto a nivel regional como hemisférico usando como base de planificación la cuenca hidrográfica.

14. Establecer un Centro de Referencia coordinador de análisis, propuestas, diseminador de información y ejecutor de posibles acciones sobre el manejo, el uso y la gestión integrada de los recursos hídricos, especialmente aplicados a la agricultura, con sede en Uruguay.

#### CONCLUSIONES TÉCNICAS

Existe una necesidad imperiosa que los países fijen sus políticas nacionales integrales sobre Recursos Hídricos.

Dicha política global sobre agua debe imprescindiblemente resolver diferentes cuestiones para definirse como tal y debe contener:

- Relevamiento, Diagnóstico, Análisis y Evaluación de la disponibilidad actual del recurso y su balance o contraste con la demanda para sus múltiples usos.
- Planes de gestión de Recursos Hídricos a nivel nacional, regional, de cuencas hidrográficas con evaluaciones periódicas, que deberán tener presente las proyecciones de

las necesidades y la identificación de la anomalía detectada en el balance entre oferta y demanda que permita efectuar previsiones que sean la base de líneas de acción concretas.

- Análisis y evaluación del impacto en el Medio Ambiente que produce tanto el inadecuado manejo del recurso, como las medidas que se adopten para paliar esta situación.
- Un Marco Jurídico Regulatorio Global del Agua como bien público jurídicamente protegido que concilie tanto el interés general como el privado.

En este contexto deben considerarse los siguientes puntos:

- Asimilar el concepto de valor económico del agua, contemplando su sustentabilidad, no solo por su condición de recurso finito, escaso en algunas regiones e inexistentes definitivamente en otras partes del planeta, sino también como un indicador más de la rentabilidad o no de su uso y utilización.

Sin embargo, esa asignación de valor económico deberá contemplar las desigualdades sociales inherentes a toda sociedad.

- Buscar la igualdad en el goce del recurso hídrico en todo el planeta, respetando una premisa elemental de cooperación y solidaridad internacional: la extracción y utilización del agua -Patrimonio de la Humanidad- deberá efectuarse en forma responsable a la existencia del mismo, priorizando la satisfacción de las necesidades básicas del ser humano.
- Desarrollar una cultura del agua que permita una participación responsable de la sociedad en su conjunto en la toma de decisiones con respecto al uso y manejo del recurso.
- La capacitación profesional es uno de los requisitos más importantes para lograr el desarrollo e los recursos humano con que cuenta una institución. En especial debe fomentarse la realización de eventos de formación profesional, con la participación de los funcionarios encargados de instrumentar la gestión de los recursos hídricos en los mismos.
- Reconocer que las universidades y centros de investigación aportan herramientas y metodologías que permiten facilitar las tareas a ser llevadas a cabo en el proceso de toma de decisiones. En este sentido se sugiere afianzar los vínculos de coordinación existente entre dichos centros y las instituciones vinculadas a la gestión y manejo de los recursos hídricos.
- La utilización de nuevas tecnologías como los sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica potencian las posibilidades de planificación, control y monitoreo de los recursos hídricos a nivel de cuenca. Se sugiere a los servicios públicos y privados, una mayor utilización de estas herramientas en la región.
- En el medio rural el agua destinada al consumo animal es la misma que usan los productores rurales; lo que aumenta la responsabilidad técnica a la hora de solucionar los problemas, ya que no solo se trata de salud animal o riegos para la producción sino también de salud humana.
- Implementar medidas concretas que contemplen la vulnerabilidad de los acuíferos, desde el punto de vista cuanti y cualitativo.

- Disponer de los mecanismos tendientes a lograr una óptima calidad del agua utilizable por el sector primario en toda la cadena agroalimentaria, que permite la obtención de un producto final acorde con los requerimientos del comercio internacional.
- Dada la importancia que está tomando la contaminación por los efluentes de las agroindustrias y de las ciudades en zonas rurales, se debería aplicar la tecnología

disponible; que minimice el impacto ambiental, de modo que el agua vuelva a recuperar su calidad antes de reintegrarse al ciclo hidrológico.

- Coordinar en forma adecuada la acción de los distintos organismos con competencia en el tema de los recursos hídricos; promoviendo la integración de equipos de trabajo interinstitucionales e interdisciplinarios, evitando así la superposición de esfuerzos.



- 2<sup>nd</sup> Inter-Regional Conference on Environment-Water "Emerging technologies for sustainable land use and water management, Lausanne, Suiza, 1-3 de septiembre, 1999  
*Organiza:* Institute of Soil and Water Management, Ecole Polytechnique Federale, Lausanne  
Comisión Internacional de Riego y Drenaje

<http://dgrwww.epfl.ch/HYDRAM/envirowater99/>

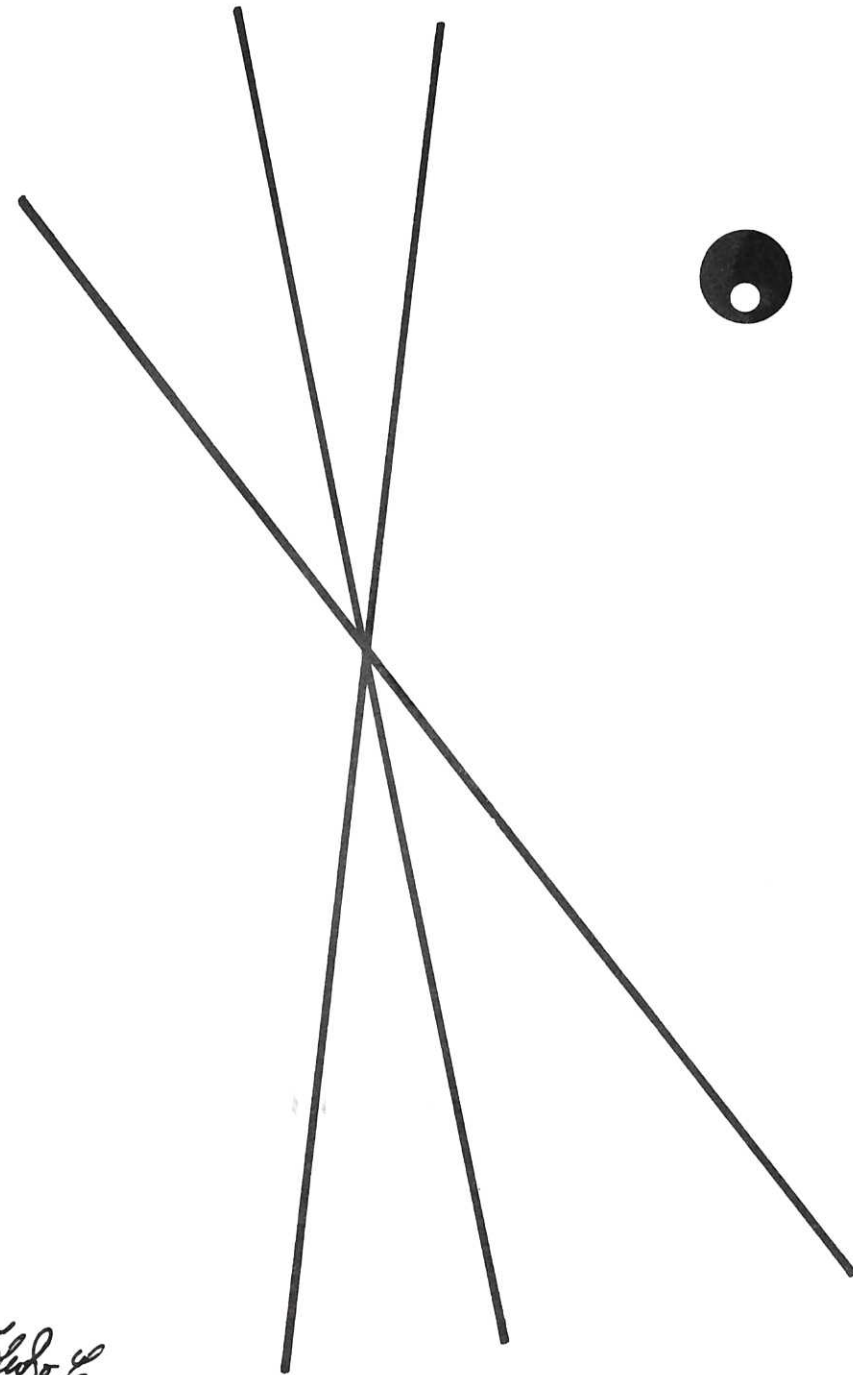
- XIV Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo CLACS-99, Pucón, Chile, 8-12 de noviembre, 1999  
*Organiza:* Sociedad Latinoamericana de la Ciencia del Suelo  
Universidad de la Frontera - Departamento de Ciencias Químicas

[clacs99@ufro.cl](mailto:clacs99@ufro.cl)

- International Workshop on Modelling of transport processes in soils at various scales in time and space, Leuven, Bélgica, 24-26 de noviembre, 1999  
*Organiza:* Institute for Land and Water Management de la Katholieke Universiteit Leuven

<http://www.agr.kuleuven.ac.be/lbh/ilwb/lbh/congress.html>





Bernardo Toledo Lora  
7-10-1999



## COMBUSTION OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS OVER MIXED-REGIME CATALYTIC MEMBRANES\*

SILVANA SALAMEA

### Keywords:

*Catalytic membranes, combustion*

### ABSTRACT

**C**atalytic membranes operating a mixed permeation regime (i.e., with significant Knudsen and laminar contributions) have been developed. The membranes prepared had presented a low pressure drop. After the addition of (-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pt, the resulting catalytic membranes were active for the combustion of VOCs. Their performance was compared with that of similar catalytic membranes operating under the Knudsen diffusion regime.

### INTRODUCTION

The development of a method of general applicability for the elimination of Volatile Organic Compounds (VOCs) by catalytic combustion remains a challenging problem in the areas of catalysis and chemical reaction engineering. The main problems stem from two sources: on the one hand, there is a wide variation in the nature of VOCs to be eliminated; mixtures are often present, and there may be significant synergistic/inhibition effects. On the other hand, VOCs combustion must be carried out under a diversity of conditions regarding concentration, release rates and temperature. Also, it is common to find a strong variation with time in the conditions of VOC

\* Publicado en *Reaction Kinet. Catalyst Letter.*

Vol. 67, N° 1, 13-19. 1999. Department of Chemical and Environmental Engineering  
University of Zaragoza, Spain.

release in a given plant, especially in batch processing. In addition, VOC removal systems based on catalytic combustion are expected to attain a high destruction efficiency (usually higher than 95%, and often operating on diluted streams), while avoiding or minimizing partial oxidation products and catalyst deactivation.

In previous works [1,2] it was found that flow-through membrane reactors operating in the Knudsen diffusion regime could be used as effective combustors for the removal of VOCs from air streams. Total combustion of airborne toluene and methyl ethyl ketone was achieved at low temperatures (150-260°C, depending on the operating conditions), over Pt/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) membranes. These membranes were prepared by deposition of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on a preexisting  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> microfiltration membrane, followed by impregnation with Pt. However, the best results in terms of combustion temperature were reached with  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> loadings between 2 and 5 wt.%, which resulted in a considerable pressure drop across the membrane.

In this work, a different approach has been followed in an attempt at reducing the operating pressure drop, while maintaining a sufficiently high combustion efficiency. The microfiltration membranes used as a starting material in previous works have an asymmetric structure, with three  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers of decreasing pore size. As has been mentioned, deposition of even moderate amounts of porefilling material on this structure results in rather high pressure drops across the membrane for the range of flowrates of industrial interest. Thus, instead of asymmetric membranes, we have prepared symmetric ceramic tubes, i.e., with a homogeneous structure in the radial direction. The aim was to

obtain a uniform wide-pore structure throughout the membrane thickness, which could then be suitably modified by deposition of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## EXPERIMENTAL

### Membrane preparation and characterization

Powdered  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Aldrich, 99.8% purity, size <10  $\mu$ m), was used as a starting material. Before attempting to mold this powder into a tube, some preliminary dust pressing experiments were carried out; 4 mm high 20 mm diameter disks were made in a steel die, in order to establish appropriate ranges of compaction pressure. For moisture contents between 5 and 10% wt.%, (required to form a paste with the desired plastic properties), the forming-pressure required to obtain a pellet with sufficient mechanical resistance varied from 200 to 150 MPa. In this work, we have tested a variety of compounds as lubricant/binding agents: tannic acid, ethylene glycol, glycerol, glucose, gum tragacanth, zinc stearate, cellulose acetate and vaseline oil. Again, after preliminary trials in the above pressure range, those formulations leading to defective disks (presence of unbound dust, scaling) were rejected. The best results were obtained with a paste of the following composition (wt%):  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 89%, H<sub>2</sub>O 6%, gum tragacanth 3%, zinc stearate 2%. This formula was further modified with the addition of silica and calcium carbonate, to facilitate sintering of the alumina tube. The final composition of the paste used was:  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 86%, H<sub>2</sub>O 6%, SiO<sub>2</sub> 3%, CaCO<sub>3</sub> 2%, gum tragacanth 2%. Zinc stearate 1%.

A tubular structure was obtained by subjecting the above paste to cold isostatic pressing (uniaxial pressing resulted in defective structures, with

strong variations in density and porosity). Before isostatic pressing, the alumina paste was distributed evenly in the annular space between the inside of a cylindrical rubber container and the outside of a stainless steel rod placed vertically along the axis of the container. The removal of the rod was facilitated by a thin solid paraffin layer, deposited by immersing the rod in molten paraffin. Isostatic pressing at 150 MPa and above gave the desired results: A homogeneous tubular structure approximately 8 cm long, with ca. 1 cm outside diameter and a wall thickness of 1-2 mm, with sufficient resistance for handling. Before drying and calcining, the tube was machine-polished to reduce the surface roughness.

A careful drying stage is critical to preserve the integrity of the membrane. The membrane was first pre-dried at 89°C, then dried at 100°C for 2 h. Before raising the temperature to the values required for sintering, the axial rod was removed by melting the paraffin layer at 160°C for 1 h. The tube was then heated from room temperature to 1300°C at 15°C/min., and kept at 1300°C for 12 h. The sintering process produced a mechanically strong structure, with almost no surface area (the starting  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> already had a very low surface, ca. 1.2 m<sup>2</sup>/g). Deposition of 2-3 wt.% of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was then obtained by means of repeated immersions in a 1 M bohemite sol, followed by drying and calcination at 500°C. Finally, Pt was deposited on the membranes by impregnation as described in [2]

The reaction system used in this work has been described elsewhere [1,2]. A mass-flow controlled air stream with the desired concentration of methyl ethyl ketone (MEK) or n-hexane entered the membrane tube side and

then permeated across the membrane wall, where reaction took place upon contact with Pt at the desired temperature. The BET surface area of the membranes increased with the amount of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deposited, reaching a value of 5.9 m<sup>2</sup>/g for a  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> load of 2.6 wt%. Mercury intrusion porosimetry showed a rather open structure, with most of the pore volume contributed by large pores in the region 2-10  $\mu$ m. SEM observations (not shown) indicated that the membrane tube was formed of agglomerated  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles, with individual dimensions of a few microns;  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deposits partly filled the voids between particles. Temperature programmed oxidation (TPO) experiments showed that the lubricants and binders were removed at temperatures below 450°C.

## RESULTS AND DISCUSSION

Permeation experiments were carried out at room temperature on an automated gas permeation cell in order to assess the relative contributions of the Knudsen and laminar terms to the permeation flux. The change of permeation flux with the average pressure in the membrane is given by [3]

$$F = 1.06 \frac{\epsilon r}{L \tau \sqrt{MRT}} + 0.125 \frac{\epsilon r^2}{L \tau \mu RT} P_{av} = \alpha \beta P_{av}$$

where F is the permeation flux per unit of time, area and pressure difference (mol/m<sup>2</sup>s bar), P<sub>av</sub> is the average pressure across the membrane (bar), and L,  $\epsilon$ ,  $\tau$  and r are, respectively, the membrane thickness, porosity, tortuosity and pore radius,  $\alpha$  and  $\beta$  indicate, respectively, the Knudsen and laminar contributions to the permeation flux. As the relative contribution of Knudsen permeation increases, the slope of the F vs P<sub>av</sub> curve decreases, becoming zero for pure Knudsen flow.

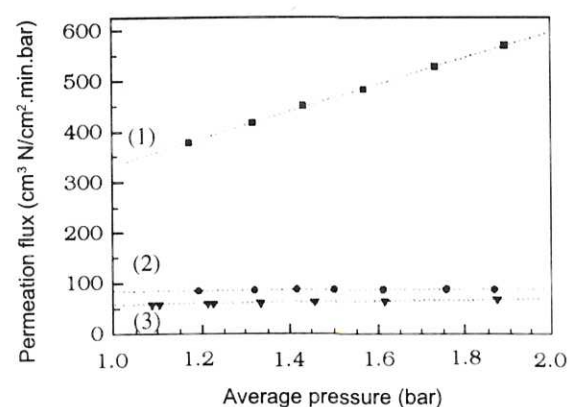


Fig. 1. Permeation flux as a function of the average pressure. Key: 1: Homogeneous structure membrane, prepared in our laboratory as described above plus addition of 2 wt. %  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2: Asymmetric membrane, 5 nm separation layer, plus 1.7 wt. %  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 3: Asymmetric membrane, 5 nm separation layer, plus addition of 2.5  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

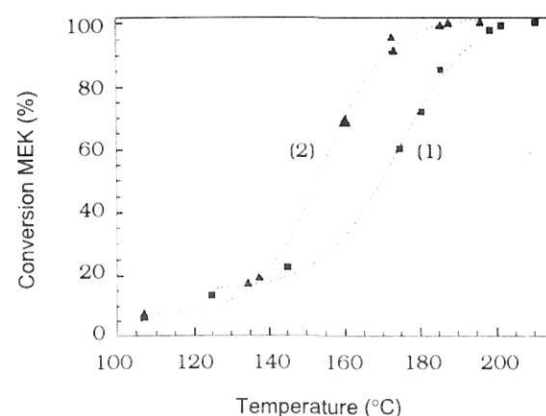


Fig. 2. Light-off curves for MEK combustion Key: 1: Homogeneous structure membrane (2wt.%  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.15 wt.% Pt), space velocity: 5625 h<sup>-1</sup>, MEK concentration 2500 ppmV. 2: Asymmetric membrane, (2.5 wt.%  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.17 wt.% Pt), space velocity: 4500 h<sup>-1</sup>, MEK concentration 2750 ppmV

Figure 1 shows a plot of the above equation for three different membranes, with  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> loadings around 2%. It can be seen that the permeation flux obtained with the homogeneous structure membranes is considerably larger than that corresponding to asymmetric microfiltration membranes. Also, the percentage of Knudsen contribution measured at ambient temperature and pressure with homogeneous membranes is only about 20%, which

compares with values of 96.8% and 99.3%, respectively, for the other membranes corresponding to curves 2 and 3 in Fig. 1.

Figures 2 and 3 compare the performance of the asymmetric membrane and a symmetric (homogeneous structure) membrane, at similar  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Pt loads. The asymmetric membrane corresponds to the last curve shown in Fig. 1.: it has a 5 nm

separation layer, 2.5wt.%  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 0.17% Pt. On the other hand, the homogeneous structure membrane had a  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> load of 2wt.%, and 0.15 wt.% Pt. It can be seen that, under the conditions employed, the asymmetric membrane gives considerably lower combustion temperatures (light-off temperatures are 15-20°C lower for the combustion of MEK and about 50°C lower for the combustion of *n*-hexane). Also, the slope of the conversion-temperature curve is higher for the asymmetric membrane, where Knudsen

diffusion is the dominant transport mechanism. This is consistent with the finding of previous works [2], which indicated a reduction of the mass transfer resistance for membranes operating under the Knudsen diffusion regime. On the other hand, operation under the Knudsen regime required a considerably higher pressure drop: 350 and 450% higher than the homogeneous structure membranes for the conditions of Figs. 2 and 3, respectively.

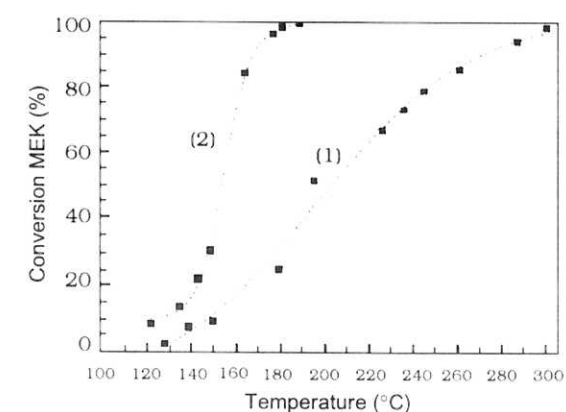


Fig. 3. Light-off curves for *n*-hexane combustion. Key: 1: Homogeneous structure membranes, (2wt.%  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.15wt.% Pt), space velocity: 3390 h<sup>-1</sup>, C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> concentration: 2900 ppmV. 2: Asymmetric membrane, (2.5wt.%  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.17 wt.% Pt), space velocity: 3300 h<sup>-1</sup>, C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> concentration: 2650 ppmV.

## CONCLUSIONS

As could be expected, the light-off temperatures obtained for membranes operating under the Knudsen diffusion regime are lower than those found for the mixed-regime catalytic membranes prepared in this work, where the laminar term is the main contribution to the permeation flux. Under the Knudsen regime molecule-catalyst surface collisions prevail over molecule-molecule collisions, and therefore a reduction of the mass transfer resistance inside the pores can be anticipated, resulting in lower com-

busion temperatures. However, permeation under the Knudsen diffusion regime is obtained at the expense of a considerably higher pressure drop. A trade-off exists between the increase in combustion efficiency (reduction in operating temperatures), and the increased pressure drop under the Knudsen regime. Given the operating costs associated to the latter, symmetric membranes with a mixed permeation regime may be preferred in spite of the 15-50°C increase in combustion temperatures.



### REFERENCES

1. M.P. Pina, M. Menéndez, J. Santamaria: *App. Catal. B: Env.*, 11 L19 (1996).
2. M.P. Pina, S. Irusta, M. Menéndez, J. Santamaria R. Hughes, N. Boag. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 4557 (1997).
3. Y.S. Lin, A.J. Burggraaf: *J. Am. Ceram. Soc.*, 74, 219 (1991).





UNIVERSIDAD DE CUENCA

Centro de Documentación "Juan Bautista Vazquez"



46883-1