

103843

# andies

ANALES · REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA

PROGRAMA PARA EL MANEJO DEL AGUA Y DEL SUELO · PROMAS

MANEJO DEL AGUA Y DEL SUELO

INVESTIGACION CIENTIFICA

INVESTIGACION CIENTIFICA

MANEJO DEL AGUA Y DEL SUELO

TOMO 48 · AGOSTO 2004





REVISTA DE LA  
UNIVERSIDAD  
DE CUENCA  
anales

CIENCIAS NATURALES

**Rector:**

*Jaime Astudillo Romero*

**Vicerrector:**

*Fabián Carrasco Castro*

---

TOMO 48 • AGOSTO 2004



Edición:  
*Galo Carrión Alvarez*

Dirección:  
*Felipe Cisneros Espinosa*

Consejo Editorial:  
*Felipe Cisneros Espinosa*  
*Bert De Bièvre*  
*Patricio Carpio Benalcázar*  
*Galo Carrión Alvarez*

Diagramación:  
*Fabián Cordero*

Impresión:  
*Gráficas Hernández*

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



103873



# contenido

• Editorial.

F. Cisneros

9

### Estrategias para el manejo del agua y del suelo

• Alianza Estratégica Internacional de Investigación.

J. Feyen

13

10329  
1

• Promas: un estudio de caso de una implementación exitosa de Sistemas de Información Geográfica en países en vías de desarrollo.

J. Deckmyn, J. Feyen, F. Cisneros, B. De Bièvre

23

10311  
2

### Aportes técnico-científicos para el manejo del agua y del suelo

• Adaptación del sistema de riego por tubería de compuertas en terrenos de altas pendientes (>12%) definición de parámetros de campo para su aplicación y diseño del sistema de compuertas.

F. Cisneros, E. Pacheco, B. De Bièvre, J. Feyen

35

10312  
3

• Utilización de la infiltración lateral (subsuperficial) en terrenos de altas pendientes (>12%) como un método de riego alternativo.

F. Cisneros, E. Timbe, B. De Bièvre, J. Feyen

45

10313  
4

• Caracterización hidráulica en suelos de pendiente pronunciada.

L. Timbe, B. De Bièvre, J. Feyen, D. Jacques

55

10314  
5

7



© ANALES • REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA  
CIENCIAS NATURALES • TOMO 48

Primera Edición  
Agosto 2004

Impreso en Ecuador  
ISSN N° 0041 - 8390

Correspondencia y canje:  
Lcda. Nelly Peña  
Departamento de Cultura  
Universidad de Cuenca  
Casilla No. 168  
Telf.: 2831 688 (ext. 272)  
Fax: 2835 197  
Cuenca - Ecuador

E-mail: cultura@ucuenca.edu.ec

Director: F. Cisneros  
Tit. F. J. / Cisneros  
Revista: F. J. / Cisneros  
Lcda. Nelly Peña



- 60315
- Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOP MODEL.

W. Buytaert, R. Célleri, B. De Bièvre, J. Deckers, G. Wyseure

67

### Aportes sociales

- 60316
- Innovaciones comunitarias para el manejo y conservación de los recursos naturales y el mejoramiento de la calidad de vida: cambios y sostenibilidad.

P. Carpio, M. Falconí, E. Toledo

77

### Otras investigaciones científicas

- 60317
- Espectro de energía disipada y control del daño sísmico.

E. García, R. Riddell

93

# editorial

El manejo y conservación del agua y del suelo, comprende actividades de variada índole dentro de las cuales la Sociedad en general debería alcanzar e implementar decisiones que permitan llevar adelante, procesos que afecten la posibilidad futura de disponibilidad y/o la calidad del agua y la conservación del suelo, así como, los riesgos relacionados con la degradación del agua y del suelo que amenacen actividades productivas para la sociedad. Las decisiones pueden envolver aspectos sociales y económicos de la sociedad, y conservar o minimizar la degradación de los recursos agua y suelo tanto en la actualidad como en el futuro. El proceso de toma de decisiones, requiere del involucramiento de los gobiernos, instituciones, negocios e individuos. En la actualidad el manejo y conservación del agua y del suelo en general y en particular en el Ecuador, no consigue cumplir total o parcialmente los objetivos indicados. Adicionalmente la Sociedad en general y sus instrumentos de investigación, no disponen de la capacidad de predecir ni cuantitativa ni cualitativamente los impactos de las decisiones y políticas aplicadas en lo relativo al manejo del agua y del suelo.

Con estos antecedentes, el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS) de la Universidad de Cuenca, intenta constituirse para la sociedad en el instrumento apropiado que pueda ayudar a resolver dichos problemas teniendo como base la investigación; de esta manera concentra en sus programas académicos de pregrado y postgrado y en sus actividades de investigación, varios aspectos del manejo integral del agua y del suelo, incluyendo cómo estas decisiones son tomadas e implementadas. En particular especial énfasis se da a la escasez de información básica disponible, y como esto afecta al proceso de toma de decisiones. Mientras más escasa la información, más difícil se torna la toma de decisiones adecuadas.

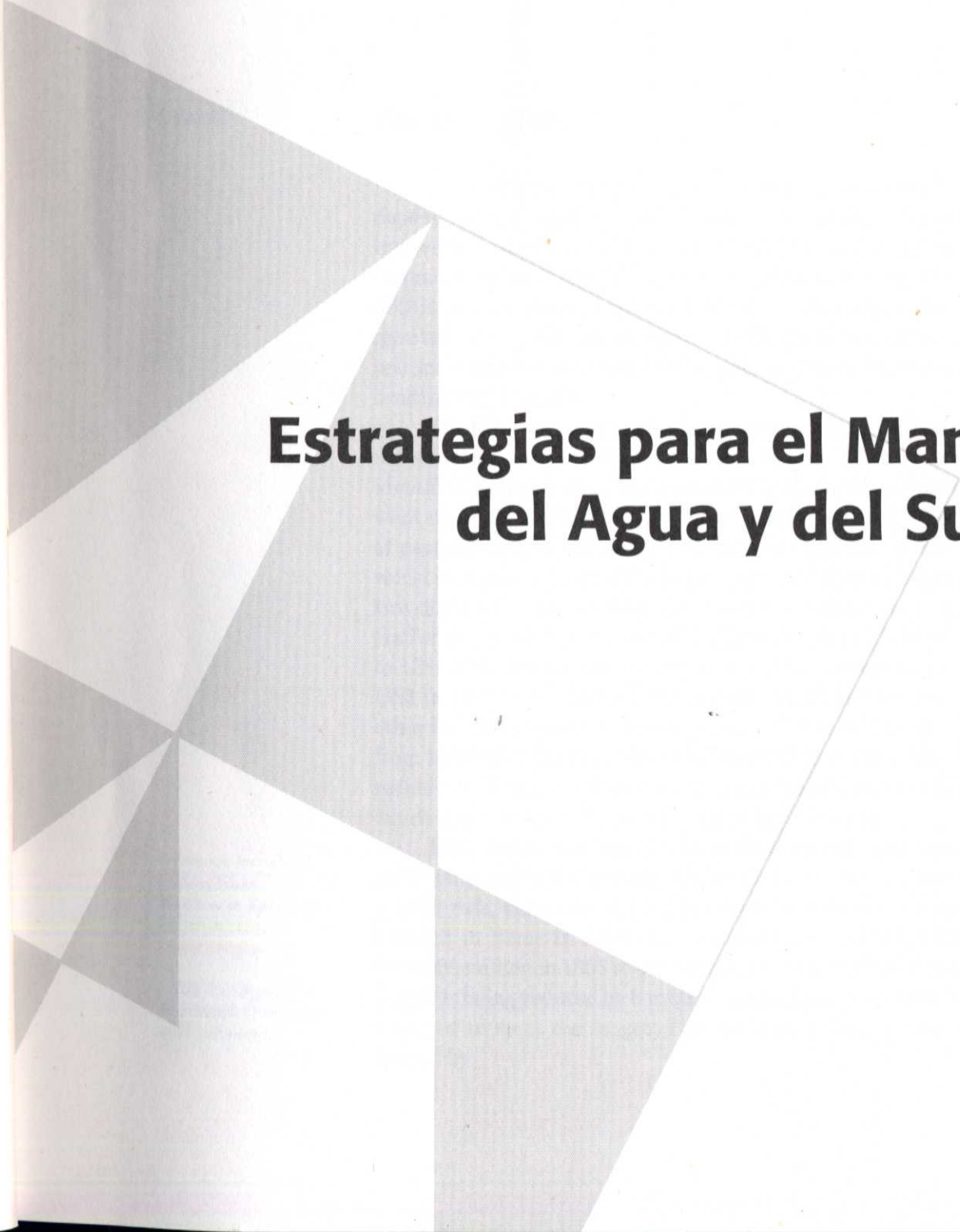
En este contexto el Programa para el manejo del agua y del suelo a través de la presente publicación, pretende dar a conocer los avances que en esta materia se vienen registrando



en la investigación científica con el relacionada; esta publicación dividida en cuatro secciones aborda temas relacionados con las estrategias para el manejo del agua y del suelo, presenta algunos aportes científicos así como también algunos aportes sociales, y finalmente otras investigaciones científicas.

Con la publicación de este tomo (el tercero en la serie agua, suelo, tecnologías) que corresponde al No 48 de la revista ANALES, Mayo del 2004 relacionado con Ciencias Naturales, Agua Suelo y Tecnología, la Universidad de Cuenca por intermedio del Programa para el manejo del agua y del suelo, pone a consideración de la comunidad universitaria y de la sociedad en general, algunos de los trabajos de investigación científica relacionados con su temática.

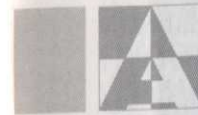
*Felipe Cisneros Espinosa*  
DIRECTOR DEL PROMAS



## **Estrategias para el Manejo del Agua y del Suelo**

**Sección**





# Alianza Estratégica Internacional de Investigación

J. Feyen\*

## The background

Achieving sustainable development goals at a global level strongly depends on the rapid cultural, economic, technological development and innovation, and the widespread diffusion and application, of new technologies in non-OECD<sup>1</sup>, as well as OECD countries. The point is that at this moment many countries in the South do not have the capacity and motivation to take advantage of developments that take place. The political, socio-economic conditions in many of those countries are seriously limiting development.

The following tries to give an overview of how complex and dramatic the situation is and will be in the near future. Thirty years ago the UN identified 24 countries as the least developed countries, today this number went up to 48, of which 33 LDC are situated in Africa. The total number of people living in the 48 LDC equals 614 million, or one tenth of the world population. Most of the 614 million inhabitants' income is less than two dollars per day and the life expectation does not exceed 50 years. Half of the population in the LDC is illiterate, can read nor write. According to UNCTAD foreign investment in the LDC increased from 0.6 billion US\$ in 1990 to 5.2 billion US\$ in 1999, which still is very small. At the other hand total overseas development aid from OECD countries dropped from 100 billion US\$ in 1998 to 54 billion US\$ in 1999. This amounts are rather small compared to the military expenditure of OECD countries, which is currently estimated at 500 billion US\$/year.

FAO states that world food production only increased by 1.2% in 2000 compared to 2% in 1999. This is slightly below the world population growth rate, currently at 1.3% per year. FAO's target at the World Food Summit in Rome in 1996 was to reduce the number of hungry people from 800 million in 1995 to 400 million in 2015. But the number of hungry people is being reduced by 8 million/year only, and not the 20 million/year required to meet the target! The declining trend in food production is caused by:

\* Professor. Institute for land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium.

1. OECD = Organisation for Economic Co-operation and Development.



- uneven growth in food production, especially slow in countries with economic/financial problems;
- natural catastrophes and civil disturbances;
- the persistence of severe food shortages requiring external assistance;
- the increase of HIV/AIDS which is now putting rural development and food at risk;
- cereal supply risks for importing countries;
- trade obstacles facing food exporting countries; and
- decreasing levels of official development assistance to agriculture, in view of the difficulties of many poor countries to adequately strengthen their infrastructures and services for sustainable agricultural and rural development.

China experiencing rapid demographic transition, affecting 20% of the world's population, will need to increase grain production by 4.47 billion kg per year to keep pace with the growing population between now and 2020. This will require significant improvements in agricultural technology and land resource management. China may have to increase its annual grain imports to 40-50 million tons. But if China lags in its agricultural development and research, it may find itself importing a lot more than that, perhaps as much as 300 million tons. That would be good news for its larger suppliers, such as the United States and Australia, but could be a disaster for poor people if prices rise too. As for employment, China's working-age population will peak at 955 million in 2020 (732 million in 1995). The massive increase in the supply of labour will mainly be directed to the urban market. This will pose severe social and environmental problems, although it will initially provide an opportunity for investors seeking cheap labour.

Another way of illustrating the impact of the growing world population on earth's resources is the availability of fresh water. The main source of pressure on water supply will be population growth. World population is projected to grow from 6 billion at present to 8 billion in 25 years' time. Most of that growth will take place in countries which are already exposed to water-related

difficulties, such as Ethiopia, whose population is expected to more than double from 62 million today to 136 million in 2025; that is about half of the population of the United States today. The rapid urbanisation that will accompany such fast population growth – the urban population of developing countries will increase by a remarkable 2.5 billion over the next 25 years – will pose its own serious problems for water supply. Many cities simply do not have the resources to accommodate the extra people. Infrastructures are already under strain and the financial burden of expanding services will be immense. Probably as much as 1 trillion US\$ of new investment would be needed to provide adequate sanitation for the urban population of poor countries. And they have to compete for this investment as richer countries upgrade or replace their existing systems. Pressure for investment in developed countries is bound to grow in line with public awareness, not just of environmental, but of sanitary issues too. It came as a shock to many, for example, to learn that the athletes who died after falling into a river in Tel Aviv during the 1997 Maccabiah Games did not drown, but were poisoned by the water.

One trend that is likely to aggravate water shortages is global warming, with 1.5 to 3 degree rise in global temperatures expected over the 21<sup>st</sup> century, according to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). More water will clearly be consumed for irrigation and drinking, but there may be indirect effects, which would be more difficult to cope with. There could be increased evaporation and reduced groundwater recharge; a higher frequency of extreme weather conditions, such as storms, which can cause water treatment systems to overload; and a shift in climate zones and seasons which could have marked effects on water supply. Even in regions where the total annual precipitation will not change much, problems could arise if rainfall became concentrated in the winter or if it shifted away from agricultural zones.

So what can be done? There are large-scale technical solutions, which have helped countries like Egypt. Despite the droughts it was spared the tragic famines that struck Sub-Saharan Africa in

the 1980s, even though it relies on the same hydrological basins for its water supply. And when it comes to deadly natural disasters like the flooding that killed thousands in China in 1998 and made millions homeless, one strategy may be to build huge dams both as protection against climate fluctuations and to provide hydroelectricity power. However, interfering with nature can have unforeseen consequences. Critics of large technical solutions like to point to the Aral Sea drying up after the Soviet Union expanded cotton production by massive irrigation. For the time being at least large-scale technical solutions are out of favour. As a reaction to previous increasingly interest is given to smaller-scale technical solutions. Jordan for example is considering a scheme to take water from the Gulf of Aqaba on the Red Sea and transfer it by canal to the Dead Sea, using the difference in elevation to drive a hydropower plant. This plant would desalinate seawater and the brine rejected from the desalination plant would be discharged in the Dead Sea to stem the drop in sea level. Such projects, however ingenious, are unlikely to provide major sources of new water supply.

The population explosion, rapid urbanisation, water shortages and shrinking farmland, all of these factors will have to be taken into account if we are to feed tomorrow's world. In practice it means that food output will actually have to double by 2025, especially if average consumption per head rises in the poorer countries. For the moment food surpluses are concentrated mainly in OECD countries. According to an FAO study, by 2010 the OECD countries will be producing 723 kg of grain per head (a little over 1 billion tons) compared to only 230 kg (1.3 billion tons) in non-member countries. These will have to import some 162 million tons of grain from the OECD area, and that will have implications on their financial resources.

As stated in previous the challenges for the world will be tremendous in the coming 25 years, mainly due to the population explosion and the political, economic, financial and social distortion in many of the developing countries. 25 years is not that long a period, particular realising that my grandchildren by then will be between 25 and 30 years old. They will be at the start of their active

life and fully confronted by the global problems of the 2025s. What we have to realise today is that:

- the situation in the South affects the North, and vice-versa;
- solutions for the problems in 2025 have to be prepared today, there is no time to waste;
- the problems will be so complex that investments in training and research, in the North and particular in the South have to increase exponentially; and
- investment in military expenditure has to be re-directed into investments in agricultural development, in securing water supply, in coping with social unrest, and other aspects.

### The role of higher education and research

Whereas the problems are largest in the LDC, and will increase most as population continues to grow, it is certainly not surprisingly that institutions of higher education in those countries are in poor – deplorable – shape, not able to fulfil the role they should play. Higher education witnessed a checkered history in policy making in developing countries, on the one hand, and in development co-operation, on the other. In Africa, for example, in the early post-colonial days of the 1960s, higher education received quite a bit of attention, waned afterwards from the mid/late 1970s onwards, suffered serious set-backs during the 1980s and early 1990s, and only very recently is starting to find its way back onto the policy agenda (World Bank, 1998/9, 2000). In fact, as Ade Ajayi et al. (1996) put it – many old African Universities are 'a mere shadow of their earlier glory'. Tanzanian President Mkapa recently even went as far as to go on record saying that higher education in Africa has become increasingly obsolete! Fortunately the situation of higher education in East Asia and most countries of Latin-America is less dramatic.

At first, during the 1950s and 1960s, higher education received support, particularly in the construction of new campuses and the expansion of established ones. An important aspect of these



developments was that, in many such cases, a practice of teaching and research developed that was driven by internal agendas, rather than donor-driven. During the 1970s, mainly under the influence of World Bank, who was focusing the allocation of aid money on the rate of return analysis on investments, led to the conclusion that investment in primary education was the better social investment, thereby tipping the balance was not high on the agenda. Social sectors in general, and education in particular, did not feature prominently at this early phase, and the bias against higher education, therefore, intensified.

Later on, during the late 1980s and early 1990s, when it became transparent that development would entail a more protracted process, the emphasis in aid shifted towards social development. Capacity building re-entered the agenda of donors, preparing the field for a renewed emphasis on education, albeit at first nearly exclusively centred on primary education. Yet the 1980s, while leading to a retreat from higher education in many of the less developed countries, ushered in a new era characterised by new challenges, such as: increased globalisation coupled with knowledge-driven development and the information and communication technology (ICT) revolution. These challenges put a heavy burden on many of the least developed countries in terms of widening the knowledge gap against a background of years of neglect of higher education and research.

Only recently has the pendulum in policy discourses swung back towards greater emphasis on the role of higher education, not only for its importance for meeting these new economic challenges, but also to enhance democracy supported by a vibrant civil society, good governance, and local capacity to develop effective policies. Indeed, more recent work propelled by the World Bank has challenged the earlier view that policy reforms should be purely driven by imposed aid conditionalities, but instead be rooted in democracy, good governance and an internal

capacity to formulate appropriate policies. Previously led currently to the recognition that development of higher education and learning are a necessity in order to allow the countries to design their own political agenda and establish good governance, being the basis for democracy. Today an increasing interest of donors willing to invest in higher education and learning is noticed. The foregoing is badly needed in order that the countries should have the share of qualified intellectuals, able to define appropriate solutions for the problems the society is facing today and tomorrow. The challenges for highly qualified personnel in the society are immense, also the time to find solutions is so short, and it is regrettable to notice that governments and donors neglected too long investment in higher education. Luckily that a shift in priority of funding is noticed. It is hoped that governments with the assistance of donors will take the correct initiatives to further strengthening higher education and research.

Whereas traditionally the forms of co-operation in higher education tended to bifurcate along human resource development (scholarships for students in developing countries within northern institutions of higher education), and institutional capacity-building development, today a clear shift in co-operation is surfacing. Developments in this context are:

- the shift from traditional education towards greater emphasis on life-long learning, thereby by having to cope with a more varied clientele, including in-the-job training of young and mid-career professionals;
- the shift towards greater use of transdisciplinary problem based and research-based learning, taking account of the shorter shelf-life of knowledge and, consequently, the greater need for training in methodological knowledge and skills; and
- the shift towards the greater use of partnerships between northern and southern institutions with multi-locational delivery within systems of flexible and resource-based learning.

### Sample case: the "alianza estratégica internacional de investigación" between the Universidad de Cuenca and the Katholieke Universiteit Leuven

Arresting the imbalance, impeding economic, social and environmental instability, and moving towards sustainable development call for establishing an intensive multilateral framework for co-operation in education, science and technology between the North and the South. Universities, through their unique function, can and have to play an important role in closing the gap. The status of universities is special because of the following three functions universities fulfil:

- the generation of knowledge through research;
- the dissemination of knowledge through education and training; and
- the critical reflection on the society in which it is situated and with which it continuously interacts in various ways.

Through this combination, which is essential to the university, and by the fact that the university makes the knowledge generated available to the society, universities play a specific and fundamental social role.

The objective of the co-operation between the Katholieke Universiteit Leuven and the Universidad de Cuenca, which dates back from the early '90s, as well as the co-operation with other universities in the South, aims at enhancing sustainable human oriented development, based on:

- the mutual enrichment of knowledge; and
- the continuous questioning between two partners of one another and oneself.

The ultimate goal of the co-operation is the development of expertise in the North and the South on themes relevant for the countries in the South. The universities in the North should through the development co-operation programmes support the universities in the South as to assist those institutions in better implementing the three main functions of the university, i.e., provision of academic training, research and critical reflection

and guidance of the society. The co-operation aims at strengthening the capacity of the local universities through the education and training of junior and senior staff. The co-operation is also geared towards maintaining and enlarging the societal platform for international co-operation. It is the Katholieke Universiteit Leuven's strong conviction that the future of the North and the South are inseparably linked and that closing of the current knowledge and information gap is essential to secure one another's future. Since the rate at which science proceeds steadily increases, the gap between developing and developed countries becomes wider every day. The result is an increase of the already existing inequality. In the years to come the difference will not only be limited to the "have's and have not" but also between "those who know and those who do not", and "those who have access to knowledge and those who have not". Knowledge and deeper understanding are essential and crucial instruments with which the society is able to define and shape its own development. The Katholieke Universiteit Leuven believes that university co-operation is a duty for the universities in the North. The North needs for its development good functioning universities in the South, which are the cornerstones for the development in the South.

I have been very fortunate being given the opportunity by my university to contribute in overseas co-operation. The university, through the government's stimulation and of course financial aid, has given me the chance to give development co-operation a special place in my daily operations as agricultural engineer, university lecturer and researcher. Whereas in the beginning of my overseas career university co-operation activities were focused on Sub-Saharan Africa, later activities were oriented on Latin-America. After more than 10 years of intensive involvement in university development in Nigeria and other Black African countries I stopped co-operation work in this region because those countries do have other priority needs than university co-operation. Given the decline in political stability, the economic back lagging and the social unrest in many of those countries, at least to my opinion, university



development was unrealistic, often not feasible and certainly not sustainable. The needs in those countries are of a more basic and fundamental nature. Development aid in those countries unfortunately still has to concentrate on achieving economic and political stability, food supply, health care and social and institutional development.

Whereas my co-operation involvement in the Universidad de Cuenca initially was entirely funded through VVOB, as from 1996 co-operation was focused on the institutional strengthening of PROMAS through the education of junior staff, the improvement and extension of equipment and the initiation of research activities. Funding was provided through several projects of the type "own initiatives" of the University Development Co-operation Programme of the Flemish Interuniversity Council (VL.I.R.<sup>2</sup>). With time the mainly Flemish based co-operation was complemented and replaced by co-operation funded by FUNDACYT<sup>3</sup>, BID<sup>4</sup>, PROMSA<sup>5</sup>, and other donors. The following table provides a summary of the main realisations and donor assistance PROMAS benefited from since the VVOB intervention in 1992.

As can be seen in Table 1 PROMAS, with the assistance of various donors, was able to improve its capacity in teaching (mainly with the assistance of VVOB), research (mainly with the assistance of VL.I.R., FUNDACYT, BID and PROMSA), its educational and consulting profile, and its physical infrastructure (mainly with the assistance of a private donor). It is estimated that PROMAS budget over the past 10 years was equal to 125 million BEF (roughly equivalent to 3 million US\$, or 300,000 US\$/year), of which 15% (or 450,000 US\$) was generated through consulting activities and 85% (or 2,550,000 US\$) through donor assistance. The donor assistance can be divided into assistance in training (15% or 450,000 US\$), research (58% or 1,784,000 US\$), educational development (8% or 243,600 US\$) and improvement of physical infrastructure (4% or 108,000 US\$). In this budget is not included the annual support from

2. VL.I.R. = Flemish Interuniversity Council

3. FUNDACYT = Fundación para la Ciencia y la Tecnología

4. BID = Banco Interamericano de Desarrollo

5. PROMSA = Programa de Modernización de los Servicios Agropecuarios

the Universidad de Cuenca, which mainly consists of the funding of a limited number of tenure faculty positions. Of the 8 staff that obtained the M.Sc.-degree through the co-operation 6 are employed by PROMAS. One of the overseas staff members obtained recently the Ph.D.-degree and 4 more staff is in the process of obtaining the Ph.D.-degree or just started the Ph.D.-programme at an overseas university.

The co-operation between the Katholieke Universiteit Leuven and the Universidad de Cuenca is 10 years old, and was mainly pursued by the Institute for Land and Water Management, and to a lesser extent by the Division of Work and Organisation Psychology, both being research groups of Leuven University. The co-operation was diverse and focused on strengthening PROMAS and ACORDES, respectively, and activities were deployed in the three basic university functions: teaching, research and extension. The co-operation started small and as external funding expanded the co-operation went from mainly support in teaching to support in setting-up research projects and gaining research experience and expertise. The close interaction with the society, an attitude pursued by PROMAS and ACORDES, assured that new experience in teaching and research, and knowledge was transferred to the society. Unique to the co-operation was that PROMAS, as well as ACORDES, had to compete strongly with other national and international groups in obtaining donor assistance. The earning of grants was based on the submission of high quality project proposals. Capacity in writing good project proposals was learned in the hard way, which after all has been experienced as very positive. The effort and energy one had to put in the drafting of proposals is afterwards recognised as being the best training in becoming autonomous in operation. The possible recognition of PROMAS as "Unidad de Acción Prioritaria" by FUNDACYT, for which PROMAS is competing, will be a considerable stimulus for PROMAS, and will help PROMAS in becoming

**Table 1:** PROMAS realisations and donor assistance in the period 1992-2001

Donor	Start and end date	Budget in million BEF	Type of intervention
<b>Strengthening of training capacity</b>			
VVOB	01/01/1992 – present	+/- 20.0	Placement of junior permanent experts and a small operation budget per expert (De Bièvre, Dercon, Deckmyn, De Pauw and De Leus)
<b>Strengthening of research capacity</b>			
VL.I.R.-1	01/04/1996-31/12/2000	+/- 18.8	Research on the day-to-day management of irrigation systems in the developing countries
VL.I.R.-3	01/01/1998-31/12/2002	+/- 15.3	Diagnosis and remediation of soil degradation in the Austro-Ecuatoriano
VL.I.R.-4 <sup>6</sup>	01/05/2001-30/04/2005	+/- 12.5	Participatory development of technological innovations for the sustainable management of the natural soil and water resources in the southern Andes of Ecuador
BID	01/09/1996-31/08/2001	+/- 13.5	Design and testing of alternative irrigation practices for the small farm holders of the Sierra
PROMSA	01/07/2000-30/06/2003	+/- 11.5	Maestría en manejo y conservación del agua y del suelo
<b>Strengthening of educational profile</b>			
Mobility of students and staff	Exchange of students from the Universidad de Cuenca and students and staff of the Katholieke Universiteit Leuven for short-term training, lecturing and field work within the frame of thesis research projects <sup>7</sup>		
M.Sc.	Belesaca Ivan, Bojorque Jaime, Celleri Rolando, Cisneros Pedro, Martinez Julio, Torres Paul, Vázquez Raul, Vimos Pablo		
Ph.D.	Cisneros Felipe, De Bièvre Bert, Dercon Gerd, Timbe Luis, Vázquez Raul		
<b>Strengthening of consulting activities</b>			
Contract research + consulting	1991-present	From consulting to applied research projects for public administrations, NGO's and the private sector. Grew from almost 0 BEF/year in 1991 up to +/- 3.75 million BEF/year	
<b>Strengthening of physical infrastructure</b>			
Construction of new physical facility	2000-2001	The realisation of +/- 500 m <sup>2</sup> PROMAS and +/- 200 m <sup>2</sup> for the Faculty of Engineering, through the assistance of a private donor <sup>8</sup> + ILWM + Universidad de Cuenca, 2.0, 0.5 and 2.0 million BEF, respectively	

6. Co-operation project between PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo) and ACORDES (Acompañamiento Organizacional al Desarrollo) of the Universidad de Cuenca, and the Institute for Land and Water Management (ILWM) and the Division for Work and Organisation Psychology (DWOP) of the Katholieke Universiteit Leuven

7. Funded by different donor programmes

8. Funded by a Belgian anonymous donor



sustainable in its operation.

The North-South "alianza" not only resulted in the acquisition of funds but also in strengthening PROMAS teaching, research and extension profile. The latter is being reflected by:

- winning PROMSA's support for the organisation of a Master's programme in the field of water and soil conservation;
- the presentation of manuscripts at national and international meetings and the publication of research results in national and international journals; and
- the increase in consulting and extension activities.

The co-operation contributed also to a strengthening of the organisational and management structure and capacity of PROMAS. In addition the "alianza" not only strengthened the southern partner, but resulted in an enrichment of the knowledge and expertise of the northern partner in the field of soil and water conservation, irrigation, and soil and catchment hydrology. Further the northern partner learned that the introduction of new technologies, which might be of relevance for northern conditions, requires the necessary adaptations before they successfully can be implemented in the South. The co-operation increased considerably the knowledge of the northern partner in the social and cultural aspects of the Andean people.

The question can be asked if PROMAS today, after 10 years of support, is able to operate autonomously, i.e. evolved towards a sustainable teaching/research unit. A university programme with capacity in advanced academic teaching, research and extension in the field of soil and water conservation, able to solve current and future, local and regional problems. The answer to this question is "almost".

PROMAS, as well as other research initiatives within the university, requires a sufficient input from the university in the form of core funding. Teaching/research units can not survive if the ratio between hard and soft money is too unfavourable. A minimum support of the university, primarily in the form of tenure positions, is a necessity to become sustainable. The tenure posi-

tions should be the most senior and responsible positions in the unit, with the obligation to work on the consolidation of the unit, to provide support and guidance to the junior staff, and to take care that expertise and knowledge is not lost if staff leaves. Career perspectives to the senior staff should be sufficient attractive as to prevent drain brain. Whereas the volume of the core support should be in the order of 30% of the total annual budget, the remaining 70% should be obtained in a competitive context. This funding should be acquired through project co-operation with other teaching/research units in Ecuador, other Latin-America countries, and countries in North America, Europe and elsewhere. Working in a competitive context is a necessity to remain a dynamic group and to assure that new knowledge and technologies are generated, and that research and extension finding are disseminated and applied by the community. If PROMAS succeeds in previous it will be able to:

- consolidate its activities;
- becoming a modern teaching/research unit able to tackle the problems of the coming decades; and
- assisting the Universidad de Cuenca in evolving towards a modern full fledge competitive university, capable of offering adequate and sustainable solutions for the problems ahead, and being an attractive educational institution not only recruiting students locally, but also nationally and internationally.

If the previous could be further supported by the "alianza" with the Katholieke Universiteit Leuven, and more in particular with the Institute for Land and Water Management, until the number of staff with Ph.D.-degree reaches a reasonable level, I am convinced that PROMAS not only will survive, but will reach the level and performance of a modern research group. Funding support from donors will remain a necessity. However the funding will be of a different kind as well as the donors. PROMAS will not longer rely on development aid but on competitive teaching, research, extension and consulting grants. The Institute for Land and Water Management, and myself in particular, will be pleased if we can con-

tinue to assist PROMAS in reaching in the coming 5- to 10-years this level of autonomous operation. It will be a tremendous satisfaction to see that at the end of the intervention a sustainable research group has been established with a bright and long lasting future.

## Conclusions

As depicted in the 'background' section of this paper it is to be expected that by 2025, when the world population will reach 8 billion people, the demographic pressure on the earth's natural resources will be immense, and that if not adequate political and technological solutions are found and implemented, many countries, in particular the LDC will be confronted with cataclysms, war and revolution. Previous is the more frustrating realising that enough financial resources seems to be available, but they are poorly or wrongly invested and inefficiently used. Funding in higher education and research luckily regained recently governments and donors' interest as illustrated in the second section of the paper. Unfortunately the shift comes late and not to the extent as it should be, in order that higher educational institutions, particular in the South, will be able to promote the attitudes and behaviour of the society conducive to a culture of sustainability. A small, suc-

cessful example of an "alianza estratégica internacional de investigación" between the Universidad de Cuenca in general and PROMAS in particular, and the Institute for Land and Water Management of the Katholieke Universiteit Leuven is presented in the third section of the paper. This study case illustrates that international co-operation based on project-based donor assistance in a competitive context works given that:

- the co-operation results into mutual enrichment of knowledge and expertise of all partners in the co-operation;
- the partners continuously question their contribution in the co-operation; and
- the co-operation is projected over a sufficient long period.

Strengthening the research capacity of universities is a long lasting intensive process. In Europe it took the universities between 50 and 75 years to evolve from a pure teaching institution to teaching/research institutions capable of offering to the society economic acceptable and sustainable solutions for the problems with which the society is confronted.

It is hoped that governments and donors will continue to invest in higher education and research, and this at a rate in pace with tomorrow's world expectations. The impact will be severe and global if a recession in funding comes.







## PROMAS: a case study of the successful implementation of GIS in an emerging country

### PROMAS: un estudio de caso de una implementación exitosa de Sistemas de Información Geográfica en países en vías de desarrollo

J. Deckmyn<sup>1,2</sup>

J. Feyen<sup>3</sup>

F. Cisneros<sup>2</sup>

B. De Bièvre<sup>2,3</sup>

#### Resúmen

Este artículo identifica algunas de las razones por qué es difícil arrancar con el manejo de Sistemas de Información Geográfica en Universidades de países en vías de desarrollo. La argumentación se basa en las experiencias del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo de la Universidad de Cuenca. PROMAS es un programa multidisciplinario relativamente nuevo que surgió en la Facultad de Ingeniería. El programa demuestra que, a pesar de muchas limitaciones típicas de países en vías de desarrollo, SIG realmente puede despegar y cumplir un rol importante en capacitación, investigación y extensión. Al final del artículo se da una breve descripción de proyectos basados en SIG que se realizaron o que están en ejecución en PROMAS. Los ejemplos demuestran que, aún con posibilidades de financiamiento muy limitadas, se pueden aplicar con éxito tecnologías nuevas como SIG.

#### Abstract

The paper highlights some of the reasons why GIS is getting difficult from the ground in universities of developing countries. The argumentation is based on experiences from the University of Cuenca, Ecuador. PROMAS, a newly established multi-disciplinary project, emerging from the Faculty of Engineering, illustrates that notwithstanding the many constraints, typical for developing countries, GIS really can take off and play an important role in training, research and extension. The paper ends with a brief description of GIS-based projects realized and under development at PROMAS. The examples stand as a proof that even under limited financial conditions, given the presence of the right environment, new technologies such as GIS are applied successfully.

<sup>1</sup>VVOB, Flemish Association for Development Co-operation and Technical Assistance, Belgium

<sup>2</sup>PROMAS, Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca, Ecuador

<sup>3</sup>ILWM, Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium



## 1. Introduction

Ecuador, the smallest of the Andean countries, is located on the Pacific coast of South America, at the Ecuador, and is bordered by Colombia to the north and Peru to the south. The Andean range 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 Andean range is often called the Sierra, and is characterized by a very fragile environment. The topography of this region is rugged. Depending on the geographical location and the altitude, annual rainfall varies between 200 and 2000 mm. Rainfall intensity is very variable, and sometimes characterized by torrential downpours. Daytime temperatures average high of 20°C to 22°C and a low of 7°C to 8°C year round. Evapotranspiration is fairly constant throughout the year and ranges between 3 to 5 mm d.

Economically the country is not doing well, partly due to the political instability, the collapse of the oil price, which very recently led to a devaluation of the Ecuadorian currency, and the devastating effects of El-Niño, particularly in the coastal area. Many human lives have been lost, and large areas of arable are inundated. It is estimated that 10% of the total area under banana cultivation, being one of the major agricultural export products of Ecuador, is lost. Further, the country faces an almost hopeless programme for the rehabilitation of the road infrastructure. As a consequence, it is expected that the already scarce national funding for training, research and extension will become even scarcer in the near future. The foregoing will have a direct negative impact on the rate new technologies, such as GIS, will be introduced.

The paper is describing the GIS experiences at the Faculty of Engineering of the University of Cuenca, and how the University managed to get GIS effectively from the ground, notwithstanding the major constraints. The University is situated in the city of Cuenca, and among the top 5 full-fledged universities of Ecuador. The City is considered as the economic and cultural capital of the

Southern Sierra, consisting of the provinces of Azuay, Cañar and Loja. The University contributes strongly to the development of Cuenca and the region. Its policy is marked by a strong dedication to modernize the University and the society, through the introduction of new knowledge and technological advancements. However, the implementation of changes, as indicated above, are slow downed by the lack of financial resources of the country and the region.

The main economic activity in the region is agricultural, a sector still expanding due to the increase in population. The most important crops cultivated in the region are maize, wheat, beans, horse beans, and potatoes, vegetables and moderate climate fruits. The overall productivity is low as a consequence of the altitude, the shallow depth of the soils, the relative high slope of the fields, and the low level of input. Production is entirely based on small farms, located on soils vulnerable to erosion. The alluvial zones in the region are mostly used as pasture for cattle. The soils are deep, have a high clay content, and a shallow to deep water. Most haciendas in the alluvial planes are large, in comparison to the small farms on the steep slopes of having an area between 40 and 120 ha.

Soil loss, being one of the major environmental hazards in the Andean region, is estimated to vary between 40 to 100 metric tons per ha and per year. The consequences of soil erosion are not limited to the agricultural sector only. The catchment of the Río Paute, being situated in the Southern Sierra, provides most of Ecuador's electricity, but the storage reservoir is silting up at an alarming rate. Millions have been spent and will be spent in the near future repairing the damage caused by erosion, flooding and sedimentation, costs that can be reduced if land and water resources were managed properly. A related environmental problem in the region is the decrease in water quality, due to turbidity, eutrophication and use of pesticides and other chemicals in agricultural. These problems are closely related to soil erosion because soil particles transport chemicals into waterways.

It is evident that studies on land and water resources planning and management, nature con-

servation and others, being major studies to be undertaken to improve the economic output and the sustainability of the Southern Region, requires the input of professional GIS. Without the introduction of GIS it is almost impossible to execute complex regional studies. As explained in the following section, constraints at Ecuador's major universities are enormously hindering the widespread introduction of GIS.

## 2. Constraints hindering at universities the introduction of GIS

The discussion in the following is based on the experiences of the Faculty of Engineering of the University of Cuenca. Since this University is ranked as the 3d most important of the country, the conditions limiting the introduction of GIS in training, research and extension in this educational institution, can be considered as being representative for the other universities in Ecuador.

The University of Cuenca offers 32 degree programmes. Most programmes are undergraduate degree programmes and have a length of 5 years, with the exception of the curriculum for medical doctor, which is lasting 7 years. The number of postgraduate programmes is small, and slowly emerging within the Faculties of Medicine, Economics and Engineering. The total number of academic staff with teaching activities is 900 for a total student population of 9.000. The total number of academic staff with a doctoral degree is low and ranges around 50, representing 5.5% of the total staff. Most staff is part-time.

The Faculty of Engineering is the 4<sup>th</sup> largest faculty of the University. It contains 3 schools, the School of Civil Engineering, Electrical Engineering and the School of Computer Engineering. As in the other faculties and schools, the main activity is teaching. Resources for the development of a research and extension profile have to be derived from external donors. By lack of tradition and competence and given the large competition at national and international level, the success rate in obtaining research grants is small in general. At the University of Cuenca, GIS activities were firstly

introduced in the School of Computer Engineering, about 7 years ago. The initiative did not bring the desirable change, and almost nothing is left from the efforts invested. The reasons of the complete failure can be summarized as follows:

- Lack of experience and skills in computer (PC-) handling and basic software's. The senior staff at the university has never been exposed to computers and information technology, and as a consequence they seldom use these tools in training activities. Most training at the university still consists of ex-cathedra teaching, whereby the students are obliged to take continuously notations. Fortunately, the situation is improving rapidly, particularly in the Faculty of Engineering. The situation at other faculties, such as the Faculty of Agricultural Sciences, is still very deplorable.

- Lack of command of the English language. The latter is a serious obstacle because most literature on computers, information technology, and special subjects such as geographical information systems is published in English. Language seems to be a considerable obstacle in the introduction process of GIS and other new technologies.

- Lack of literature. Most libraries at the universities in Ecuador have limited number of books and journals, and the available literature is mostly written in Spanish. Given the low availability of books and journals in general, it is not surprising that books and journals on GIS can hardly be found.

- Lack of sufficient computer hardware and software licenses. Normally professors at the School of Computer Sciences have to give computer class to groups of 20 students, having only 2 to 4 computers. The ratio students/PC's is that large that students seldom get the opportunity to practice.

- Lack of an attractive pricing policy. Not only the costs for hard- and software for the handling of geo-referenced data is high, also in addition the costs are jeopardized by the exuberant profit rates of local distributors. Just to give an example, they sell GIS software developed in the United States at a price twice to four times as expensive as what those products normally cost in the US. In addition, those distributors are not able



to give technical support.

- Lack of qualified staff for teaching new subjects such as GIS. In the School of Computer Engineering, GIS was taught by staff that hardly received training in the subject. Consequently the few GIS courses that were organized focused on hardware aspects, machine language and database management. The typical geographical capacities of GIS were never or poorly treated, also because of lack of appropriate project material to let the students work with.

- Lack of opportunity for practicing. It is a well-known fact that skill in GIS is only developed through intensive practicing, a time consuming task. Given the fact that staff is not eager to get involved in research and project work, by lack of mainly financial incentives, GIS knowledge at Ecuadorian institutions remains academic.

- Lack of data. In many instances one is obliged to derive regional data of the land and water resource basis from satellite images, which in Ecuador easily costs over US\$ 4,000 per image. In addition, data are collected by different governmental administrations, which rather compete in bringing their data together in a meta database. Those administrations lack further the policy and mandate of making the data available to different potential users. Additional problems, typical for countries such as Ecuador, are that data are seldom in a digital format for ready use, the length of the time-series of data is limited in time and seldom continuous, and the lack of control of the quality of the data.

- Lack of an inductive environment, an environment in which people, with a different background, actively participate in project work with an important geographical component. The only GIS-oriented research activity ever developed within the Schools of Computer Engineering was the processing of statistical information on population, socio-economic and cultural information at county level.

- Lack of support by the private sector, i.e., the distributing companies of GIS hard- and software. They could enhance training and research in GIS in universities of emerging countries by adjusting the price of products to the financial ca-

pability of educational and research institutes in those countries.

- Lack of support from the public sector, i.e., governmental, national and regional administrations and agencies, by not contacting universities in the execution of GIS-based projects. The foregoing is mainly due to the poor financial situation of the administrations.

- Lack of interest of other disciplines and the lack of awareness that GIS is an ideal tool for developing interdisciplinary activities. It is often said of GIS that it has the capacity of bringing people of different discipline together.

The foregoing points were considered as the main obstacles that resulted in the failure of the GIS project at the School of Computer Sciences. In this School the initiative to provide training in GIS was taken by the dean of the faculty and the head of the School. Whereas GIS did not bring the desirable change in the School of Computer Sciences, it became an important tool in the PROMAS project of the School of Civil Engineering, as explained in the following.

### 3. PROMAS, history and concept

#### 3.1. History

PROMAS, which stands for Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, was established in 1992. It emerged from the School of Civil Engineering, and was started by one international and one local staff. The team was reinforced by a limited number of undergraduate students. The objective of the project was to consolidate extension activities and to embark on research, related to land and water management. Projects were small, addressing mostly problems at the scale of a parcel. A major boost to PROMAS was given by the Josefina catastrophe in March 1993. The School of Civil Engineering, more in particular the responsible scientists of PROMAS, were contacted to assist in the drainage of the lake formed by the damming of the river through the landslide and the rehabilitation of the affected region. The foregoing led to a first major expansion in staff. The

number of VVOB<sup>1</sup> international staff grew to 2 in 1994. At that time PROMAS was still a project within the School of Civil Engineering.

Different consulting jobs contributed to a gradual improvement and expansion of PROMAS activities, and the start of a number of research projects. The first real research project, funded by VLIR<sup>2</sup>, initiated by PROMAS was a project on the day-to-day management of medium scaled irrigation schemes. Through this project it was feasible to increase the number of international staff to 3, expert in civil engineering, agricultural engineering, and geographical information systems engineering, respectively. This project also offered the challenge of working at a larger scale. Whereas in the early beginning most projects dealt with problems in land and water at field scale, in this project the step was made to a project with a total area of 3,000 ha. As such, the multidisciplinary team was for the first time in its recent history confronted with problems of spatial variability.

Shortly thereafter the team was able to secure a BID<sup>3</sup> grant, through FUNDACYT-Ecuador<sup>4</sup>. The project focuses on analyzing the performance of on farm irrigation systems, and assessment of the relationship between the irrigation practice and the erosion hazard. The expansion of PROMAS was of the order of magnitude that the project could not longer be administered through the School of Civil Engineering. The success of PROMAS contributed to the establishment at the University of Cuenca of the Instituto de Investigaciones<sup>5</sup>. This Institute is operating independently of the faculties and schools, and coordinates all research projects of the University. In this way research projects become independent from the complex and bureaucratic system of the faculties. In the 2<sup>nd</sup> half of 1997 a 3<sup>rd</sup> research project, funded by VLIR, was obtained, allowing once more an expansion of the staff.

Today the total staff of PROMAS is 40, 10

full-time academic and project staff, of which 3 are international, and 30 undergraduate students. Its strength is its multi-disciplinary approach and the extensive use of GIS as a logistic basis for most of its projects. The international staff, as indicated above, consists of 3 experts. The remaining staff is local staff belonging to the University, covering various disciplines (civil engineering, agricultural engineering, agronomy, computer sciences, and economic and social sciences). Of the local staff several are last year students and participate in PROMAS within the frame of their thesis research project. PROMAS not only recruits students from the School of Civil Engineering, but also from other schools and faculties. Further, PROMAS stimulates graduate staff to take overseas g. In this way already more than 10 local staff went studying abroad (Belgium, Bolivia and the United Kingdom) for periods from 3 months to 3 years. The academic staff of PROMAS is stimulated to study English, as to broaden their horizon and to make sure that staff reads international literature, apply for international grants, and assist in writing proposal documents for international donor agencies.

Through grants from VVOB, VLIR, BID, FUNDACYT-Ecuador, and savings on extension activities, PROMAS has been able to expand almost continuously its computer and software park. At present, PROMAS has an advanced and modern computer infrastructure, consisting of a network of 15 PC-stations and peripheral equipment (printers, plotters, digitizing tables and scanning devices). The software used for GIS applications is upgraded to the main software used in this field (ArcInfo, ArcView, AutoCAD, etc.).

The first modest GIS application dates back from 1995. In the beginning the contribution of GIS in PROMAS activities was rather limited. The team started with low cost GIS software (IDRISI), which can be run on low cost hardware. Further-

1. VVOB: Flemish Association for Development Co-operation and Technical Assistance, Belgium.

2. VLIR: Flemish Interuniversitair Council, Belgium.

3. BID: Interamerican Development Bank.

4. FUNDACYT-Ecuador: National Science Foundation.

5. Instituto de Investigaciones: Research Institute.



more, PROMAS recruited from the early beginning graduates from the School of Computer Engineering. Although those graduates had limited experience in GIS specialty software, they had a good background in computer engineering. The advantage of hiring staff of the School of Computer Engineering permitted to embark on the development of low-cost in-house GIS software, to avoid having to pay large amounts of money for professional software products available on the international market. The main advantage of the latter is that the end-user does not have to invest in expensive products such as ArcView. The GIS products developed are tailor-made, it is they meet the requirements of the end-user, are menu-driven and stand alone products, which can be run either under DOS or OWS.

The introduction of GIS in PROMAS came from the basis, it is the project staff working with geo-referenced data, and was not imposed on the group from outside. To simplify their task and to solve problems in a more professional way, GIS became gradually an essential component in all projects. At this moment, it can be said that every project has a GIS component. Of course this trend is also enhanced by the nature of the research and extension projects run by PROMAS. Whereas GIS has become a common tool in research and extension activities, within PROMAS, the introduction of GIS did not yet result into the desirable change in g. It is difficult to penetrate in the undergraduate programmes of the different Schools of the Faculty of Engineering, because (i) existing staff does not feel happy if changes are imposed from outside, and (ii) the present study curriculums are already overloaded, not giving space to the introduction of new courses. At the contrary, staff of PROMAS is transferring experiences in GIS to a larger audience through the organization of post-graduate short courses in the field of Hydraulics, GIS, Land and Water Management and Irrigated Agriculture. All courses contain a small to a large module on GIS, depending on the theme of the short course.

It is generally believed that the successful introduction of GIS tools within PROMAS is mainly

due to its unique concept and the fact that the PROMAS project led to an inductive environment.

### 3.2. Concept

PROMAS concept is the analysis of land and water related problems at field and project scale, within a multidisciplinary context, using advanced data management techniques and GIS software tools for the processing of data. In addition, PROMAS makes use of mathematical simulation models and optimization procedures for deriving strategies for planning and management. Project activities are situated mainly in the province Azuay and Cañar. Where in the past activities were only for extension and consulting, as competence and expertise grew, the project embarked on research. Extension and consulting activities are still maintained as a mean to generate funding and expertise, to support the logistic expenses of PROMAS. Research activities are entirely funded by international grants. The combination of a large number of factors led to the present, rather successful status of PROMAS.

The past project and research activities contributed to a change in PROMAS' concept. Whereas in the past and at present activities were focused on field and project scale, the ultimate goal for PROMAS is to embark on total catchment management. Planning authorities need to be provided with precise data regarding the current and potential status of the land and water resources, and the types and costs of the treatments required controlling the use and management of both resources. Since both resources are strongly linked, they require simultaneous processing, often referred to total catchment management (Woodward and Emery, 1986).

The advantage of total catchment management is that it provides a suitable basis for environmental planning. Further total catchment management does not interfere with the rights or authority of organizations and individuals as they carry out their legitimate land and water uses or developments. Total catchment management is

concerned with providing conditions or guidelines in those areas where there are potential impacts on the land and water resource system in order to minimize these impacts and to maintain the long-term integrity and productivity of resources. Total catchment management is complementary to current planning processes and not a replacement of these functions.

Total catchment management takes a holistic view of the natural environment. It is used to assess the quantity and availability of a particular resource (land or water), or to determine the cumulative impacts of different types of developments, or to identify the extent of some problem. Total catchment management can be used to develop preferred strategies for the allocation or use of a resource or to resolve a problem. Further the preparation of total catchment management strategies will reduce the need for ad hoc decisions, and will ensure that government agencies and community representatives participate in the preparation and acceptance of the plan (Cunningham, 1986).

To fulfill diverse community expectations, and to limit conflicts between the different sectors of interest, conserving at the same time nature and wildlife habitats requires implementation of total catchment management strategies. The foregoing is based on the fact that a change in one part of a catchment will impact on other resources within the catchment. Adoption of this approach, supported by all its in-house expertise and by recruiting new international and national experts is the ultimate goal of PROMAS.

### 4. Brief description of GIS-based projects realized and under development

Among other projects executed by PROMAS, in the following three examples are describes of recent projects realized and under development. The projects have been chosen in such a way as to illustrate that the aerial extent of the projects can vary from local to regional projects, deal with land or water resources, are extension or research type

of projects. The first project deals with the agro-ecological zoning of the Austro Ecuatoriano as a basis for the land use planning geared towards soil conservation, the planning and management of irrigation schemes, the location of experimental plots, etc. The second project is the development of a data information system for the Patococha irrigation scheme. The third project, being under development, is focused on the development of a decision support system for the improved utilization of the surface waters in the catchment Machángara. A common element in all those projects is the use of GIS for the integration of data, knowledge and expertise of different fields, and for deriving new information, using GIS specialty software's in combination with mathematical models and optimization techniques, which is directly useable for planning and management

#### 4.1. Agro-ecological zoning of the Austro Ecuatoriano

The Austro Ecuatoriano is situated between the latitude 2°15' and 3°30' in the Southern Sierra of Ecuador, containing the province Azuay and Cañar. Erosion due to poor land management is one of the major constraints in the region. The annual soil loss ranges between 40 and 100 metric tons per ha. Due to the population pressure it is expected that erosion will increase rather dm decrease. Control of erosion is only feasible given a complete modification of land use practices in the mainly agricultural based region. To derive the most appropriate land use and land use practices PROMAS was asked to establish for the Austro Ecuatoriano a base map with the agro-ecological zoning at a scale of 1/200.000 (Bossuyt et al., 1997). The approach followed was the methodology developed by FAO (FAO, 1981). To apply this method a GIS was implemented containing the different layers of basic information, such as climate (rainfall, temperature and evapotranspiration as variables), topography, soil and vegetation. The overlay of the different layers of information, combined with a number of crop soil and topographic crite-



ria, resulted in the delineation of 24 agro-ecological zones. The resulting map with attribute information will be used as a diagnostic tool for the planning and management of the region for nature conservation and sustainable land use.

#### 4.2. A data information system for the daily management of the Patococha irrigation scheme

Most irrigation schemes are poorly operated and managed by lack of information on water demand and supply. For the proper operation of irrigation schemes the availability of time-invariant and time-variant project data is a must. These data should enable the irrigation association to assess the water needs and how the needs change in time and space. Furthermore, the data should help the association to better organize the water delivery. Finally, the on-line availability of project data will help the association to plan for the implementation of new reservoirs and structures as to help match supply to demand.

The data information system developed for the Patococha irrigation scheme consists of five blocks: (i) a digital layer of the cadaster map and attributes of every; (ii) a digital layer with soil information and attribute data such as the infiltration rate, the water holding capacity, and other relevant soil data; (iii) a digital layer with the hydrological and meteorological data; (iv) digital information on the hydraulic irrigation infrastructure such as longitudinal and cross section profiles, and information on the canal properties and structures; and (v) digital information on the gate settings of the structures and reservoir operation information. The data information system is used to calculate on-line the water requirements, to define the settings of the gates and the operation of the reservoirs as to match supply to demand; and to follow-up the farming community and billing of the farmers for the irrigation water. The data information system, in-house developed for the Patococha irrigation scheme, can be extrapolated to other irrigation schemes, easily without major additional investment.

#### 4.3. Management of the water resources in the catchment Machángara

The study aims at inventorying the surface waters and their use in the catchment Machángara, with a total area of 500 km<sup>2</sup>, to establish a decision support system for the location and operation of reservoirs to come to a better utilization of the surface waters. With better utilization is meant (i) reduction of the losses within the system and (ii) storage of excess surface water in periods of rainfall surplus for distribution in periods of drought. River management for which this project stands for aims, with the assistance of reservoirs and operation rules, at a more uniform distribution of the surface waters as to allow a better utilization, i.e., matching in a better way the demands which are less subject to fluctuations as rainfall.

A basic component in this project is the establishment of the hydro-information system of the river basin. This activity involves the following steps:

- collection of the rainfall pattern and distribution, data for the estimation of the basin evapotranspiration, data on the topography for developing a digital terrain model, data on the land use, data on the soil geography and related soil properties, data on the river system, including information on the longitudinal and cross section profiles, structures and reservoirs, data on the water consumption within the basin for domestic use, industry, the generation of hydro-electricity, the use of water for the evacuation of domestic and industrial effluent water, and the water use in the agricultural sector, mainly for irrigation;
- collection of the points of water consumption for integration in the database system;
- connection of the database system to a geographic information system for the cartographic visualization of basin information; and
- provision of software facilities for the easy connection of the data information system to simulation models and optimization procedures and for transferring the output of the simulation and optimization tools to the geographic information system for cartographic presentation.

The project is under discussion with the drinking water and electricity distribution companies of the region, and the local authorities. An international donor will provide co-funding. The project will be implemented most likely in the 2<sup>nd</sup> half of 1998.

#### 5. Conclusions

PROMAS is a relatively young interdisciplinary project at the University of Cuenca, which emerged from the School of Civil Engineering. The scope of PROMAS is to provide g, research and extension in the field of land and water management. Whereas in the beginning the focus was either on land or water resources management at field and project scale, today the project aims at developing capacity in total catchment management. The present status of PROMAS is the result of a visionary approach based on local regional problems, bringing together experts with different background, the funding opportunities provided by VVOB, VLIR, BID and FUNDACYT-Ecuador, and the use of GIS as a supporting tool in all research and extension activities. The combination of the different factors has led to a widespread use by

PROMAS staff of GIS. Further, it contributed to the status of being self-sufficient.

In a period of less than 5 years PROMAS developed from a small unit with limited capacity to a project with leading capacity in total catchment management and GIS. PROMAS' objective for the near future is to further develop and consolidate its capacity, to become a centre of excellence in total catchment management and GIS for the Andean region and to penetrate internationally.

#### 6. Acknowledgments

The authors are very grateful to the financial support from VVOB, VLIR BID, and FUNDACYT-Ecuador. The financial contribution for g, research and extension received over the past 5 years led to the development and consolidation of PROMAS, that presently stands as an example for similar projects at the University of Cuenca. Furthermore, the authors are grateful to the Faculty of Engineering for moral support and the Instituto de Investigaciones of the University of Cuenca for administrative assistance.

#### 7. References

- Bossuyt B Dercon G De Bièvre B Cisneros F and Deckers J 1997 Agro-ecological zoning of the Austro Ecuatoriano. Diagnostic planning for nature conservation and sustainable land use. The Land 1(3): 159170
- Cunningham G M 1986 Total catchment management: resource management for the future. Journal of Soil Conservation New South Wales Australia 42(1): 4-5
- De Bièvre B Timbe L and Feyen J 1998 Matching demand and supply in irrigation schemes using a data information system. Paper

submitted for presentation at the 1<sup>st</sup> Inter-Regional Conference on Environment-Water: Innovative Issues in Irrigation and Drainage, ICID, 16-18 Sep., Lisbon, Portugal: 1-9

- FAO 1981 1.forme del proyecto de zonas agroecológicas. Vol. 3, Metodología y resultados para América del Sur y Central. Rome, Italy

- Woodward R G and Emery K A 1986 Total catchment management as an input to statutory planning. Journal of Soil Conservation New South Wales Australia 42(1): 76-79.





**Sección**

**Aportes técnico-científicos para  
el manejo del agua y del suelo**





## Adaptación del sistema de riego por tubería de compuertas en terrenos de altas pendientes (> 12 %) definición de parámetros de campo para su aplicación y diseño del sistema de compuertas

F. Cisneros<sup>1</sup>

E. Pacheco<sup>1</sup>

B. De Bièvre<sup>1-2</sup>

J. Feyen<sup>2</sup>

### Resumen

El dimensionamiento del riego por surco se ha venido realizando con las ecuaciones que resultan de la utilización de familias de infiltración desarrolladas por la Soil Conservation Service (SCS), sin embargo, debido a las condiciones que presentan los suelos andinos, dichas ecuaciones no consiguen ajustarse a la realidad de la aplicación de agua. Con estos antecedentes se pone a consideración los resultados obtenidos para ecuaciones de infiltración equivalentes que reflejen el comportamiento del flujo de agua de riego en laderas y que permitan determinar los parámetros de aplicación y de manejo de caudales para lo cual de manera complementaria se propone la adaptación de tubería de compuerta como una alternativa de este método que se ha utilizado largamente en terrenos planos. Se presenta la caracterización técnica de las adaptaciones así como, su descripción con la cual se podrá dar inicio a su utilización en regiones montañosas.

### Abstract

Design of furrow irrigation is generally done using the infiltration families of the Soil Conservation Service. However, in Andean conditions, these equations are not according to the reality of water application. In this paper equivalent infiltration equations that reflect behavior of irrigation water flow on sloping land are presented. They allow to determine water application and discharge parameters. Additionally, an adaptation of the gated pipe irrigation which is being used since a long time on flat land, is proposed. Technical features of the adaptations are presented, as well as a general description of how this method can be used on steep land.

1. PROMAS (Programa para el Manejo del Agua y del Suelo), Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, [E-mail: fcisnero@ucuenca.edu.ec]

2. ILWM (Institute for Land and Water Management), Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium [E-mail: jan.feyen@agr.kuleuven.ac.be]



## Introducción

En general en la región andina y en particular en el Austro Ecuatoriano, desde tiempos remotos es común la práctica del riego en terrenos inclinados con pendientes superiores al 12%. Usualmente los agricultores han resuelto este problema aplicando el agua conforme a los métodos de riego disponibles, esto es riego por surco o riego por aspersión. En el mejor de los casos la práctica se realiza aplicando los parámetros definidos en la literatura técnica para los métodos referidos como si se tratase de terrenos planos, lo cual desencadena una serie de problemas colaterales que conducen al deterioro de los terrenos con las correspondientes pérdidas que en algunos casos llegan al lavado de los suelos agrícolas y las consiguientes pérdidas económicas. Estos y otros aspectos se han caracterizado en los artículos "Análisis cuantitativo del riego por surco en terrenos con pendientes superiores al 12%" (Cisneros et al., 1997) y "Análisis cuantitativo del riego por aspersión en terrenos con pendientes superiores al 12%" (Cisneros et al., 1998). En estos artículos, los autores realizan una serie de recomendaciones a fin de que las prácticas de riego sean adecuadamente utilizadas y que se analicen posibilidades de desarrollos de nuevas alternativas en esta materia. En concordancia con estas recomendaciones, los autores han desarrollado sendas investigaciones que han permitido definir los parámetros de diseño y manejo de las prácticas de riego tradicionales (por surco y por aspersión) y alternativos (desarrollo de un nuevo método de riego) en terrenos con pendientes superiores al 12%, en el marco del proyecto "Métodos de riego y control de erosión en suelos andinos" con el financiamiento del FUNDACYT Ecuador, proveniente de un préstamo del Estado Ecuatoriano al Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y que fue desarrollado en el Programa para el Manejo del Agua y del Suelo PROMAS de la Universidad de Cuenca.

Tal como se indica en los artículos de la referencia se han realizado una serie de trabajos encaminados a establecer las condiciones idóneas de utilización de los recursos disponibles con el fin

de mejorar las eficiencias de riego que al momento se encuentran en el orden de 40% a 50%. Estos han permitido establecer los caudales de riego, tiempos de aplicación, diseño de surcos y sistema de aplicación en las parcelas de investigación debidamente equipadas para el efecto. Mediante las evaluaciones realizadas, al comparar los resultados con los correspondientes a la literatura técnica, se concluye que no es posible aplicar directamente las ecuaciones de infiltración, debido a la incompatibilidad de los parámetros de infiltración correspondientes al tipo de suelo y a la presencia de un factor adicional que es el flujo subsuperficial, ampliamente presente en suelos poco profundos de terrenos inclinados.

De esta manera y puesto que a base de experiencias preliminares que permiten afirmar que los valores de infiltración que se obtienen para los suelos del Austro Ecuatoriano, caen fuera del rango de familias de infiltración de la Soil Conservation Service, y que adicionalmente a ello, el manejo de caudales de aplicación es deficiente, se propuso emprender un trabajo de experimentación con el fin de establecer ecuaciones de infiltración equivalentes que se ajusten a condiciones reales de riego y a las propiedades de los tipos de suelos y condiciones de pendiente en el Austro Ecuatoriano.

El presente documento está estructurado en dos partes, que son:

- Determinación de ecuaciones de infiltración para condiciones reales de riego por surco en laderas
- Diseño y operación de tubería de compuerta para riego por surco

## Materiales y métodos

*Determinación de ecuaciones de infiltración para condiciones reales riego por surco en laderas*

Para el establecimiento de ecuaciones de infiltración equivalentes, se utilizó el método de los dos puntos (Elliott & Walker, 1982) y se apoyó la investigación con resultados obtenidos por otros métodos convencionales de infiltración sustentados en el previo análisis de los suelos. La investigación

se realizó en condiciones preestablecidas de geometría y trazado de surcos en terreno sin cultivo.

El procedimiento empleado fue el diseñado por el Servicio de Conservación de Suelos (USDA). Conocido como "método de los dos puntos" que permite establecer los parámetros de infiltración  $a$ ,  $c$  y  $k$  de la ecuación de infiltración de Kostiakov-Lewis en surco y cuyo procedimiento se resume a continuación:

1.- Determinación de la geometría de los surcos mediante la medición de ancho superficial y perímetro mojado para diferentes alturas de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$T = a1 \text{ y } a2$$

$$P = b1 \text{ y } b2$$

Donde:

$$T = \text{ancho superficial}$$

$$P = \text{perímetro mojado}$$

$$a1, a2, b1, b2 = \text{parámetros de geometría a determinarse}$$

2.- Establecimiento de tiempos de avance y de recesión del flujo de agua en el surco y emplazamiento de los aforadores al inicio y al final del surco.

3.- Medición del caudal de entrada, caudal de salida y tiempo de aplicación para establecer el volumen de agua total suministrado y determinar la infiltración existente a lo largo del surco. Este registro es continuo a intervalos de tiempo razonables durante la duración de la prueba hasta que se considera estabilizado el flujo de salida cuando la infiltración ha alcanzado su valor típico para las condiciones dadas.

4.- Paralelamente a la medición de caudales se llevó un registro de la profundidad normal del agua en la cabecera del surco a varios intervalos de tiempo.

5.- Complementariamente se determinó el

coeficiente de rugosidad de Manning para la superficie del suelo.

6.- Registro del tiempo de recesión luego de terminada la prueba y a partir de que el caudal de entrada ha sido cortado de acuerdo a las marcas preestablecidas a lo largo del surco.

Una vez realizado el ensayo en campo, se procedió a calcular los siguientes parámetros:

Para la sección del surco, con los datos obtenidos se establece la siguiente relación:

$$A = \frac{a_1}{a_2 + 1} y^{a_2 + 1}$$

Donde:

$$A = \text{área de la sección del surco}$$

$$y = \text{altura o profundidad del flujo}$$

Los parámetros de geometría  $a1$ ,  $a2$ ,  $b1$ ,  $b2$  son parámetros que se obtienen mediante regresiones a partir de los datos obtenidos sobre la geometría del surco.

Para estimar los coeficientes de rugosidad de los surcos se utilizó la ecuación desarrollada por Manning para flujo en canales abiertos:

$$n = \frac{A^{5/3} i^{1/2}}{Q P^{2/3}}$$

Donde:

$$n = \text{coeficiente de rugosidad de Manning}$$

$$A = \text{área de la sección transversal del flujo}$$

$$i = \text{pendiente del surco}$$

$$Q = \text{caudal que circula por el surco}$$

$$P = \text{perímetro mojado}$$

El promedio de la gradiente hidráulica (pendiente) es:

$$S = \frac{1}{L} [0,0875 Q^{0,342}]$$



Donde:

$S =$  gradiente hidráulica (pendiente  $i$ )

$L =$  longitud

$Q =$  caudal de entrada

Finalmente, las expresiones para el cálculo de los parámetros  $a$ ,  $c$ , y  $k$  son:

$$a = \frac{\ln[V_L/V_{0,5L}]}{\ln[t_L/t_{0,5L}]}$$

$$c = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{P_o L}$$

$$k = \frac{V_L}{\sigma_z t L^a}$$

$$V_L = \frac{Q_0 t_L}{L} - \sigma_y A_0 - \frac{c t_L P_0}{1+r}$$

$$V_{0,5L} = \frac{2Q_0 t_{0,5L}}{L} - \sigma_y A_0 - \frac{c t_{0,5L} P_0}{1+r}$$

$$A_0 = \frac{a_1}{a_2 + 1} y_0^{a_2 + 1}$$

$$P_0 = b_1 \left( \frac{[a_2 + 1] A_0}{a_1} \right)^{b_2 / (a_2 + 1)}$$

Donde los valores de  $V_L$  y  $V_{0,5L}$  corresponden a los volúmenes de agua en el final y la mitad de un surco de longitud  $L$ , siendo  $A_0$  y  $P_0$  el área de la sección y perímetro mojado al inicio del mismo. El parámetro  $\sigma_y$  es un factor numérico asumido en 0.77 y  $\sigma_z$  es el factor subsuperficial de forma donde  $r$  es el exponente de la ley de avance, esta dado por:

$$\sigma_z = \frac{a + r(1-a) + 1}{(1+a)(1+r)}$$

$$r = \frac{\log_{10} 2}{\log_{10} [t_L / t_{0,5L}]}$$

### Trazado de surcos

Para la experimentación se trazaron surcos de 30 m de longitud en grupos de 3, con pendientes de 0, 0.5 y 1% cada grupo. En cada uno de los surcos se llevó adelante las mediciones y determinación de parámetros para longitudes de 10, 20 y 30 m con caudales de 0.5, 0.75 y 1.0 l/s.

El trazado de los surcos se hizo con ayuda de equipo topográfico convencional con las pendientes indicadas. Cada surco se configuró con sección de geometría parabólica uniforme.

### Hidráulica y manejo de la tubería de compuerta

Paralelamente al desarrollo de actividades encaminadas a la determinación de ecuaciones de infiltración descrito previamente, se llevaron a cabo trabajos de experimentación en manejo y adaptación de tubería de compuerta a riego por surco en laderas. Para ello se inició la experimentación con tubería prefabricada de 200 mm de diámetro y 6 m de longitud debido a que era la de dimensiones mínimas disponible en el mercado para tubería de compuerta fabricada.

La experimentación inicial con este diámetro se llevó a cabo en las parcelas de Tugula y El Tablón del cantón Santa Isabel para entrega de agua en surcos en pendientes de terreno en el rango de 20% a 22% con cultivos de cebolla y tomate de árbol.

Se optó posteriormente y por así convenir a las posibilidades de manipulación por considerar el uso de tubería de 75 mm de diámetro con compuertas de fabricación artesanal de sección rectangular de 4 cm x 7.5 cm espaciadas 1.20 m entre ellas por requerimientos del cultivo utilizado.

El sistema hidráulico definido para este caso, como se ha indicado, corresponde a la utilización de tubería de compuerta que permita transportar y distribuir el agua en los surcos sin causar erosión, el sistema funciona como se muestra en la figura el agua es cargada en la tubería por la cabecera aguas arriba, y se distribuye en los surcos a través de las compuertas que han sido previamente

ubicadas en función de la distancia entre surcos correspondiente. El funcionamiento de la tubería se encuentra en relación con la pendiente en la que se emplaza la tubería, con el uso simultáneo de 3 a 4 compuertas, se tenían cargas que ocasionaban velocidades de salida extremadamente grandes y por tanto erosivas no aplicables a riego, por lo que fue necesario prever el emplazamiento de disipadores de energía a la entrada de los surcos.

### Determinación de los coeficientes de compuerta

La determinación de los coeficientes de descarga de los orificios se ha realizado conforme a la metodología de cálculo comúnmente utilizada en hidráulica mediante la medición de abscisa y ordenada en el flujo, midiendo la posición de un punto en la trayectoria del flujo de agua. Considerando que la componente horizontal de la velocidad no cambia y de acuerdo a las condiciones de movimiento parabólico presente tenemos:

$$x_i = V_a t$$

$$V_a = \frac{x_0}{\sqrt{2y_0/g}}$$

Donde:

$t =$  tiempo de recorrido desde el punto 1 hasta el punto 2 (ver Fig.1)

$V_a =$  velocidad real

$x_0 =$  recorrido horizontal

$y_0 =$  recorrido vertical

Finalmente y conociendo la velocidad teórica a la salida en la compuerta se determina el coeficiente de velocidad:

$$V_t = \sqrt{2gh}$$

$$C_v = V_a / V_t$$

Donde:

$V_t =$  velocidad teórica ala salida

$h =$  carga sobre la apertura

$C_v =$  coeficiente de velocidad

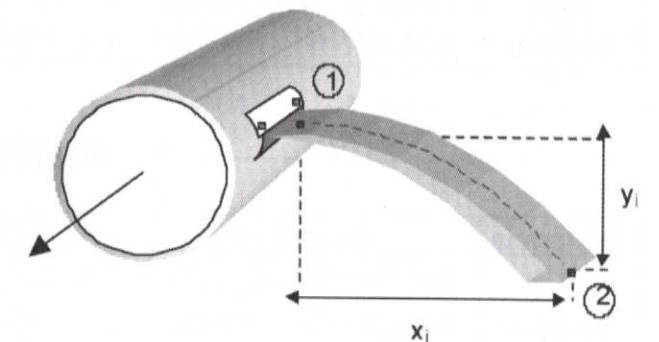


Fig.1

### Resultados

Luego de haberse llevado a cabo los ensayos con la metodología indicada en los capítulos previos, se obtuvo los parámetros  $a$ ,  $c$  y  $k$  para la ecuación de infiltración de Kostiakov-Lewis ( $z = kt^a + ct$ ) para surco mediante el método de los dos puntos para un total de 81 ensayos en surcos de longitudes de 10, 20 y 30 metros y trazados con pendientes de 0, 0.5 y 1%.

Realizadas las pruebas de infiltración mediante el método de los dos puntos, se ha podido determinar que en una distancia de 10 m en el surco, la infiltración según la curva de avance del agua no es tan homogénea como en distancias de 20 m y 30 m, obteniéndose así las siguientes ecuaciones resultantes que caracterizarían el riego por surcos de acuerdo a estas longitudes.



**Tabla 1:** Ecuaciones de infiltración en surco para longitudes características en pendientes de 0, 0.5 y 1 %

**PENDIENTE 0%**

Distancia	Q = 0.5 l/s	Q = 0.75 l/s	Q = 1.0 l/s
10 m	$0.00287 t^{0.801} + 0.00042 t$	$0.00095 t^{0.888} + 0.00110 t$	$0.00452 t^{0.733} + 0.00260 t$
20-30 m	$0.00484 t^{0.427} + 0.00060 t$	$0.00486 t^{0.564} + 0.00090 t$	$0.00603 t^{0.534} + 0.00184 t$

**PENDIENTE 0.5%**

Distancia	Q = 0.5 l/s	Q = 0.75 l/s	Q = 1.0 l/s
10 m	$0.00554 t^{0.583} + 0.00070 t$	$0.00381 t^{0.778} + 0.00134 t$	$0.01070 t^{0.439} + 0.00200 t$
20-30 m	$0.00901 t^{0.351} + 0.00052 t$	$0.01630 t^{0.301} + 0.00059 t$	$0.01540 t^{0.255} + 0.00136 t$

**PENDIENTE 1%**

Distancia	Q = 0.5 l/s	Q = 0.75 l/s	Q = 1.0 l/s
10 m	$0.00109 t^{0.248} + 0.00130 t$	$0.00074 t^{0.128} + 0.00162 t$	$0.00498 t^{0.638} + 0.00172 t$
20-30 m	$0.00235 t^{0.460} + 0.00072 t$	$0.00217 t^{0.096} + 0.00106 t$	$0.00440 t^{0.570} + 0.00130 t$

En la tabla siguiente se presenta la secuencia de cálculos realizados en el presente caso para la determinación de los parámetros de operación de las compuertas que permitan manejar los caudales adoptados para riego en pendientes características que corresponden a las parcelas donde se realizaron los experimentos que han permitido verificar estos coeficientes

**Tabla 2:** Determinación de los coeficientes de velocidad y de descarga

Apertura de compuerta		5mm		0.00075 m <sup>2</sup>		21%		0.45 m	
xi	yi	Va	Vt	Cv	Caudal	Cd			
(m)	(m)	(m/s)	(m/s)		(l/s)				
0.0672	0.261	2.912	2.970	0.980	0.718	0.645			
0.700	0.278	2.939	2.970	0.990	0.694	0.623			
0.695	0.276	2.928	2.970	0.986	0.705	0.633			
0.731	0.311	2.902	2.970	0.977	0.707	0.635			

**continuación...**

Apertura de compuerta		10mm		0.00075 m <sup>2</sup>		19%		0.22 m	
xi	yi	Va	Vt	Cv	Caudal	Cd			
(m)	(m)	(m/s)	(m/s)		(l/s)				
0.511	0.320	2.000	2.077	0.963	0.980	0.629			
0.543	0.358	2.009	2.077	0.967	0.972	0.624			
0.480	0.274	2.030	2.077	0.978	0.959	0.616			
0.451	0.246	2.013	2.077	0.969	1.010	0.649			

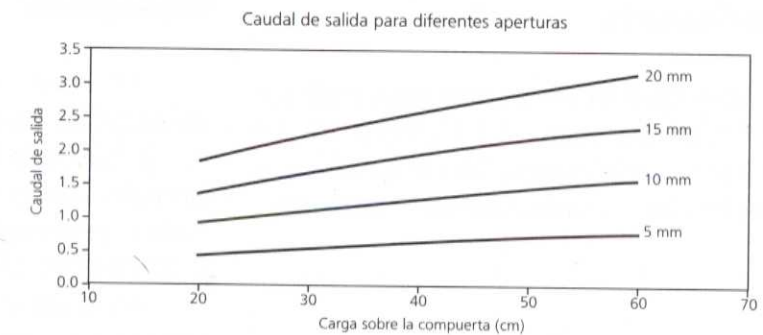
Apertura de compuerta		10mm		0.00075 m <sup>2</sup>		21%		0.49 m	
xi	yi	Va	Vt	Cv	Caudal	Cd			
(m)	(m)	(m/s)	(m/s)		(l/s)				
0.582	0.180	3.037	3.099	0.980	1.416	0.609			
0.549	0.154	3.097	3.099	0.999	1.480	0.637			
0.662	0.230	3.056	3.099	0.986	1.425	0.613			
0.626	0.205	3.061	3.099	0.988	1.508	0.649			

Apertura de compuerta		20mm		0.0015 m <sup>2</sup>		21%		0.25 m	
xi	yi	Va	Vt	Cv	Caudal	Cd			
(m)	(m)	(m/s)	(m/s)		(l/s)				
0.408	0.178	2.141	2.214	0.967	2.087	0.629			
0.381	0.156	2.135	2.214	0.965	2.050	0.617			
0.466	0.234	2.132	2.214	0.963	2.030	0.611			
0.443	0.207	2.155	2.214	0.974	2.127	0.641			

Como resultado de los cálculos presentados, en el gráfico siguiente se indica el caudal como función de la carga sobre la compuerta y la apertura de la misma.

**Gráfico 1**

**Caudal en función de la carga y apertura de la compuerta**





## Discusión

De los análisis realizados y basándose en el grado de representatividad de las ecuaciones obtenidas, se ha podido establecer las condiciones dentro de las cuales se caracterizaría la determinación de ecuaciones de infiltración y por ende el manejo de agua en riego por surco para terrenos en pendientes mayores a 12%, pudiéndose afirmar que para el establecimiento de los parámetros de la ecuación de infiltración se debe hacer las siguientes consideraciones:

- Una variación en la pendiente incide de manera significativa en la determinación de los parámetros  $k$  y  $a$ , habiéndose observado valores más representativos de  $k$  para pendiente de 0.5% y de  $a$  para pendiente de 0%.

- El segundo factor en importancia correspondería a una variación del caudal, hecho que incide en la determinación del parámetro  $k$  habiéndose observado valores más representativos para caudal de 1 l/s.

- Finalmente, se anota que la infiltración en el surco, caracterizada en gran medida por el parámetro  $c$ , es la variable que mayormente se ve afectada por un cambio en pendiente, longitud, y caudal de aplicación, observándose que la infiltración resulta mayor en pendiente de surco de 0% para los caudales utilizados.

Una vez definidas las condiciones en las cuales se desarrolla la infiltración en surcos, se ha adaptado a terrenos con pendientes el uso de una

tubería de compuerta de fabricación artesanal que permite que el agricultor entregue el agua en condiciones aceptables sin provocar erosión en el terreno y con una eficiente conducción que permitirá una mejor distribución del agua para riego en estas condiciones.

Los cálculos para la determinación de los coeficientes de descarga han sido los comúnmente utilizados en la hidráulica y contemplan los parámetros definidos con base a su calibración. Los valores de caudal se entregan en términos de carga de agua y de apertura de la compuerta.

En general el sistema de riego por tubería de compuerta en terrenos con pendiente permite una aplicación del agua más uniforme y segura que en el método de riego por surco utilizado tradicionalmente en la sierra Ecuatoriana.

La combinación de las salidas de caudal en cada caso con los requerimientos de agua expresados en términos de las ecuaciones de infiltración para las longitudes características de surcos definidos en la primera parte del presente artículo permitirán un adecuado dimensionamiento del riego por surco utilizando tubería de compuerta en terrenos con altas pendientes, superiores al 12%.

El método es recomendado para ser utilizado en terrenos con las características anotadas tanto para la aplicación en surcos de contorno pero también en el riego por fajas utilizado en terrenos con pendientes.

## Reconocimiento

La investigación presentada aquí pudo ser realizado gracias al apoyo del FUNDACYT del Ecuador a través del Proyecto "Métodos de Riego y Control de Erosión en suelos Andinos (P-BID-130)".

## Bibliografía

- Cisneros F., E. Pacheco y J. Feyen; 1997, Quantitative analysis of the performance of furrow irrigation in the Southern Sierra of Ecuador, on slopes steeper than 12%, Proceedings of the 1st Taller Internacional de Riego y Drenaje, AGROMEC97, 13 - 17 July, La Habana Cuba.
- Cisneros F., P. Torres y J. Feyen; 1998, Quantitative analysis of the performance of sprin-

kler irrigation in the Southern Sierra of Ecuador, on slopes steeper than 12%, Proceedings of the 2th Water meting , Montevideo, Uruguay

- Cuenca H., 1989, Irrigation system design and engineering approach, Prentice Hall-Englewood Cliffs, New Jersey.

- Elliot & Walker, 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Trans. ASAE 15(2):396-400.

- James L.G., 1988, Principles of farm irrigation system design , John Wiley and Sons Inc.

- Jensen M.E., 1980, Design and operation of farm irrigation sistem, American society of agricultural engineers.

- Timbe L., B. De Bievre, J. Feyen y D. Jacques, 1999, Hydraulic characterisation of hill slope soils. International Workshop of EurAgEng's Field of Interest on Soil and Water, 446-456.

- Walker W.R. y G.V. Skogerboe, 1987, Surface irrigation theory and practice, Prentice Hall-Englewood Cliffs, New Jersey .







# Utilización de la infiltración lateral (subsuperficial) en terrenos de altas pendientes (> 12 %) como un método de riego alternativo\*

F. Cisneros<sup>1</sup>

E. Timbe<sup>1</sup>

B. De Bièvre<sup>1,2</sup>

J. Feyen<sup>2</sup>

## Abstract

In general in the Andean region, and particularly in the Austro-Ecuatoriano, farmers traditionally irrigate fields with steep slopes (>12%). They use the actually available irrigation methods, such as furrow and sprinkle irrigation. Both irrigation methods are used with their parameters, as they are designed for flat areas, resulting in low application efficiency, under-irrigation and soil erosion (Cisneros et al., 1998 & 1999).

In this paper an improved surface irrigation method for steep slopes is presented. The method uses the subsurface flow in the slope direction, caused by the high hydraulic conductivity of the topsoil and the lower hydraulic conductivity of the underlying horizon. The proposed approach is based on the field calibration of the HYDRUS-2D model, which is used to reproduce the water movement in the soil profile on steep slopes under contour furrows (Timbe et al., 1999). The key improvement of the classical furrow system is based on the simulation results of HYDRUS-2D, supported by the results of a field experiment. In this plot the surface and subsurface flows were recorded, as well as the soil moisture content in several locations as a function of time using the capacitance probe. The model was calibrated using field data, and the tested model was consequently used to predict the water movement in a plane perpendicular to the furrow for various slopes, water depths and time of application. The experimental and the simulation results reveal that the proposed improvement will lead to a more efficient use of the scarce water resources, a better distribution of the irrigation water and thus a more uniform production, and less erosion hazard.

\* Artículo presentado en el III Encuentro de las Aguas de Chile - 24 al 26 de Octubre de 2001.

1. PROMAS (PROgrama para el Manejo del Agua y del Suelo), Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador  
[E-mail:

fcisnero@ucuenca.edu.ec]

2. ILWM (Institute for Land and Water Management), Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium  
[E-mail:

jan.feyen@agr.kuleuven.ac.be]



**Introducción**

En general en la región andina, y en particular en el Austro Ecuatoriano, desde tiempos remotos es común la practica del riego en terrenos inclinados con pendientes superiores al 12%. Usualmente los agricultores han resuelto este problema aplicando el agua conforme a los métodos de riego disponibles en la actualidad, esto es riego por surco o riego por aspersión. En el mejor de los casos la práctica se la realiza aplicando los parámetros definidos en literatura especializada para los métodos referidos como si se tratase de terrenos planos, lo cual desencadena una serie de problemas colaterales que conducen al deterioro de los terrenos como el lavado de los suelos agrícolas. Estos y otros aspectos se han caracterizado en los artículos "Análisis cuantitativo del riego por surco en terrenos con pendientes superiores al 12%" (Cisneros et al., 1998) y Análisis cuantitativo del riego por aspersión en terrenos con pendientes superiores al 12 % (Cisneros et al., 1999). En estos artículos, los autores realizan una serie de recomendaciones a fin de que las prácticas de riego sean adecuadamente utilizadas y que se analicen posibilidades de desarrollo de nuevas alternativas en este ámbito. En concordancia con estas recomendaciones, los autores han dirigido sus esfuerzos hacia la definición de parámetros de diseño y manejo de las practicas de riego tradicionales (por surco y aspersión) además del desarrollo de un nuevo método de riego superficial alternativo para terrenos con pendientes superiores al 12% en el marco del proyecto "Métodos de Riego y Control de Erosión en Suelos Andinos" con el financiamiento del FUNDACYT Ecuador, proveniente de un préstamo del Estado Ecuatoriano al Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

En el presente artículo se pone a consideración de la comunidad científica los resultados de las investigaciones, realizadas en torno a las prácticas de riego alternativo, fruto de lo cual se presenta el mejoramiento del método de riego por escurrimiento superficial a través de la utilización de la infiltración lateral en terrenos de altas pendientes (> 12 %) como un método alternativo. Este nuevo método de riego que utiliza el fenómeno

conocido como *flujo subsuperficial*, ha sido concebido al interior del proyecto "Métodos de riego y control de erosión en suelos andinos", que se encuentra desarrollándose en el marco del Programa para el manejo del agua y del suelo PROMAS de la Universidad de Cuenca; a continuación se presenta la caracterización técnica del mismo, así como su descripción, con lo cual se podrá iniciar su utilización en regiones montañosas en donde se requiera el riego en terrenos con pendientes elevadas, para lograr esto, se han desarrollado una serie de trabajos previos a fin de entender las características del movimiento del agua en el suelo en las condiciones de altas pendientes y su modelización, para lo cual, se ha utilizado el modelo matemático HYDRUS-2D que simula dicho fenómeno, el mismo que ha sido debidamente calibrado en condiciones de campo en las parcelas que para el efecto se han tenido a disposición.

**Materiales y Métodos**

**Materiales**

La parcela experimental que fue utilizada por el proyecto para la realización de los ensayos está localizada en una zona montañosa de pendientes pronunciadas de la provincia de Cañar, República del Ecuador, en el sector denominado Yuracasha, su ubicación de acuerdo al sistema de proyección cartográfica UTM es de 725763 m de longitud y 9719414 m de latitud, y una altura de 3121 msnm; tiene un ancho de 19 m y una longitud de 60 m; presenta una pendiente longitudinal promedio del 19%, y pendiente transversal nula; el sector no muestra mayor vegetación forestal en su cercanía, los cultivos predominantes son papas, cebada y trigo; en las áreas no cultivadas su cobertura natural es el pajonal típico del páramo andino.

El trabajo de investigación inició con la dotación a la parcela de la infraestructura necesaria para cuantificar y controlar los distintos componentes del movimiento del agua en el suelo que permitan determinar el balance hídrico y calibrar los parámetros hidrofísicos del suelo utilizando para ello el HYDRUS-2D, de esta manera fueron

instalados dispositivos para la recolección de es-correntia superficial y subsuperficial, y se realizó un seguimiento del movimiento del agua en el suelo a través del monitoreo de la humedad del terreno mediante el uso de una sonda de capacitancia, adicionalmente y con el propósito de monitorear los parámetros climáticos se implementó una estación meteorológica con posibilidades de medir en

tiempo real 7 parámetros: precipitación, presión barométrica, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y radiación solar.

Se han realizado también estudios edafológicos e hidrofísicos detallados del terreno, a continuación se presentan las propiedades del suelo que han sido determinadas en base a los mismos.

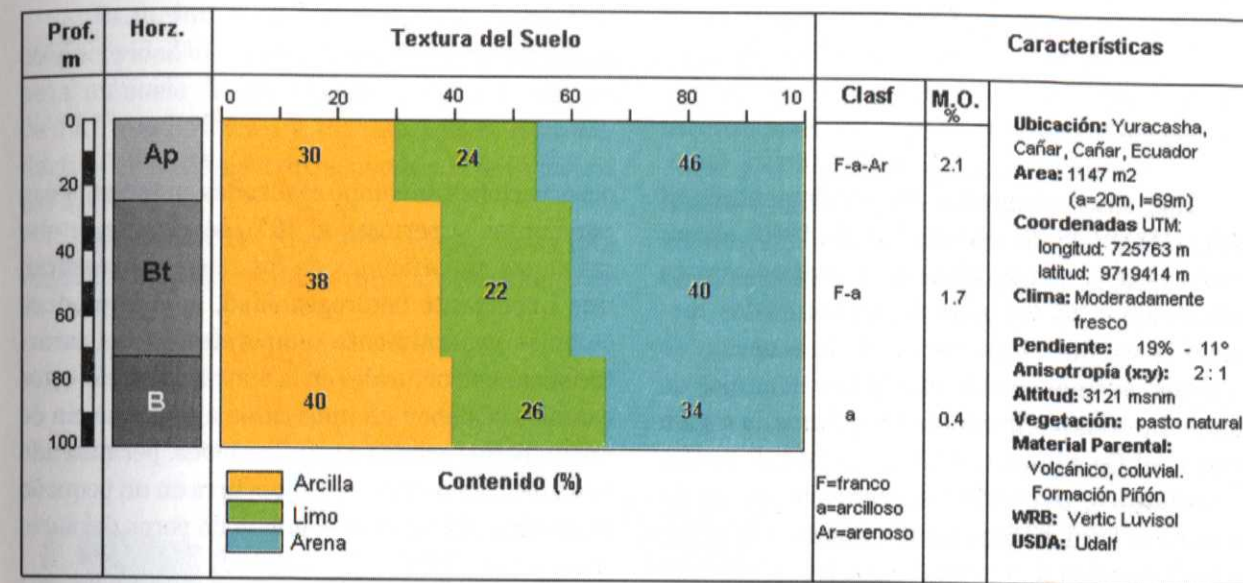
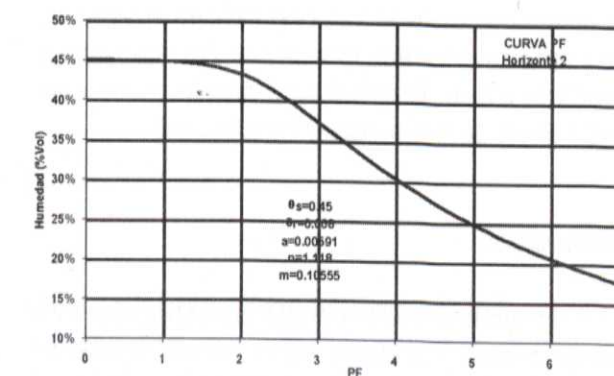
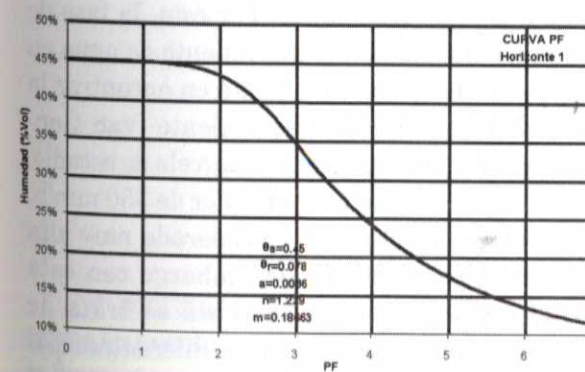


Figura 1: Propiedades del Suelo

A través de las curvas pF se determinaron los parámetros del modelo de van Genuchten (van Genuchten, 1980), la conductividad hidráulica en

cambio, fue descrita mediante el modelo de Mualem (Mualem, 1976), los ajusten fueron realizados con el software Shyfit (Durner, 1995).





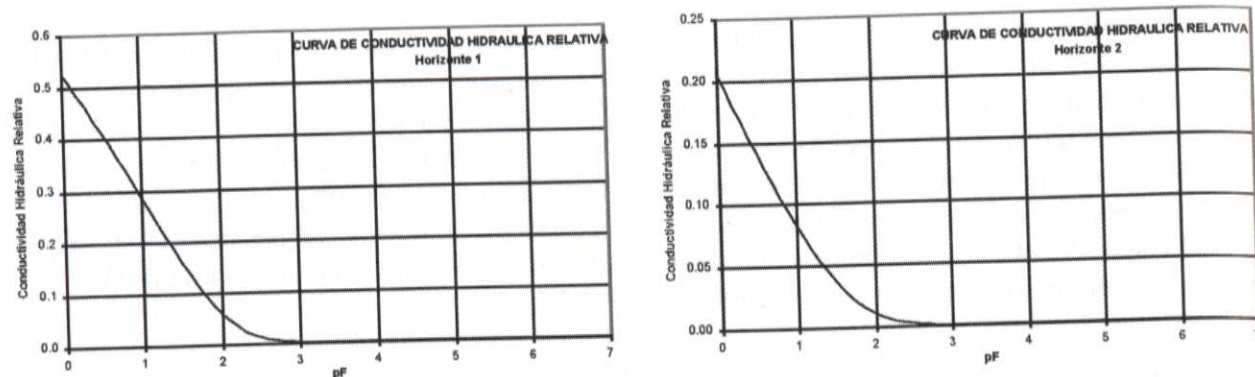


Figura 2: Parámetros hidráulicos del suelo

Con estos elementos fue implementado el modelo HYDRUS-2D (Simunek et al., 1999), el cual simula el movimiento del agua en medios porosos bidimensionales variablemente saturados mediante la resolución numérica de la ecuación de Richards, además, puede manipular dominios de flujo delineados por fronteras irregulares, la región misma del flujo puede estar compuesta de suelos no uniformes, teniendo un arbitrario grado de anisotropía local. El flujo puede ocurrir en un plano vertical, horizontal, o en una región tridimensional que exhiba simetría radial alrededor de un eje vertical. El modelo considera condiciones prescritas de cargas de flujo, fronteras controladas por condiciones atmosféricas, condiciones de frontera de drenaje libre, así como una representación simplificada de drenes nodales.

Adicionalmente se han llevado a cabo ensayos de campo que permitieron cualificar el comportamiento del flujo a través del suelo en condiciones de pendiente, éstos se han realizado en una parcela de experimentación que posee características similares a la de Yuracasha, en cuanto a pendiente, disposición de horizontes y tipo de suelo.

**Métodos**

El modelo HYDRUS-2D fue calibrado y validado para ser utilizado en terrenos con pendiente, el resultado de esta calibración fue presentada en el artículo "Hydraulic characterization of hill slope soils" (Timbe et al., 1999). De este estudio y de

observaciones de campo realizadas en terrenos con pendientes superiores al 12%, se desprende que las capas superficiales de los mismos presentan una importante heterogeneidad, la cuál produce cambios generalmente temporales en las características estructurales en la matriz del suelo, estos cambios se deben en unos casos a la presencia de macro poros, grietas o tubificaciones, permitiendo que una gran porción de flujo ocurra en un pequeño porcentaje del total de volumen de poros del suelo (Faeh et al., 1997).

En el mismo estudio se detectó que los métodos de campo para medir la conductividad hidráulica saturada en el primer estrato del suelo presentan una considerable inestabilidad, especialmente en el método del pozo invertido, obteniéndose valores mínimos de 3 mm/h y máximos de hasta 353 mm/h, sin duda esto se debe en gran parte al grado de alteración que posee la capa superficial debido a las condiciones ambientales y físicas a las que está sujeta. Por esto, la fase de calibración del modelo de movimiento de agua en el suelo se basó primordialmente en encontrar la conductividad hidráulica equivalente (van Genuchten et al., 1999) para toda la parcela de estudio, la misma que resultó tener un valor de 350 mm/h, la cual normalmente sería considerada muy alta para este tipo de suelo, sin embargo con esta conductividad de alguna manera se trata de conjugar en un solo parámetro los diferentes tipos de flujo presentes en la realidad, especialmente el matricial y el preferencial. A diferencia de lo que ocurre en el primer horizonte, las pruebas hidro-

físicas del segundo estrato brindaron resultados bastante estables de alrededor de 1.2 mm/h, por lo que este valor no fue alterado en la modelización.

La simulación se ha llevado adelante para las dos posibilidades extremas del movimiento del agua en el suelo, desde el movimiento producido por el flujo matricial, hasta el que ocurre con la aplicación de la conductividad hidráulica equivalente:

**Situación A.-** El primer estrato posee una conductividad hidráulica saturada promedio propia para un suelo de este tipo franco arcillo-arenoso de 13.1 mm/h (Carsel & Parrish, 1988), esta conductividad hidráulica corresponde a la de la matriz del suelo.

**Situación B.-** El primer estrato posee una conductividad hidráulica saturada 'equivalente' de

350 mm/h resultado de la calibración de los parámetros hidrofísicos de esta parcela mediante el experimento de escorrentía subsuperficial controlada y su correspondiente simulación en el HYDRUS-2D (Timbe et al., 1999).

El análisis para la modelización del flujo subsuperficial se realizó simulando la entrega del agua al suelo desde una acequia ubicada en la parte superior del dominio, en la cual se mantuvo una carga de agua de 30 cm. La carga de presión inicial supuesta en la masa de suelo es de -3 m. para todo el dominio, lo que equivale a una humedad expresada en volumen de 40% para el primer horizonte y 41% para el segundo. La geometría, pendiente, profundidad de horizontes, así como los parámetros hidrofísicos del suelo corresponden a los de la parcela de experimentación descrita.

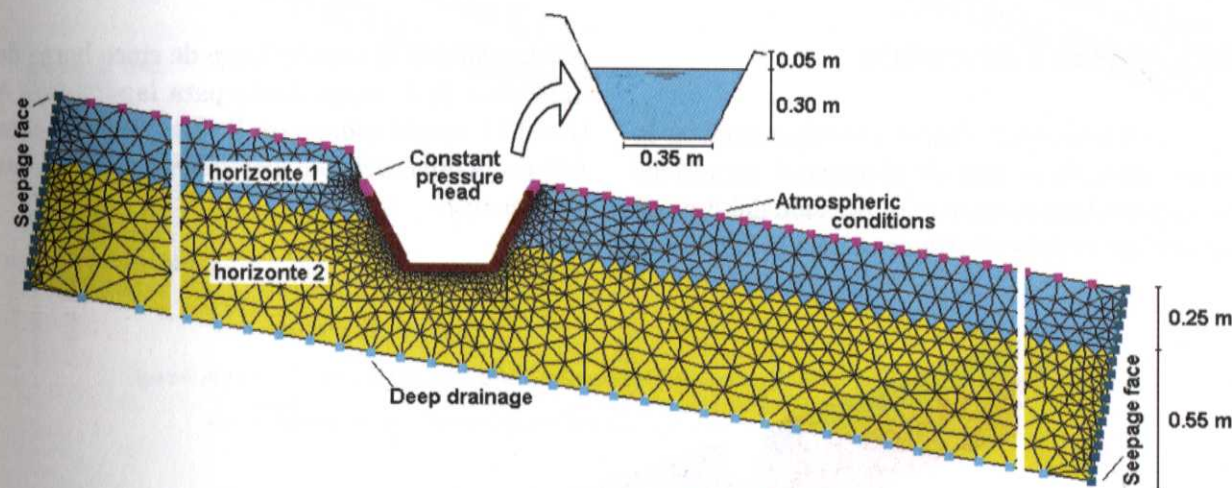


Figura 3: Dominio modelado y condiciones de frontera

A continuación podemos apreciar la diferencia en la entrega de agua a través de la acequia, la figura 4 muestra el volumen de agua entregado por metro de terreno para ambas condiciones de  $K_s$ , al final de 24 horas de actuar la carga de agua

en el canal con una conductividad hidráulica de 13.1 mm/h (A) el volumen de agua ingresado ( $0.217 \text{ m}^3/\text{m}$ ) al terreno es el equivalente a 2.7 horas de acción de la carga con una conductividad hidráulica de 350 mm/h (B).



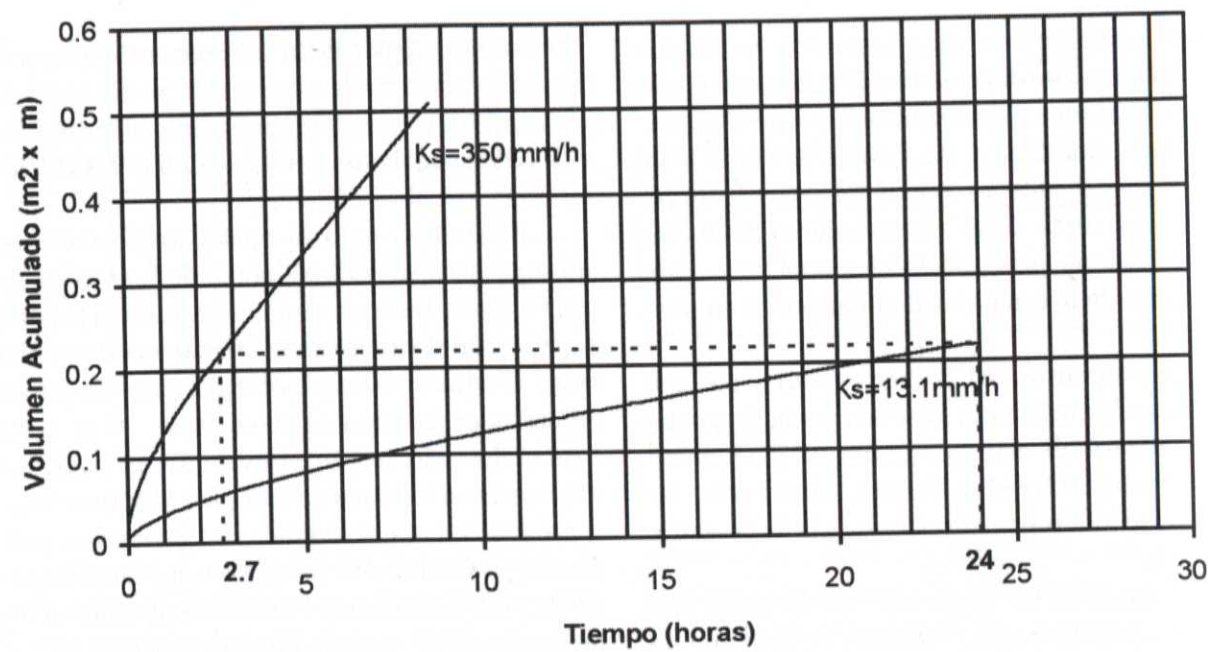


Figura 4: Volumen de Agua acumulada para las situaciones A y B

### Resultados y Discusión

Con estos elementos se procedió a realizar la simulación, de la cual se obtuvieron resultados tanto para avance como para recesión del flujo de agua a través del suelo (figura 6). En la figura 5 se

puede apreciar el avance luego de cinco horas de aplicación de la carga, tanto para la situación A ( $K_s=13.1$  mm/h) como para B ( $K_s=350$  mm/h), es notoria la diferencia del movimiento entre ambas condiciones.

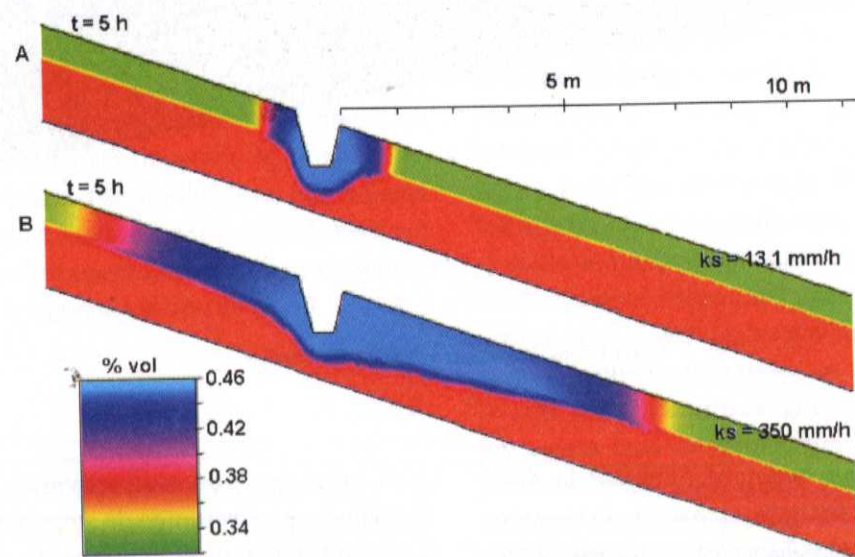


Figura 5: Evolución de la humedad referida a volumen en el suelo para diferentes condiciones de  $K_s$  luego de 5 horas de aplicación de una carga de agua de 30 cm en el canal

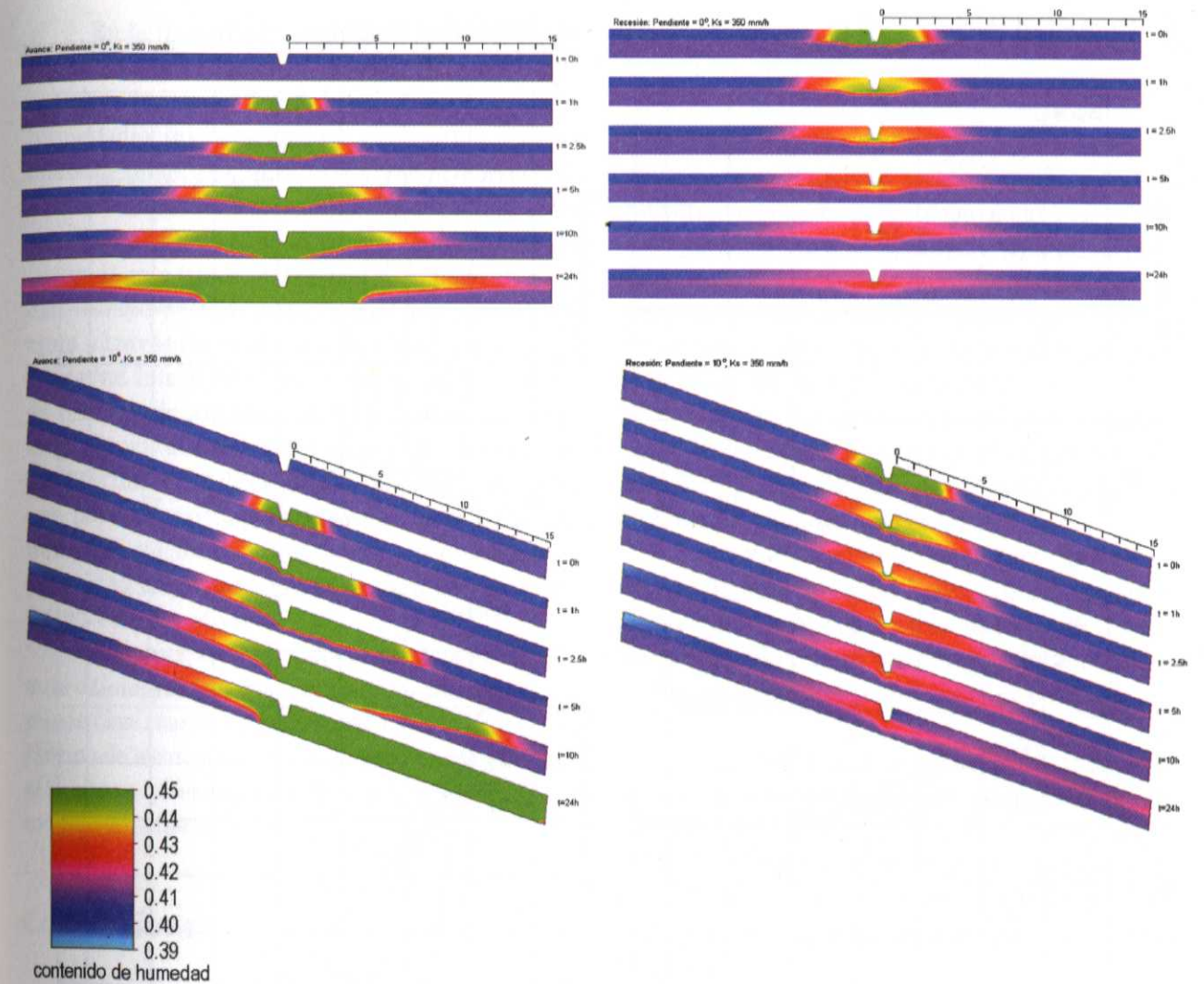


Figura 6: Avance y recesión de la humedad referida a volumen en el suelo para una  $K_s$  de 350 mm/h en terrenos planos y con pendiente con una aplicación de 30 cm de agua en el canal

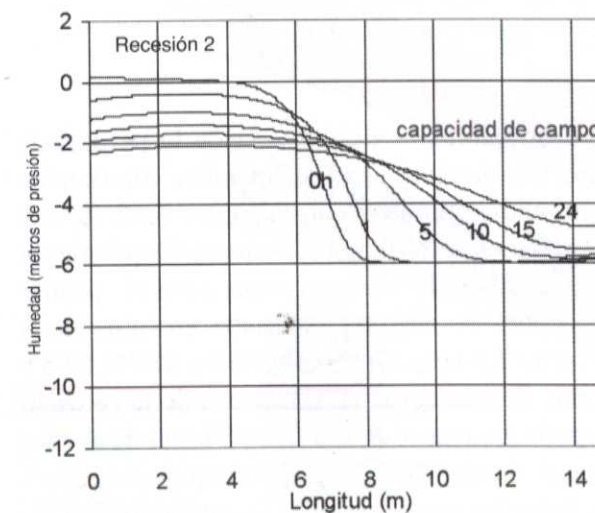
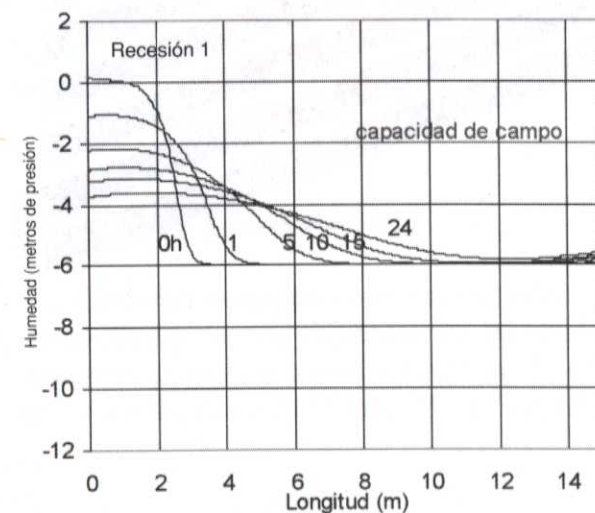
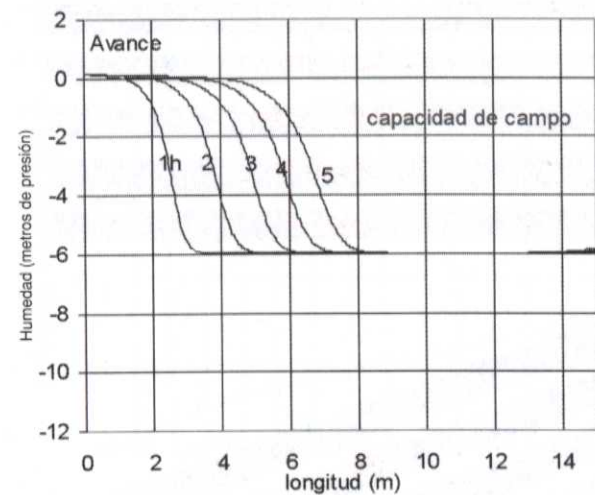
Debido a la alta variación entre éstas situaciones y además, por que está comprobada la validez de la conductividad hidráulica equivalente para modelar este tipo de flujo (Timbe et al., 1999) se continuó el trabajo para una gama más amplia de pendientes (0, 5, 10, 15, 20 y 25 grados), obteniéndose resultados similares, en los que se pudo corroborar la dependencia del movimiento del agua con la pendiente del terreno.

Se analizaron curvas de avance y recesión de la humedad a lo largo de 15 metros, tomando como origen la acequia desde la que se suministra agua, para un terreno con una pendiente de 10

grados (pendiente similar a la de la parcela de experimentación). Las situaciones analizadas comprendieron humedades iniciales de -3, -6, -9 y -12 m para todo el dominio, es decir, el equivalente en porcentaje de volumen tanto para el primer como para el segundo horizonte en estos casos sería: 40.2 y 41%; 37.1 y 39%; 35.2 y 37.7%; 33.6 y 36.6%. Se realizaron simulaciones de la recesión luego de un avance de 1, 2, 3, 4 y 5 horas de avance (tiempo en que la acequia permanece con agua). En todos los casos se utilizó la conductividad hidráulica equivalente.



**A. Humedad inicial = -6 m**



**B. Humedad inicial = -12 m**

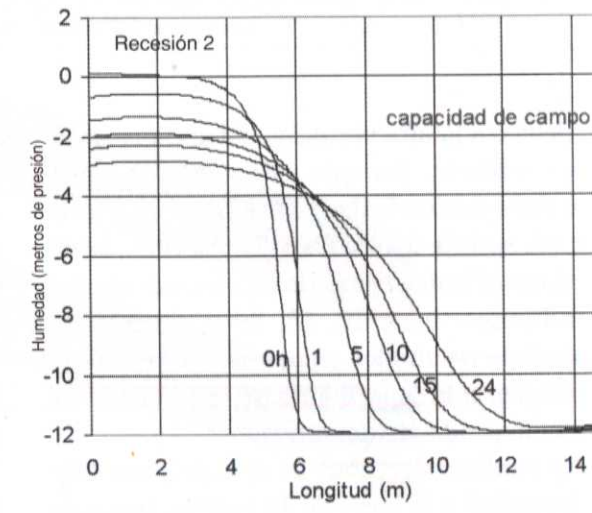
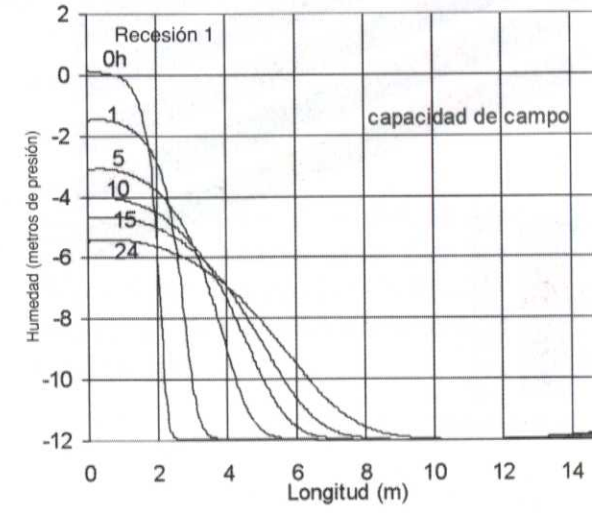
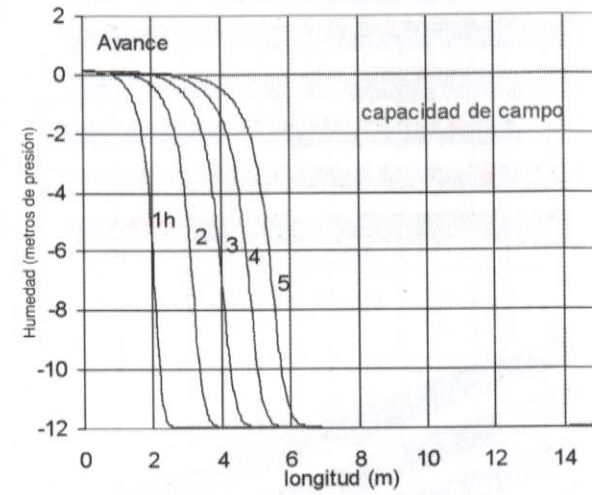


Figura 7: Evolución de la humedad en el suelo para condiciones de humedad inicial diferentes (-6 y -12 m). Recesión 1 y 2 ocurren luego de 1 y 5 horas de avance respectivamente. Las recesiones se realizaron para 24 horas a partir de este momento.

En la figura 7, a manera de ejemplo, puede observarse la evolución de humedades para las recesiones luego de 1 y 5 horas de avance para humedades iniciales de -6 y -12 metros. Consta además como una guía la humedad correspondiente a capacidad de campo. De todos los casos analizados puede concluirse que, como es de esperar, en este tipo de experimento la humedad inicial influye decisivamente en el movimiento del agua a través del suelo, es apreciable que con una humedad inicial de -6 m, la humedad final luego de 5 horas de avance y de 24 horas de recesión, moja el suelo alrededor de 7 metros pendiente abajo con una humedad de capacidad de campo, mientras que para las mismas condiciones, pero para una humedad inicial de -12m, la misma humedad de capacidad de campo se obtiene para una longitud de tan solo 4 metros.

El tiempo que permanece el agua en la acequia o tiempo de avance, también es decisivo, como puede observarse en ambos casos (-6 y -12 m), un tiempo de avance de una hora resulta insuficiente si lo que se quiere es obtener una longitud de suelo mojado considerable.

**Conclusiones**

- Los parámetros de diseño de este nuevo método de riego han sido determinados como: conductividad hidráulica equivalente de suelo superficial, conductividad hidráulica del subsuelo, humedad inicial, capacidad de campo y punto de saturación del suelo, distancia entre acequias de suministro de agua. Para lograr un riego adecuado, estos parámetros deben conformar un conjunto concordante.

- El método de riego estudiado tiene perspectivas de aplicación masiva en terrenos con pendientes fuertes que tiene una alta conductividad hidráulica en el suelo superficial y una baja conductividad hidráulica en el subsuelo.

- Se observa que en la aplicación de este procedimiento, existe ausencia de escorrentía superficial lo cual disminuirá notoriamente la erosión en este tipo de terrenos, en los que debido a su pendiente este proceso es acelerado, de igual ma-

nera y de acuerdo a los consumos establecidos en la modelización y por cuanto no existe escorrentía superficial se traduciría en un ahorro de agua, con lo que se aprovechara de una mejor manera el agua de riego, elemento escaso, especialmente en nuestro medio, esto se confirma al analizar el caudal necesario para determinado tipo de terreno, de acuerdo a la modelización realizada, este es muy pequeño lo cual permite la optimización del uso del recurso y tiene concordancia con las cantidades disponibles en las altas montañas.

- Dadas las características de entrega del agua los caudales utilizados son muy pequeños lo cual permitirá regar una mayor superficie con los caudales disponibles en la región.

- La variabilidad de los factores que propician el flujo preferencial hacen que el avance del frente húmedo no sea homogéneo, sin embargo se ha confirmado que es un avance adecuado y que puede ser controlado en el dimensionamiento entre zanjas.

- Si bien una parcela con estas características facilita un rápido movimiento del agua y la distribución de fertilizantes, se debe tener cuidado en la creación de zonas con exceso de humedad y otras con deficiencia, además, también se facilita el transporte de contaminantes y pesticidas.

- Conforme aumenta la pendiente del terreno la infiltración lateral se comporta cada vez más como la percolación profunda, dependiendo básicamente de la gravedad, estos aspectos deberán ser profundizados en estudios posteriores.

- El comportamiento del terreno en la simulación indica que las variaciones entre la saturación del suelo y la humedad de capacidad de campo, que ya no implica riesgo de deslizamiento, es adecuado y garantiza un elevado coeficiente de seguridad en cuanto a posibles inestabilidades del terreno debido a excesos de humedad.

- El movimiento del agua en el sentido de la pendiente del terreno va incrementándose según se incrementa su permeabilidad, solo si el segundo horizonte posee una permeabilidad menor, cuanto más alta sea ésta conductividad hidráulica el movimiento se va volviendo más vertical, dando paso a una percolación profunda.



**Referencias**

- Carsel, R. F., y R. S. Parrish, 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water resources research*. 24:755-769.
- Cisneros F., E. Pachecho y J. Feyen, 1998. Quantitative analysis of the performance of furrow irrigation in the southern Sierra of Ecuador, on slopes steeper than 12%, 3ra. Convención Internacional de las Industrias metalmeccánica y electrónica METANICA 98, I Taller Internacional de riego y drenaje, La Habana, Cuba.
- Cisneros F., P. Torres y J. Feyen, 1999. Quantitative análisis of the performance of sprinkler irrigation in the southern Sierra of Ecuador, on slopes steeper than 12%, I Conferencia de la asociación Europea de Riego, 7-9 mayo Sevilla; II Encuentro de las aguas, Foro internamericano de gestión de recursos hídricos 15-18 de Junio, Montevideo-Uruguay.
- Durner W., 1995. SHYPPFIT Users Manual, Research Report 94.1, University of Bayreuth, Dept. of Hydrology, Germany, 25 pp.
- Faeh, A.O., S. Scherrer y F. Naef, 1997. A combined field and numerical approach to investi-

- gate flow processes in natural macroporous soils under extreme precipitation, *Hydrology and earth systems sciences*, 4:787-800.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*. 12(3): 513-521
- Simunek J., Sejna M. y van Genuchten M. Th., 1999. The Hydrus-2D Software package for simulating the two dimensional movement of water, heat, an multiple solutes in variably-saturated media.
- Timbe L., De Bievre B., Feyen J. y Jacques D., 1999. Hydraulic characterisation of hill slope soils. *International Workshop of EurAgEng's Field of Interest on Soil and Water*, 446-456.
- van Genuchten, M. Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44::892-898.
- van Genuchten, M. Th., M.G. Schaap, B.P. Mohanty, J. Simunek y F. J. Leij, 1999. Modeling flow and ttransport processed at the local scale, *International Workshop of EurAgEng's Field of Interest on Soil and Water*, 23-45.



# Caracterización hidráulica en suelos de pendiente pronunciada

**Introducción**

La región interandina se caracteriza por sus pendientes pronunciadas, en las cuales se cultiva en terrenos con pendientes de hasta el 30%. El método de riego mas común en la región es el riego por surcos en líneas de contorno. Los suelos predominantes son los Cambisols y los Luvisols con propiedades vérticas, cuya principal característica es un primer horizonte con una permeabilidad relativamente alta causada por macroporos, grietas y labranza, mientras que los horizontes más profundos son casi impermeables. Este típico perfil de los suelos, conjuntamente con las pendientes pronunciadas producen escorrentía subsuperficial a través del primer horizonte, este comportamiento causa los siguientes problemas: pérdidas de agua (un volumen considerable de agua no es almacenado en el suelo), deslizamientos de tierra (saturación de masas de suelo), y zonas pantanosas (acumulación de agua en las partes planas). El presente estudio analiza los métodos tradicionales para la determinación de la Conductividad Hidráulica Saturada (CHS) y un experimento de campo a escala de parcela para determinar cuál es el más apropiado para cuantificar el flujo de agua a través del suelo.

**Materiales y métodos**

Se implemento una parcela experimental dentro del proyecto de riego Patococha (Cañar) con una pendiente longitudinal del 19%, una pendiente transversal cercana al 0% y una altitud media de 3121 metros sobre el nivel del mar. El suelo es un Vertic Luvisol, con un espesor de la capa superficial que varía entre 30 y 90 cm, una estructura fina y media con bloques subangulares, y con la presencia de macroporos y grietas. El subsuelo es masivo con alto contenido de arcilla. La vegetación natural es pasto y el clima se clasifica como fresco.

Para la caracterización hidráulica de los suelos se utilizaron los siguientes métodos: Permeámetro de Carga Constante (PCC), Infiltrómetro de Doble Anillo (IDA), Pozo Invertido (PI), y Experimento a Escala de Parcela (EEP). Los métodos PCC, IDA y PI son muy conocidos para la determinación de la conductividad hidráulica saturada (CHS) y no serán descritos. En el EEP se entregó un caudal constante de 1.9 l/s a la parcela (10 m de ancho y 20 m de longitud) desde la parte superior utilizando un vertedero. En la parte inferior se instaló un canal y drenajes

L.Timbe<sup>1</sup>  
 B. De Bievre<sup>1,2</sup>  
 J. Feyen<sup>2</sup>  
 D. Jacques<sup>2</sup>

1. Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca. Casilla 01-05-1852, Cuenca, Ecuador

2. Laboratory for Soil and Water, Institute for Land and Water Management, KULeuven, Vital Decosterstraat 102, 3000 Leuven, Belgium



en el primer y segundo horizonte para recoger la escorrentía superficial y subsuperficial respectivamente. El caudal constante se lo aplico durante 90 minutos, durante éste período los caudales de escorrentía superficial y subsuperficial fueron medidos frecuentemente, esto continuó hasta que los diferentes flujos cesaron.

### Resultados y discusión

La tabla 1 presenta los resultados de la CHS mediante métodos tradicionales (PCC, IDA y PI). Como se puede observar existe una gran variabilidad de la CHS en el primer horizonte entre los diferentes métodos, así tenemos una promedio

máximo de 81.9 mm/h (PI) y un promedio mínimo de 3.1 mm/h (PCC); mientras que para el segundo horizonte los valores de la CHS tienen el mismo orden de magnitud.

El experimento a escala de parcela fue modelado usando el programa HYDRUS-2D. La calibración de los caudales de escorrentía subsuperficial a través del primer y segundo horizonte (a 23 y 73 cm de profundidad) permitió determinar la CHS de cada horizonte (mejor ajuste entre el hidrograma medido y simulado), obteniéndose una CHS de 475 y 1.2 mm/h para el primer y segundo horizonte respectivamente, estos valores de la CHS son representativos para la parcela experimental.

**Tabla 1:** Valores de la conductividad hidráulica saturada del primer y segundo horizonte del suelo en la parcela experimental, medidos con diferentes métodos.

Parámetro estadístico	Permeámetro de carga constante		Infiltrómetro de doble anillo		Pozo invertido	
	1er hor.	2do. hor.	1er hor.	2do. hor.	1er hor.	2do. hor.
	mm h <sup>-1</sup>					
# pruebas	38	39	16	16	20	20
Máximo	31	8	72	36	352.8	2.9
Mínimo	0	0	0	0	0	0
Media	3.1	0.5	26.1	9.4	81.9	1.0
Desv. estándar	7.1	1.4	21.9	12.3	118.3	0.88
Mediana	0	0	24	3.2	7.8	0.9

### Conclusiones

- La medida de la CHS en pequeñas muestras y la tasa de infiltración básica derivada de la curva de infiltración acumulada subestima la CHS media de la parcela en el horizonte superior;
- para el segundo horizonte (más compacto, con menos grietas y galerías causadas por raíces y lombrices) todas las pruebas dan valores similares;
- el PCC, el IDA y el PI dan valores de CHS

a escala local, consecuentemente tienen una gran variabilidad;

- con el experimento a escala de parcela se obtiene una CHS equivalente de toda la parcela;
- el PCC, y el IDA (muestras pequeñas) dan una medida de la CHS dentro de los elementos estructurales del suelo, lo cual puede distinguirse claramente en el horizonte superficial;
- con el método del PI y el EEP se obtiene una medida de la conductividad hidráulica macro del suelo y dan valores similares en el primer horizonte.



# Hydraulic characterisation of hill slope soils

### Abstract

L. Timbe<sup>1</sup>  
B. De Bièvre<sup>1,2</sup>  
J. Feyen<sup>2</sup>  
D. Jacques<sup>2</sup>

While the methods involved in the measurement of the saturated hydraulic conductivity of soils are simple and straightforward, the application of these methods in situ, particular in sloping fields, is often difficult. Unless the researcher is thoroughly familiar with the method and the possible sources of error in the measurement, substantial errors can be produced. The foregoing is illustrated by characterising the saturated hydraulic conductivity of a sloping Vertic Luvisol, having an average slope of 19% and an effective root depth of 0.72 m.

The following methods were used: the constant-head permeameter, the double ring infiltrometer, the inversed auger-hole technique and an inversed method based on the runoff and subsurface outflow recorded during a field experiment with constant inflow and a 2-D finite element flow simulation model (HYDRUS-2D). The results of the different methods applied were compared. The analysis revealed that: (i) local, small scale measurements methods are not able to fully describe the hydraulic behaviour of the field, and (ii) point measurements of the saturated hydraulic conductivity hardly enable derivation of the field average value of the conductivity. Combination of the output of a field scale experiment with a simulation model seems to be an elegant, adequate and cost effective method for the hydraulic characterisation of sloping multi-layered soil profiles.

### Keywords

Soil hydraulic properties, saturated hydraulic conductivity, constant-head permeameter, double ring infiltrometer, inversed auger-hole method, field-border method

1. Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, Universidad de Cuenca, Casilla 01-05-1852, Cuenca, Ecuador

2. Laboratory for Soil and Water, Institute for Land and Water Management, KULeuven, Vital Decosterstraat 102, 3000 Leuven, Belgium



## Introduction

The Southern Sierra in Ecuador is characterised by its steep slopes, where fields are cultivated on slopes up to 30%. That is the case of the Patococha scheme located in the province of Cañar, which is a typical example of irrigation projects in the region (De Bièvre et al., 1998). The most common irrigation system used by the farmers is furrow irrigation in contour lines. The water distribution is on fixed rotation with an interval between 5 and 15 days (Cisneros et al., 1998). The predominant soils in the region are the Cambisols and Luvisols with vertic properties. The principal characteristic of these soils is a first layer with a relatively high permeability caused by macropores, cracks and tillage, while the deeper horizons are almost impervious (De Bièvre et al., 1998; Dercon et al., 1998).

This typical soil profile, together with the high slopes produce subsurface runoff across the first soil layer. The amount of this flow is observed during irrigation or heavy rain, and a high percentage of the applied water appears in the low zones where the slope is smaller. As a result only the first horizon is saturated and there is only few infiltration to the deeper horizons. This behaviour causes the following problems:

- water losses since a considerable volume is not stored in the soil (reduced irrigation efficiency);
- land sliding caused by soil mass saturation; and
- water logging in the downstream flatter areas.

For the proper utilization of rainfall and irrigation water and to avoid the problems described above it is very important to derive at field scale realistic values for the soil hydraulic conductivity.

## Methods

The following methods were applied for the characterisation of the saturated hydraulic conductivity of the field soil:

- the constant-head permeameter method;

- the double ring infiltrometer method;
- the inversed auger-hole method; and
- the field-border method.

### The constant-head permeameter method

The method is a laboratory technique whereby undisturbed soil samples, after saturation, are subjected to a slight hydraulic overpressure. During measurement the pressure is kept constant (constant-head method) and the flow of water through the sample is recorded. The saturated hydraulic conductivity is derived solving the Darcy equation towards the conductivity term (Eq. 1). The samples were taken in the first and the second horizon of the soil profile of the experimental plot in Patococha using Kopecky rings with a volume of 100 cm<sup>3</sup>. The rings were taken in the vertical direction yielding the vertical saturated hydraulic conductivity. The conductivity was measured on 38 and 39 samples for the first and second horizon, respectively.

$$K_{sat} = \frac{V}{t \times A} \times \frac{l}{l+d} \quad (1)$$

Where:

K<sub>sat</sub> = saturated hydraulic conductivity (cm h<sup>-1</sup>)

V = water volume flows through the section A (cm<sup>3</sup>)

t = time (h)

l = soil sample height (cm)

d = water head height (cm)

### The double ring infiltrometer method

The double ring infiltrometer technique, also called the double-pond method, involves the installation of two concentric rings in the soil to a depth of 10 to 15 cm. The rings have a height of 40 cm, a wall thickness of 2 mm with a sharpened cutting edge at the bottom. The diameter of the inner ring is 30 cm and 45 cm for the outer ring. The infil-

trometer is filled with a known volume of water (a depth of 10 cm). As water infiltrates the volume of water to be added to maintain a constant head is recorded. Measurements are made at periodic intervals up to 240 min. From the cumulative infiltration curve, measured in the inner ring, the instantaneous infiltration rate curve is derived and the value obtained for the basic infiltration rate is assumed to be a measure for the saturated hydraulic conductivity. The measured value is representative for the vertical saturated hydraulic conductivity. Sixteen replicate tests were run in the first and second horizon of the soil profile of the experimental plot.

### The inversed auger-hole method

The method consists of drilling a hole into the soil with an auger to a certain depth below the surface. The hole is filled with water until the soil below and around the hole is practically saturated. At this point the infiltration rate will become more or less constant. The total infiltration is measured and divided by the surface area of infiltration to become the infiltration flux, which is equal to the saturated hydraulic conductivity. The method was applied to the first and the second horizon (20 replicates) of the soil profile in the experimental plot. The measured value is representative for the combined vertical and horizontal saturated hydraulic conductivity.

$$K_{sat} = 1.15 \times r \times s \quad (2)$$

Where:

K<sub>sat</sub> = Saturated hydraulic conductivity (cm s<sup>-1</sup>)

r = radio hole (cm)

s = slope of straight line of the curve log (ht + r/2) versus t

### The field-border method

In the field a small border with zero cross slope is constructed on which the input and output of water are measured during a border test. The border was 10.75 m width and 20 m long. The slope in the longitudinal direction was 19%. The border was fed at the upstream end by a horizontal supply ditch. The ditch was closed at both ends and fed with a constant flux of 1.9 l s<sup>-1</sup>. The moment that the supply ditch was filled with water, excess water flew laterally over the lower bank and a water film with a thickness varying between 0.5 and 1.0 cm ran down the field. Care was taken that the water film was moving uniformly downward. At the bottom end of the field an interception flume was constructed collecting the surface runoff water. This water was collected in reservoir A, equipped with a measuring device for monitoring the inflow of runoff water. Below the interception flume two drains were installed, at the bottom of the 1st and 2nd horizon, at a depth of 23 and 72 cm, respectively. The drains were installed to intercept the subsurface flow, if any. The subsurface flow collected by both drains was discharged to the reservoirs B and C. Both reservoirs were also equipped with a measuring device for monitoring the outflow as a function of time.

The border test was run for 90 min. During this period the runoff and subsurface flow at a depth of 23 and 72 cm were frequently measured. Measurements were continued after the inflow stopped, until the outflow at the surface and the two depths ceased. The inflow and outflow hydrographs were used to calibrate the HYDRUS-2D model (Jirák et al., 1996). The calibration yielded field average values for the soil hydraulic properties using a trial and error procedure. Saturated hydraulic conductivity values for both the first and the second horizon were adjusted until a good fit was obtained between measured and modelled discharge rates in the drains. The advance curve of the border test was calculated using the advance function X = p Tr (James, 1988), with X the distance in m, T the advance time in minutes and p and r fitting coefficients.

The soil water retention curve of the first and



second horizon was determined independently to minimise the number of free parameters in the calibration process. In every horizon 6 Kopecky rings were taken on which the soil water content was determined for the following pF-values: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.3, 2.8, 3.4, and 4.2. The measured average soil water characteristic curves were fitted to the van Genuchten equation (van Genuchten, 1980) using the software program

SHYPPFIT (Durner, 1995). In this way the number of unknown parameters in the calibration process could be reduced to the vertical saturated hydraulic conductivity of the first and second horizon, and the anisotropy factor for both horizons. The anisotropy factor gives the ratio between the vertical and horizontal hydraulic conductivity.

The layout of the field-border experiment is given in Fig. 1.

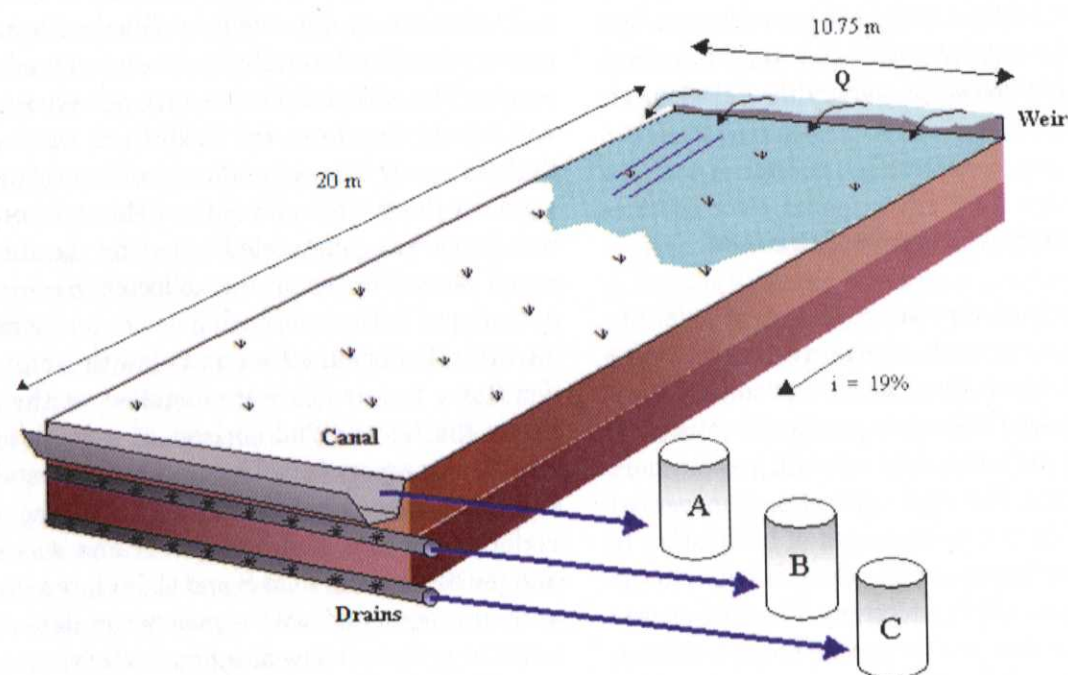


Figure 1. Layout of the field-border test

**Materials**

The experimental plot is located in the irrigation project Patococha, district Yuracasha, in the province of Cañar (UTM 725763 E and 9719414 N), Ecuador. The average elevation is 3121 m above mean sea level. The average field slope in the longitudinal direction is 19%, and the cross slope is close to 0%. The soil has been characterised as a Vertical Luvisol (Deckers et al., 1998). 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 conductance of water in the soil is mainly con-

trolled by the macropore system, in which most of the roots are present. The root system explores the soil matrix from the macropores 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>. Since the topsoil is more permeable than the underlying clay/rock layer, water quickly infiltrates to the bottom of the top layer, where it flows laterally to lower regions. The natural vegetation is pasture and the climate is moderately cold. The basic properties of the soil are listed in Table 1.

**Table 1:** Basic physical properties of the soil

Layer		Clay (%)	Loam (%)	Sand (%)	p (gr/cm <sup>3</sup> )	Textural classification
Depth (cm)	Symbol					
0-23	Ap	24	30	46	1.49	Loam
23-72	Bt	22	38	40	1.48	Loam
72-91	B	26	40	34	1.32	Loam
>91	2B	22	48	30	1.45	Loam

The soil water retention curves of the first and second horizon are given in Fig. 2. Table 2 contains the parameters of the van Genuchten equation (Eqs. 3-7) fitted to the average measured pF-curves. Those parameters are fixed and the subsoil is considered to be impervious. By fixing these

parameters the number of free parameters during the calibration process, using the HYDRUS-2D simulation model could be reduced. The foregoing facilitated the optimisation of the value of the hydraulic conductivities of both horizons.

**Table 2:** The parameter values of the van Genuchten equation fitted to the average measured pF-curve of the 1st and 2nd soil layer

Layer	$\alpha$ (cm)	n	m	$\theta_s$ (%)	$\theta_r$ (%)
1	0.0036	1.229	0.186	42	7.8
2	0.0059	1.118	0.106	42	6.8

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$m = 1 - 1/n \quad \Rightarrow \quad n > 1 \quad (4)$$

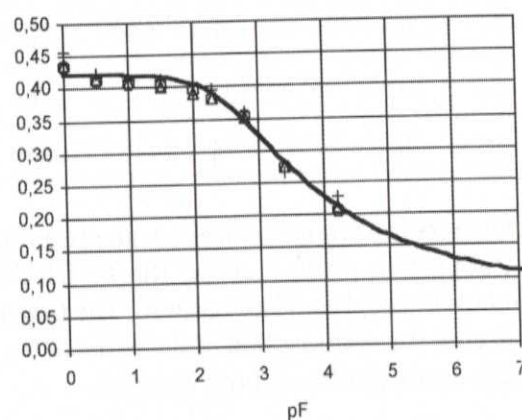
The hydraulic conductivity for an unsaturated soil can be calculated by the following equations:

$$K(h) = \begin{cases} K_s K_r(h) & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$K_r(h) = S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (6)$$



$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (7)$$



Where:  
 $\theta_r$  = residual water content (% vol.)  
 $\theta_s$  = saturated water content (% vol.)  
 $h$  = pressure head (cm)  
 $n, m$  = shape parameters  
 $1/\alpha$  = entry air (cm)  
 $K_r$  = relative hydraulic conductivity

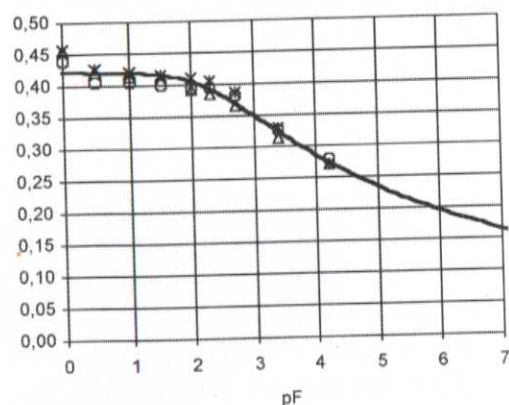


Figure 2. Soil water retention curve of the first and second horizon (points = field data; full line = fitted)

### Results and discussion

The experimental results derived using the constant-head permeameter method, the double

ring infiltrometer and the inversed auger-hole technique are summarised in Table 3. The values of the hydraulic conductivity are given in mm hr<sup>-1</sup>.

**Table 3:** Values of the saturated hydraulic conductivity of the first and second horizon of the soil in the experimental plot, as measured with the constant-head permeameter, the double ring infiltrometer and the inversed auger-hole method

Statistical parameter	Constant-head permeameter method		Double ring infiltrometer method		Inversed auger-hole method	
	1 layer	2 layer	1 layer	2 layer	1 layer	2 layer
	mm h <sup>-1</sup>					
Maximum value	31	8	72	36	352.8	2.9
Minimum value	0	0	0	0	0	0
Average value	3.1	0.5	26.1	9.4	81.9	1.0
Standard deviation	7.1	1.4	21.9	12.3	118.3	0.88
Median	0	0	24	3.2	7.8	0.9

Table 3 contains for each method the average, maximum and minimum measured value of the saturated hydraulic conductivity, the standard deviation and the median value. Figure 3 shows the frequency distribution of the individual measured values of the hydraulic conductivity for the three different methods. According to the (2-test the measured distribution for all the three methods fits with a 95% level of confidence the exponential distribution.

The field border test was implemented to derive the saturated hydraulic conductivity of the first and second soil layer in an indirect way using the HYDRUS-2D software. The package contains the 2D-simulation model SWMS-2D, version 1.21 and the graphic interface HYDRUS-2D. The SWMS-2D model simulates the unsteady state water flow in a variable saturated porous medium, using the modified Richards equation (Eqs. 8 & 9) (Imùnek et al., 1996). The soil water content at the start of the field-border test was measured. The soil water content in both horizons varied between 40 and 41 volume percent, corresponding to a pF-value of 2.3. The top boundary condition, being the advance curve of the waterfront moving over the surface, was monitored during the experiment. Curve fitting derived the parameters of the advance curve. The third layer in the soil profile having no roots was assumed to be impervious.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ K (K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A) \right] - S \quad (8)$$

$$K(h,x,z) = K_s(x,z) K_r(h,x,z) \quad (9)$$

Where:  
 $\theta$  = volumetric water content (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>)  
 $h$  = pressure head (cm)  
 $S$  = sink term (h<sup>-1</sup>)  
 $x_i (i=1,2)$  = spatial coordinates (cm)  
 $t$  = time (h)  
 $K_{Aij}$  = components of a dimensionless anisotropy tensor KA

$K$  = unsaturated hydraulic conductivity function (cm h<sup>-1</sup>)  
 $K_s$  = saturated hydraulic conductivity (cm h<sup>-1</sup>)  
 $K_r$  = relative hydraulic conductivity

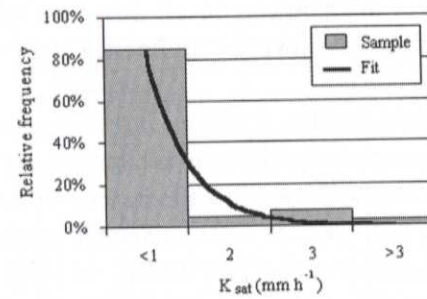
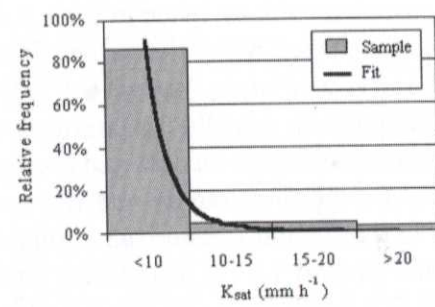
The parameter values, listed in Table 2, were used to describe the soil water characteristic curve of the first and second layer. As such the only unknown parameters to describe the water flow in the sloping transect is the vertical and horizontal saturated hydraulic conductivity and the anisotropy factor in the 1st and 2nd horizon. Calibration of the model output to the measured outflow hydrograph at a depth of 23 and 72 cm enabled to derive the set of hydraulic conductivity values that resulted in the best fit between the measured and simulated outflow hydrographs. The best fit (see Fig. 4) was obtained with a saturated hydraulic conductivity of 475 mm hr<sup>-1</sup> for the first horizon and 1.2 mm hr<sup>-1</sup> for the second horizon, and a constant ratio between the vertical and horizontal conductivity of 1:1. From a detailed analysis of the morphology of both horizons it was concluded that physically they are isotropic. The derived values of the saturated hydraulic conductivity are representative for the field plot, i.e., 10.75 m x 20 m, and should therefore be compared to the average saturated hydraulic conductivities derived using the constant-head, the double ring infiltrometer and the inversed auger-hole method. The constant-head method yielded an average vertical saturated hydraulic conductivity of 3.1 and 0.5 mm hr<sup>-1</sup> for the first and second horizon, respectively (see Table 3). According to the data derived with the double ring infiltrometer the average vertical saturated hydraulic conductivity of the first horizon is 26.1 mm hr<sup>-1</sup> and 9.4 mm hr<sup>-1</sup> for the second horizon. The inversed auger-hole method yielded a much



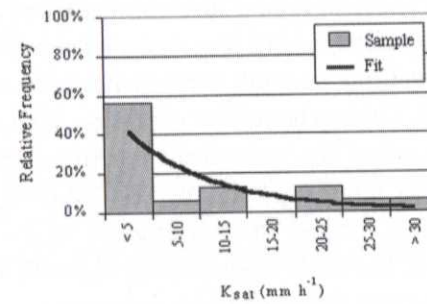
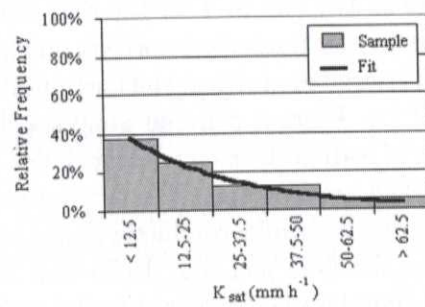
First soil layer

Second soil layer

The constant-head permeameter method



The double ring infiltrometer method



The inversed auger-hole method

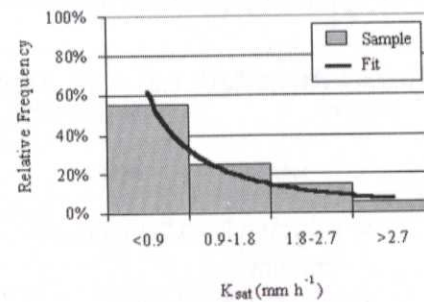
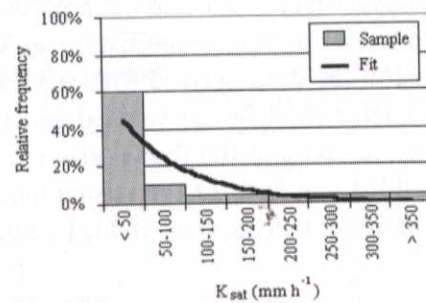


Figure 3. Frequency distribution of the measured values of the saturated hydraulic conductivity and the fitted exponential distribution for the first and second horizon, using the constant-head, the double ring infiltrometer and the inversed auger-hole method

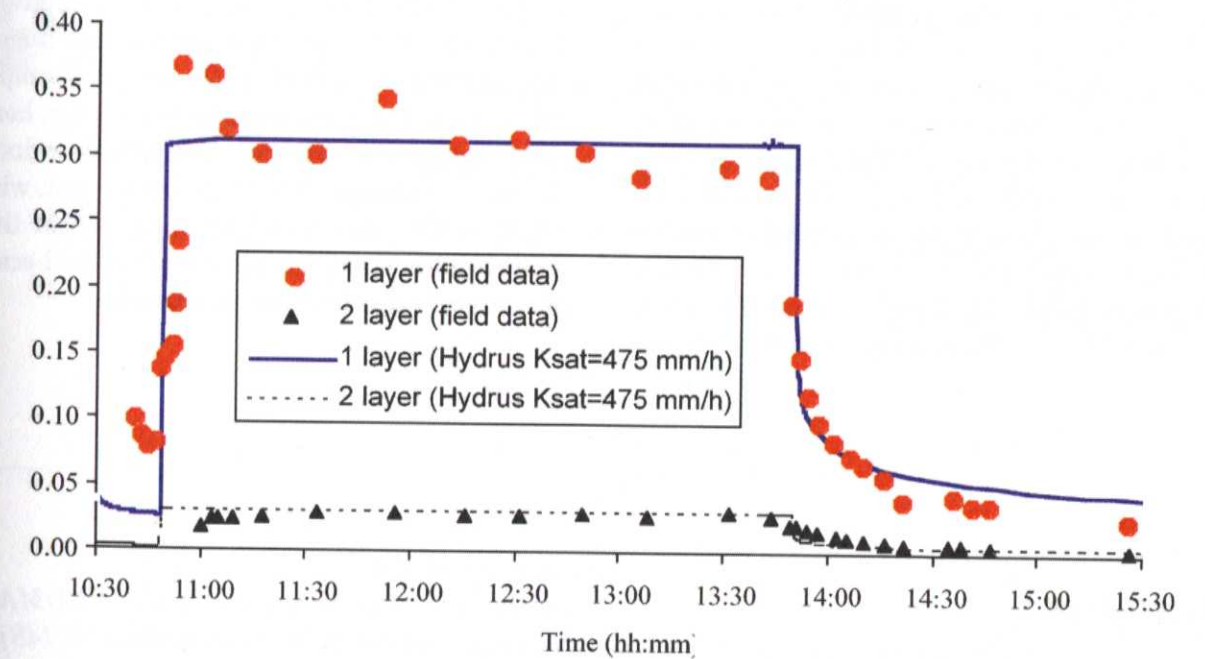


Figure 4. Measured and simulated outflow hydrographs at the bottom of the first and second horizon

higher value for the average saturated hydraulic conductivity of the 1st horizon, i.e., 81.9 mm hr<sup>-1</sup>. Applied to the second horizon an average saturated hydraulic conductivity of 1.0 mm hr<sup>-1</sup> was obtained, being of the same order of magnitude as the average value derived by the constant-head and double ring infiltrometer method.

Conclusions

Whereas the constant-head, the double ring infiltrometer and the inverse auger-hole methods yield local scale values for the saturated hydraulic conductivity, the value of the saturated hydraulic conductivity derived indirectly, by fitting the simulated outflow hydrographs at a depth of 23 and 72 cm below the surface to a measured hydrographs, is representative for the field parcel. The study revealed that the saturated hydraulic conductivity of the first horizon (0 - 23 cm) as determined by the constant-head method, a method using small soil samples, and the double ring infiltrometer technique is a measure for the conductivity within

the structural elements which can be distinguished in the top layer. The inversed auger-hole technique and the field-border test yield for the top layer of the soil profile similar values for the saturated hydraulic conductivity, which are on average a factor 10 larger. From this it is concluded that the saturated hydraulic conductivity derived by the auger-hole technique and the field-border test are a measure for the macro hydraulic conductance of the soil. All four methods yield about the same average low value for the saturated hydraulic conductivity of the 2nd horizon. This is not surprisingly given that this horizon is more compact, with less worm and root holes and cracks. The most plausible explanation why for the first horizon the constant-head method and the double ring infiltrometer, sampling an area of 19.6 and 705 cm<sup>2</sup>, respectively, yield about the same low value for the saturated hydraulic conductivity is probably due to the high soil water content of the soil prior to the double ring infiltrometer tests. Due to the vertic properties it is most likely that swelling closed the cracks and frasures, normally present in the top-soil.



The study also revealed that the distribution of the hydraulic conductivities measured on the 1st and 2nd horizon using the constant-head, double ring infiltrometer and the inversed auger-hole technique fits with 95% probability to an exponential distribution. Finally, for the soil of the experimental field, it can be concluded that the hydraulic conductivity measured on small Kopecky rings and the basic infiltration rate derived from the cumulative infiltration curve strongly under-

estimate the field average hydraulic conductivity of the top layer. For this layer the inversed auger-hole method and the field-border test yield comparable results. For the second, more compact, horizon all tested methods yield comparable values. The main advantage of the field-border test, with respect to the other tested methods, is that this method yields a complete picture of the field-scale infiltration and subsurface flow process.

## References

- Cisneros, F., E. Pacheco & J. Feyen, 1998. *Quantitative analysis of the performance of furrow irrigation in the Southern Sierra of Ecuador, on slopes steeper than 12%. Proceedings of the First Taller Internacional de Riego y Drenaje, AGROMECC'98, 13-17 July, Habana, Cuba.*
- Deckers, J. A., O.C. Spaargaren & F.O. Nachtergaele, 1998. *World Reference Base for Soil Resources. Acco Press, Leuven, Belgium, 168 pp.*
- De Bièvre, B., L. Timbe & J. Feyen, 1998. *Matching demand and supply in irrigation schemes using a D.I.S. Proceedings of the first Inter-Regional Conference on Environment Water: Innovative Issues in Irrigation and Drainage, ICID, 16-18 Sep., Lisbon, Portugal.*
- Dercon, G., B. Bossuyt, B. De Bièvre, F. Cisneros & J. Deckers, 1998. *Zonificación agroeco-*
- lógica del Austro-Ecuatoriano. PROMAS, Ediciones Universitarias, Cuenca, Ecuador, 148 pp.*
- Durner, W., 1995. *SHYFIT Users Manual, Research Report 94.1, University of Bayreuth, Dept. of Hydrology, Germany, 25 pp.*
- James, L. G., 1988. *Principles of farm irrigation system design. John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, Chapter 7, 350-351.*
- Richards, L. A. 1931. *Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics 1: 318-333.*
- Simunek, J., M. Šejna & M. Th. van Genuchten, 1996. *HYDRUS-2D Manual, Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media, U.S. Salinity Laboratory, USDA/ARS, 167 pp.*
- van Genuchten, M. Th., 1980. *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.*



# Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOP MODEL

## Palabras claves:

páramos, modelización hidrológica, andosols, cuencas de montaña.

## Resumen

El páramo es caracterizado por tener un clima frío y húmedo. Sus suelos volcánicos (Andosols) tienen una capacidad de retención de agua muy alta que amortigua la escorrentía, produciendo un patrón de caudales de las cuencas bastante uniforme, por lo que sirven como proveedores de agua para las depresiones andinas densamente pobladas.

Durante décadas el páramo fue un área utilizada para pastoreo. En años recientes, principalmente debido a la presión poblacional, las comunidades iniciaron el desarrollo del páramo con actividades agrícolas y existen algunas evidencias de que esta interferencia humana alteró la hidrología en algunas microcuencas.

Para entender mejor cómo el cambio del uso de tierras afecta a la hidrología de estas cuencas, el régimen hidrológico fue analizado usando TOPMODEL.

TOPMODEL fue aplicado en una microcuenca de páramo representativa de 2.65 km<sup>2</sup> de superficie. El modelo fue calibrado usando 15 meses de datos, obteniéndose un valor de 0.77 para el coeficiente de Nash y Sutcliffe, indicando que el modelo es capaz de simular relativamente bien la hidrología de la cuenca y que sus parámetros representan bastante bien la capacidad de amortiguamiento del suelo. Al cambiar los parámetros del modelo se puede, en principio, predecir el impacto de los cultivos sobre el patrón de escorrentía.

Se encontró que las mayores fuentes de incertidumbre del modelo son atribuidas a la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, a la dificultad de estimar la evapotranspiración y al desconocimiento de la contribución del rocío hacia la precipitación total.

W. Buytaert<sup>2</sup>

R. Céleri<sup>1</sup>

B. De Bièvre<sup>1,2</sup>

J. Deckers<sup>2</sup>

G. Wyseure<sup>2</sup>

1. Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS), Universidad de Cuenca, Cda. Universitaria, Av. 12 de Abril s/n y Av. Loja, Cuenca, Ecuador  
2. Laboratory for Soil and Water Management (LSWM), Katholieke Universiteit Leuven, Vital Decosterstraat 102, B-3000 Leuven, Belgium



### 1.1. Introducción

El abastecimiento de agua se está convirtiendo en un asunto de gran importancia económica y social en muchas partes del mundo. La región andina del sur del Ecuador, llamada Austro, no es particularmente una región seca, pero dado que la precipitación puede ser muy variable en espacio y tiempo, las inversiones en sistemas de abastecimiento de agua flexibles que puedan manejar períodos largos sin precipitación, actualmente son de gran importancia. Además, así como la demanda de agua se incrementa, también la confianza en el abastecimiento de agua está tomando mayor atención en áreas muy pobladas e industriales. El abastecimiento de agua depende completamente de las aguas superficiales que descienden del páramo, ya que prácticamente no existen aguas subterráneas. Esta fuente no solamente regula bien el agua a través de las estaciones, sino que también ofrece agua de buena calidad.

El páramo se describe comúnmente como la región alto andina que inicia aproximadamente a los 3300 m s.n.m. dependiendo de la ubicación geográfica (Hofstede, 1995; Dercon, 1998) y es caracterizada por tener un clima frío y húmedo. La vegetación consiste sobre todo en especies de pasto bajo y pequeños bosquetes de árboles de quinoa (Luteyn et al., 1992) los que son escasos. Mientras en cuencas montañosas tropicales el agua se almacena en la densa capa de vegetación (Marin et al., 2000), esta capa no existe en las cuencas de páramo. Sin embargo, esta falta de capacidad de amortiguamiento es largamente sobrepasada en el páramo por la capacidad de retención de agua de sus suelos con cenizas volcánicas que retienen hasta un 80% de volumen de agua en capacidad de campo, el doble que la capacidad de retención de suelos "comunes" (Buytaert et al., 2002; Poulénard et al., 2001), lo cual resulta en un patrón de escorrentía regulado. Esto se aprecia en la Figura 1, donde los círculos representan el contenido actual de agua del suelo y la línea continua el caudal. Aún luego de un período seco de dos meses (lo cual es raro en el páramo), el contenido de agua del suelo permanece elevado y el caudal de salida de la cuenca no se reduce significativamente, lo

cual indica la gran capacidad de amortiguamiento de la cuenca.

La influencia de los cambios de vegetación en la hidrología de una región se describen en la literatura (Bosh and Hewlett, 1982; Rowe et al., 1994), pero la influencia de los cambios en las propiedades del suelo sobre la hidrología es mucho menos conocido. Cambios recientes en el uso de tierras en el páramo han provocado la siembra de cultivos y alteración de los suelos del páramo. Como estos suelos son muy vulnerables a perder irreversiblemente su capacidad de retención de agua (Poulénard et al., 2001; Buytaert et al., 2002) se han levantado inquietudes con respecto a las consecuencias de estos cambios de uso de tierras sobre la capacidad de retención de agua del páramo.

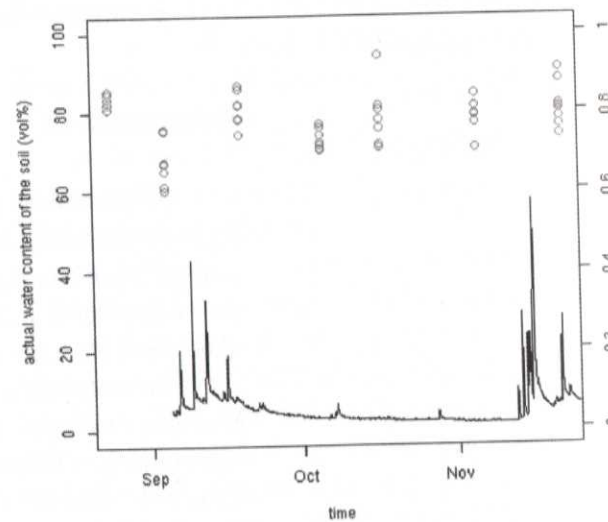


Figura 1: Relación entre el contenido de humedad del suelo y el caudal

Pocas investigaciones han estudiado la influencia de diferentes usos de tierras en las propiedades hidrológicas de suelos volcánicos del páramo ecuatoriano (Poulénard et al., 2001; Buytaert et al., 2002). Además, es muy difícil extrapolar los resultados de estas investigaciones realizadas a escala micro a la escala de la cuenca sin realizar una validación.

Para extrapolar los resultados de estas investigaciones hacia un escala de (micro) cuenca, en el presente estudio se ha utilizado una aproximación por modelización, en la cual se ha utilizado el

modelo lluvia – escorrentía TOPMODEL (Beven, 1995). La intención no es la de desarrollar un modelo predictivo confiable de la escorrentía de la cuenca, sino la de obtener un mejor conocimiento sobre los procesos físicos de la hidrología de cuencas utilizando procedimientos de sensibilidad y optimización del modelo. Ya que este es un proceso continuo, se han formulado varias recomendaciones para futuras investigaciones.

### 2. Materiales y métodos

#### 2.1. Datos de campo

Una microcuenca de 2.58 km<sup>2</sup> fue seleccionada en la cuenca del río Machángara ubicada al noreste de la ciudad de Cuenca al sur del Ecuador (figura 2). La cuenca ha sido monitoreada durante un año con 3 pluviógrafos electrónicos. Los caudales fueron medidos cada 30 minutos usando un vertedero con sección triangular y un sensor para medir el nivel del agua.

Un modelo digital de elevación con celdas de 20x20 m fue generado a partir de curvas de nivel. Valores de evapotranspiración fueron determinados con base a datos meteorológicos medidos en el páramo.

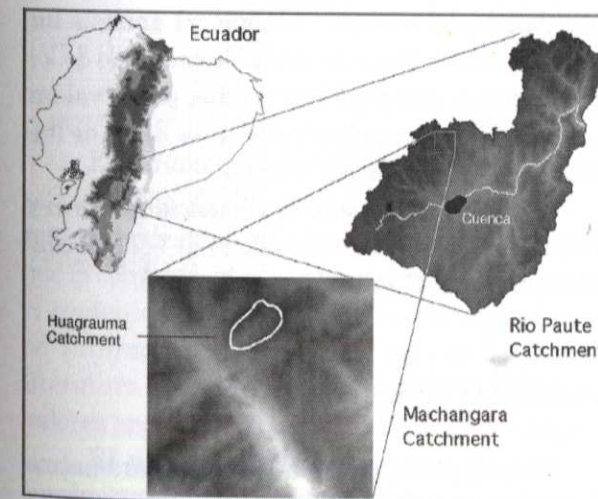


Figura 2: La cuenca Huagrauma.

#### 2.2. TOPMODEL

TOPMODEL (Beven, 1995) es una herramienta de modelización semi-distribuida y basada en procesos físicos que se fundamenta en el concepto del índice topográfico  $\ln(a/\tan b)$ , donde  $a$  es el área de drenaje hacia este punto de la cuenca y  $b$  la pendiente del terreno. Es una indicación de la susceptibilidad de ciertos puntos de la cuenca a saturarse completamente (figura 3) y por ello puede ser visto como un índice de similitud hidrológica. Los colores más claros de la figura representan una elevada susceptibilidad a saturarse.

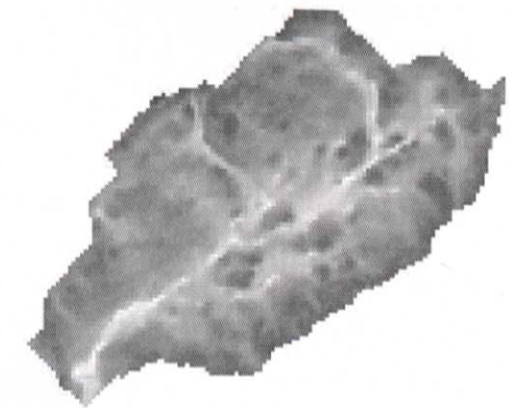


Figura 3: Mapa de Indices Topográficos

Este índice topográfico es calculado con el modelo digital de elevación. La distribución espacial del índice topográfico es combinada con la asunción de que la distribución de transmisividad pendiente abajo con la profundidad puede ser descrita como una función exponencial del déficit de almacenamiento.

$$T = T_0 \cdot \exp(-S/m)$$

El modelo asume una homogeneidad espacial de las propiedades del suelo en la cuenca y un comportamiento hidrológico similar de los puntos que tienen el mismo valor del índice topográfico. Los suelos de la cuenca son Andosols (FAO) con poca



profundidad mas o menos homogénea de 0.5 m, cubriendo roca madre metamórfica. Muestran una gran homogeneidad en características hidrofísicas (permeabilidad y capacidad de retención de agua). Experimentos de campo indican que la conductividad saturada de los suelos de páramo es generalmente alta (alrededor de 20mm/h). Sin embargo, al ya no estar saturado el suelo el movi-

miento del agua en el suelo se vuelve muy lento y cae rápidamente a cero para un pF igual a 1 (antes de llegar a capacidad de campo).

TOPMODEL usa el mapa de índices topográficos de la cuenca, una descripción de la red de drenaje y 5 parámetros que pueden ser optimizados utilizando simulaciones Monte Carlo (tabla 1).

**Tabla 1: Parámetros del TOPMODEL**

Parámetro	Descripción
m:	Parámetro del modelo
Chvel:	Velocidad del tránsito en el canal
TO:	Transmisividad lateral
SRmax:	déficit de almacenamiento máximo
SRinit:	déficit de almacenamiento inicial

Las simulaciones Monte Carlo (Beven, 2002) generan una gran cantidad de conjuntos de parámetros escogidos aleatoriamente dentro de un rango de parámetros determinados con anterioridad a partir de límites impuestos. Entonces el modelo se corre con cada juego de parámetros y su eficiencia es calculada. Este método exige mucho tiempo de formulación ya que son necesarias miles de simulaciones, pero tiene la ventaja de que puede revelar múltiples juegos de parámetros óptimos que no pueden ser detectados usando la clásica optimización de parámetros.

### 3. Resultados y discusión

La simulación hidrológica, sensibilidad de parámetros y optimización Monte Carlo fueron ejecutados para períodos consecutivos de 52 días. El juego de parámetros óptimos fue escogido de

acuerdo al valor más alto del coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (Beven, 2002). Luego de ello, los diferentes parámetros óptimos fueron analizados de acuerdo a su significado físico y a su dependencia del tiempo. Además, el análisis fue realizado con los datos de lluvia de cada uno de los 3 pluviógrafos independientemente, para evaluar la influencia de irregularidades de los datos de lluvia sobre la eficiencia del modelo.

El valor más alto de la eficiencia de Nash y Sutcliffe que puede ser obtenido es de 0.77, el cual representa una simulación satisfactoria.

#### Sensibilidad de los parámetros

SRmax y SRinit (tabla 1) son los parámetros menos sensibles ya que ellos no revelan ningún valor óptimo sobre el rango de posibles valores (figura 4).

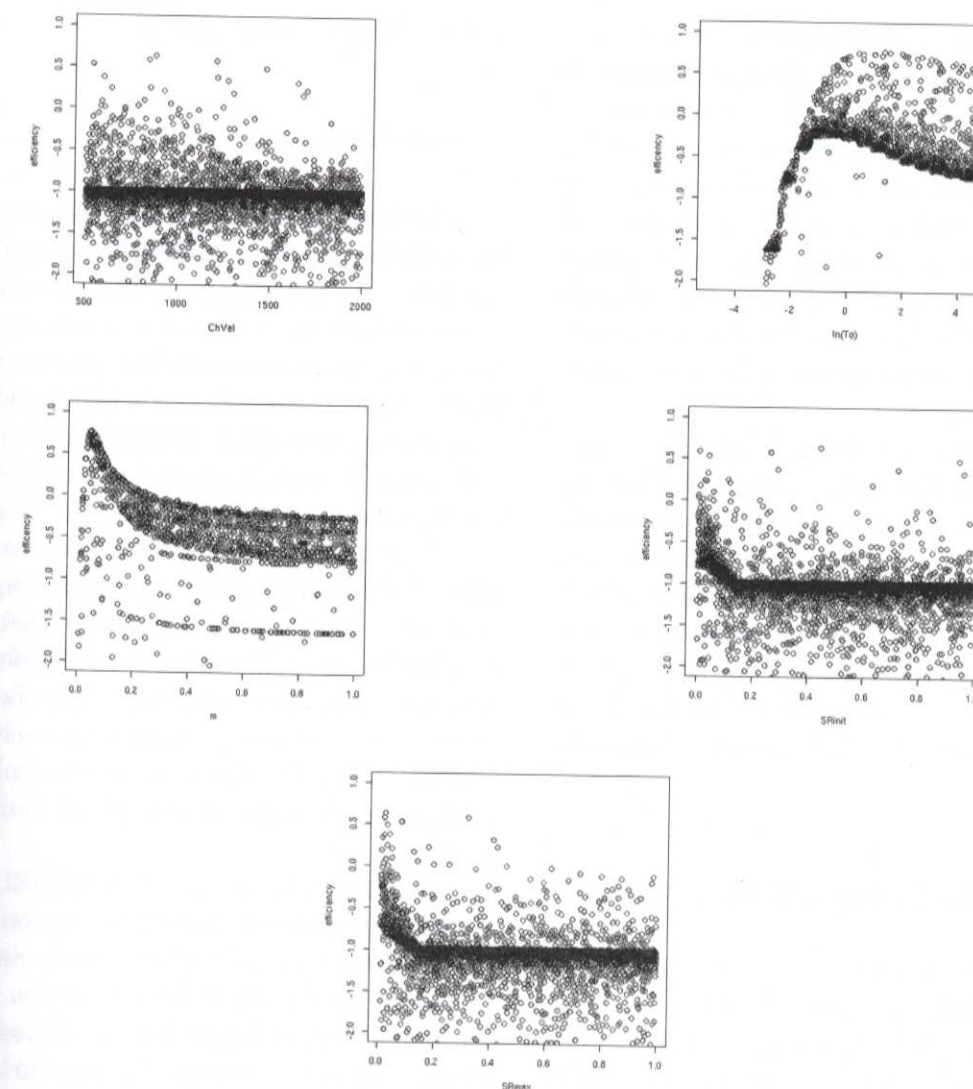


Figura 4: Valores optimizados de Monte Carlo para cada parámetro de TOPMODEL

El parámetro más sensible, m, representa la sensibilidad de la conductividad del suelo al contenido de agua. Un valor pequeño de m indica que la conductividad cae muy rápidamente cuando el contenido de humedad del suelo deja el punto de saturación. En general, valores de m en la literatura están alrededor de 0.02 y 0.05. Los valores encontrados caen dentro de este rango.

El parámetro To está relacionado con la conductividad hidráulica saturada del suelo. Experimentos de campo revelan una conductividad saturada promedio de 14.5 mm/h, variando entre 5 y 35 mm/h. La profundidad del suelo es de unos

0.5 m, así el logaritmo natural de la transmisividad puede ser calculado como:

$$\ln(Tb) = \ln(Ksat * d) = -4.93$$

Con límites entre -5.6 y -4.0. El modelo calcula valores de -3 a -0.15, cayendo fuera del rango de los valores de mediciones de campo. Por lo tanto el modelo indica que los experimentos y mediciones de campo (método de pozo invertido, método de tensiómetro-infiltrómetro, método del



núcleo de suelo) subestiman la conductividad hidráulica del suelo. Esto se debe probablemente a que existen caminos preferenciales de flujo en la estructura del suelo causados por macroporos y grietas, posiblemente en mayor medida en la interfase entre el suelo y la roca. Estas estructuras han sido observadas en varias ocasiones durante estudios de campo pero no son tomadas en cuenta en experimentos de conductividad a pequeña escala. Futuras investigaciones serán realizadas sobre este tema.

Finalmente, la velocidad del agua en los cauces es muy estable entre todas las diferentes simulaciones. Una velocidad de 750 m/h es muy lenta en comparación con las estimaciones de campo. Esto también indica que muy probablemente existe un tipo de "reservorio escondido", donde el agua es almacenada y que no está ni en la matriz de suelo ni en la red de drenaje, el cual se cree es fuertemente relacionado con las grietas y macroporos.

#### Influencia de los parámetros menos sensibles

Como TOPMODEL es un modelo hidrológico semi-distribuido, la variabilidad espacial es incorporada por medio de las diferentes clases de índice topográfico, pero el tránsito de caudales es manejado como un modelo agregado. Para mejorar el algoritmo de tránsito de caudales, la topografía de la cuenca puede ser dividida en diferentes módulos, cada uno con su propia distancia de viaje hacia la salida. Con el sistema de tránsito más realista la cuenca responde demasiado rápido. Una vez más, esto sugiere un reservorio entre el suelo y la escorrentía superficial, el cual no es tomado

en consideración por el modelo.

#### 4. Conclusiones

El desempeño de TOPMODEL para modelar pequeñas cuencas montañosas de páramo es satisfactoria. Los parámetros obtenidos son consistentes en el tiempo y tienen un sólido significado físico. Hay muchos argumentos para creer que a parte del almacenamiento en la matriz del suelo y el agua en escorrentía superficial existe un tercer "reservorio" que actúa como un regulador entre las dos fases.

Las mayores fuentes de incertidumbre son la variabilidad de la precipitación y la evapotranspiración. Estas están causando variaciones significantes en la eficiencia del modelo medida con el coeficiente de Nash y Sutcliffe. Por ello futuros estudios de campo serán concretados sobre estos asuntos. Un último factor de incertidumbre es la descripción adecuada del tránsito de caudales de la cuenca.

Se puede concluir que TOPMODEL modela adecuadamente la relación lluvia-escorrentía en el páramo. A través de la implementación del modelo se han generado inquietudes sobre los procesos físicos que se quieren describir con el modelo. Si el modelo todavía no predice bien la variación de caudales esto se debe a la falta de calidad en datos de ingreso (precipitación, evapotranspiración) y a un conocimiento incompleto de parte del modelador sobre los procesos físicos (en este caso flujo subsuperficial rápido). Se deben estudiar con profundidad estos últimos, con el fin de que se les puede incluir en la modelización.

#### 5. Referencias

• Beven K. J. 1995. TOPMODEL. En: Sing V. P. (ed.), Computer Models of Watershed Hydrology. Water resources Publications. Colorado. pp 627-668.

• Beven K. J. 2002. Rainfall-Runoff Modeling. Wiley, Chichester.

• Bosch J. M., Hewlett J. D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yields and evapotranspiration. Journal of Hydrology 55.

• Buytaert W., Deckers J., Dercon G., De Bievre B., Poesen J., Govers G. 2002. Impact of land use changes on the hydrological properties of volcanic ash soils in South Ecuador. Soil use and management 18.

• Dercon G., Bossuyt B., De Bièvre B., Cisneros F., Deckers J. 1998. Zonificación agroecológica del austro ecuatoriano. U Ediciones Cuenca, Ecuador

• Driessen P., Deckers J., Spaargaren O., Nachtergaele F. (eds.) 2001. Lecture notes on the major soils of the world. FAO, Rome

• Hofstede R. 1995. Effects of burning and grazing on a Colombian páramo ecosystem. PhD thesis. Universiteit van Amsterdam, Amsterdam

• Luteyn J. L. 1992. Páramos: why study them? Academic Press, New York.

• Marin C. T., Bouten I. W., Dekker S., 2000.

Forest floor water dynamics and root water uptake in four forest ecosystems in northwest Amazonia. Journal of Hydrology 237.

• Neter J., Kutner H. M., Nachtsheim C. J., Wasserman W. 1996. Applied Linear Statistical Models. Irwin, Chicago.

• Poulenard J., Podwojewski P., Janeau J.L., Collinet J., 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Ando soils from the Ecuadorian Páramo: effect of tillage and burning. Catena 45.

• Rowe L. K., Pearce A. J., O'Loughlin C. L., 1994. Hydrology and related changes after harvesting native forest catchments and establishing Pinus Radiata plantations. Part I. Introduction to study. Hydrological processes 8. pp. 263-279.





# Sección

**Aportes Sociales**







## Innovaciones comunitarias para el manejo y conservación de los recursos naturales y el mejoramiento de la calidad de vida: cambios y sostenibilidad

P. Carpio<sup>1</sup>  
M. Falconí<sup>1</sup>  
E. Toledo<sup>1</sup>

### Resumen

La presente sistematización se refiere a la experiencia en Ecuador del Programa de Pequeñas Donaciones -PPD- del Fondo para el Medio Ambiente Mundial -FMAM- cuyos proyectos a escala comunitaria buscan la conservación y uso sustentable de los recursos naturales articulando factores sociales y económicos como soporte para la participación comunitaria.

Nuestro trabajo se ha centrado en la identificación de los factores que potencian u obstaculizan cambios sostenibles en los procesos desencadenados por los proyectos PPD para lo cual analizamos al proceso de intervención, a los protagonistas y sus perspectivas y los resultados e impactos obtenidos; al final presentamos algunas lecciones que consideramos necesarias para el ejercicio de la sostenibilidad.

El punto central al que llegamos es que los proyectos PPD logran significativos avances en la potenciación de capacidades locales para la gestión ambiental comunitaria en Ecuador, pero para que estas iniciativas se conviertan en procesos de desarrollo sostenible se requiere mayor profundidad en aspectos claves como la viabilidad económica de los emprendimientos, bases organizacionales mejor definidas, soportes institucionales y redes que faciliten la continuidad, elementos que deben estar articulados desde un inicio y con claro entendimiento de las partes involucradas. La tarea pendiente en estas experiencias es entonces transitar de proyectos a procesos.

### Palabras clave:

Gestión ambiental, Biodiversidad, Calidad de vida, Acciones colectivas, Sostenibilidad, Proyectos / procesos, Organización, Viabilidad económica.

1. Oficina de  
Investigaciones Sociales y  
del Desarrollo (OFIS)  
Casilla 01.01.999  
Cuenca - Ecuador  
Fax (593 7) 2829082  
[ofis@etapaonline.net.ec](mailto:ofis@etapaonline.net.ec)



## Metodología

La metodología que utilizamos para desarrollar el proyecto es la de Sistematización de Experiencias (de la experiencia al aprendizaje), lo cual implica un proceso de reconstrucción de la experiencia vivida con los actores de la misma y de reflexión sistemática sobre el proceso para extraer los aprendizajes y las lecciones. La secuencia lógica que hemos seguido es entrar por el análisis de actores (auspiciantes, comunidades y ONGs fundamentalmente); la participación y los roles de cada uno en el proceso de gestión y, el análisis de impactos y conclusiones como se explica más adelante en el acápite "Que sistematizamos?".

Los ejes temáticos que abordamos son los aspectos ambientales, sociales y económicos que giran alrededor de la experiencia de los proyectos sistematizados, de esta manera se cubrieron los enfoques transversales y estrategias operativas del Programa de Pequeñas Donaciones del PNUD-FMAM que rigen para su aprobación y ejecución, las cuales en detalle son las siguientes:

- Manejo y conservación de los recursos naturales y tecnología propuesta
- Organización y participación
- Igualdad de oportunidades
- Viabilidad económica de las propuestas
- Capacitación, educación y diálogo de saberes
- Alianzas entre actores
- Acompañamiento técnico

Operativamente se seleccionaron diez proyectos que habían concluido entre dos y cinco años antes utilizando algunos criterios geográficos, ambientales y sociales. De esta selección, se ubicaron diez proyectos, de los cuales se recabó toda la información documental existente: documento proyecto inicial, informes trimestrales tanto internos como externos de evaluación e informe final, todos dentro del marco de procedimientos institucionales. Adicionalmente se consultó informes de talleres de intercambios de experiencias e informes de consultorías sobre el proceso que normalmente implementa el PPD.

A nivel de campo, recorrimos 4.500 Km. visitando las comunidades seleccionadas y entrevistando a informantes claves tanto individualmente como en grupos focales con guías semi estructuradas alrededor de los ejes claves ya definidos. Las conclusiones de la información secundaria y de campo, las presentamos en un taller nacional en Quito, el 12 y 13 de diciembre con la participación de técnicos de ONGs responsables de la asistencia técnica, con dirigentes de las comunidades que estuvieron al frente de los proyectos y con personal ejecutivo del PPD.

Un primer informe final se distribuyó entre el Comité Directivo Nacional del PPD (conformado por especialistas en el tema ambiental del Ecuador) ONGs y dirigentes comunitarios. Con sus observaciones, se redactó la versión final que ahora se presenta.

## 1. ¿Qué sistematizamos?

La sistematización que presentamos "*Innovaciones comunitarias para el manejo y conservación de los recursos naturales y el mejoramiento de la calidad de vida: cambios y sostenibilidad*" se refiere a la experiencia en Ecuador del Programa de Pequeñas Donaciones -PPD- del Fondo para el Medio Ambiente Mundial -FMAM- el cual tiene como objetivo promover iniciativas locales para la conservación y uso sustentable de los recursos naturales a través de un fondo competitivo dirigido a comunidades, organizaciones rurales y Organizaciones No Gubernamentales.

Bajo este mecanismo, el PPD ha desarrollado en el país alrededor de cien proyectos en ocho años involucrando a más de trescientas comunidades campesinas y miles de familias bajo el eje de conservación de los recursos naturales y específicamente en el manejo de biodiversidad. Nuestra sistematización aborda una muestra de 10 proyectos.

La sistematización tiene como eje el análisis de las acciones colectivas emprendidas por organizaciones comunitarias en los marcos de los proyectos PPD identificando los factores que potencian u obstaculizan cambios sostenibles en la perspectiva de su desarrollo. Los conceptos claves que

guían la sistematización son: *acciones colectivas, calidad de vida y sostenibilidad*.

El concepto de acciones colectivas lo asumimos dentro de procesos socio organizativos de comunidades rurales; la calidad de vida como un concepto dinámico que va más allá de los aspectos económicos y considera elementos objetivos y subjetivos, tangibles e intangibles en contextos culturales e históricos determinados (Levi y Anderson, 1980) y la sostenibilidad como la continuidad de las acciones emprendidas por dichas organizaciones, hasta lograr procesos que impliquen cambios de largo aliento en la perspectiva del desarrollo para lo cual es indispensable la articulación de aspectos económicos, sociales y ambientales. (Berdegué et al., 2000).

## 2. El proceso de intervención

### Los actores

Los actores sociales participantes en la experiencia PPD, son las organizaciones comunitarias de base, el propio PPD y ONGs ambientalistas y de desarrollo. Indirectamente participaron gobiernos locales, universidades, instituciones privadas y empresarios. Nuestro estudio está focalizado en las comunidades y en el programa PPD quienes representan la columna vertebral de este proceso.

Las comunidades agrarias involucradas constituyen un conjunto heterogéneo de formaciones socio económicas y culturales, pues allí están comunidades indígenas y mestizas de la sierra, una comunidad de pescadores costeros y varias comunidades de la vertiente occidental de los andes; el aspecto común a todas es que están inmersas en una situación de pobreza que en el Ecuador asciende al 80% de la población rural.

La problemática que esta sistematización aborda, es la relación que estas comunidades han establecido con los ecosistemas y con sus recursos naturales. En este escenario, el PPD es un fondo de Naciones Unidas que actúa como una bisagra que intenta articular las aspiraciones de las comunidades con su propuesta de reversión de la situación socio ambiental en el Ecuador, a través del

manejo y conservación de la biodiversidad, mediante el apoyo a pequeños proyectos. Así, los recursos económicos asignados deben entenderse como "fondo semilla", pues el alcance de la gestión de cada proyecto es de dos años y el monto de 50.000 dólares. En este lapso se espera contribuir al fortalecimiento y desarrollo de capacidades locales para que en el seno de la intervención inicial se fermenten nuevas iniciativas tendientes a superar las condiciones de pobreza y las prácticas depredadoras contra el medio ambiente.

### El punto de partida: las expectativas diferenciadas de los actores

La característica básica de las acciones colectivas impulsadas desde el PPD es que representan "puntos de contacto", "chispas iniciales", para despertar y fomentar nuevas dinámicas comunitarias que apunten al descubrimiento y conservación de los recursos naturales existentes en el entorno comunitario.

La pregunta inicial que nos hemos planteado con los actores de este proceso es ¿quién toma la iniciativa para involucrarse en los proyectos?, buscando respuestas que nos den pautas de explicación del nivel de movilización social. Es aceptado que en procesos de desarrollo local, la iniciativa de los actores locales es la matriz para desencadenar nuevas dinámicas territoriales (DelNet, 2002), lo cual en nuestro caso es valedero, pues si la población local no hubiese asumido los proyectos bajo su gestión, no habrían ningún tipo de resultados.

La situación inicial es que desde la financiera existe una oferta de financiamiento para determinado tipo de proyectos, que deben cumplir una serie de requisitos según procedimientos preestablecidos, y por otro lado, desde las comunidades existe un variado ámbito de problemas que no siempre coinciden con las ofertas del organismo financiador. Frente a una convocatoria pública, generalmente los líderes comunitarios y ONGs de apoyo, deciden responder y con grupos de interés organizados o que se organizan para ello levantan una propuesta que se ajuste a los términos de referencia institucionales y a un segmento de sus



expectativas básicas, he allí el “arreglo y adecuación” de intereses.

Las acciones colectivas impulsadas por las agencias de desarrollo deben pasar por algunos filtros internos comunitarios para ser viables, pues las prioridades locales no están siempre ajustadas a la visión institucional, y en nuestro caso la conservación ambiental no constituye el motor de la lucha por la sobre vivencia comunitaria. La aspiración sentida de los actores en los diez proyectos sistematizados es encontrar un soporte para sus actividades productivas en un horizonte de rentabilidad económica y visibilización social. Así, en la estrategia de las comunidades se evidencia la búsqueda en última instancia de mejores condiciones de vida, beneficios económicos familiares, trabajo, sustento, por ello se involucran y participan aun cuando los planteamientos de índole ambiental no les resulten claros y los objetivos del PPD les parezcan inicialmente, lejanos.

*“... a veces la gente pensaba que con estos proyectos, en 5 años desde que comenzamos, todo el mundo iba a tener trabajo y que todo estaba listo; pero en la práctica no es eso, todo el mundo tiene que poner sus capacidades, sus habilidades, su tiempo para poder en este caso obtener sus ingresos ... la gente a lo mejor tuvo un poco más de expectativas al creer que estos proyectos van a satisfacer sus necesidades para mañana, esto no es para mañana pero sí puede ser para pasado mañana. Es parte de un proceso” (German Collahuazo - Yunguilla)*

El articular estas perspectivas ha sido quizá el mayor reto de este programa, pues ha implicado ejercicios de reflexión colectiva que han logrado empatar de manera inteligente las prioridades de las familias con los aspectos ambientales enfocados por el PPD; en esta tarea han jugado un importante papel las ONGs de apoyo técnico que han realizado un trabajo de intermediación con el apoyo de los líderes comunitarios.

El resultado final de estas iniciativas es que las organizaciones participantes capitalizan un

conjunto de beneficios tangibles e intangibles, y el programa logra que el tema de los recursos naturales, pase a constituirse en agenda comunitaria y se detenga su degradación. ¿Hasta donde son sostenibles estos resultados?, es el tema del capítulo final de esta sistematización.

### La gestión de proyectos

Las dinámicas generadas son diversas según los procesos históricos y las experiencias de las comunidades involucradas. En el caso de las organizaciones indígenas cuya práctica de acciones colectivas es ancestral y está regulada por derechos y obligaciones, el proyecto es parte de procesos ya instituidos contribuyendo con el tema ambiental a su propia agenda de desarrollo.

En las comunidades mestizas, el 60% de los proyectos asoman como el motor organizativo y el centro de atención constituyendo además su primera experiencia en este campo; en todos estos casos son las ONGs con líderes comunitarios, quienes promovieron la idea, armaron la propuesta y la gestionaron. Se evidencia sin embargo, una conjugación de intereses por parte de los grupos participantes a quienes les anima fundamentalmente la novedad de la propuesta en términos de generar nuevas oportunidades para sus vidas.

Los grupos específicos se conformaron alrededor de la valoración del recurso a conservar y de las expectativas económicas que podrían generar. Las actividades previstas para el mejoramiento de los cultivos fueron responsabilidad de cada agricultor y su familia; la asistencia técnica se desarrolló tanto a nivel grupal como en terreno con los agricultores y son ellos quienes asumieron la responsabilidad de aplicar nuevas técnicas agroforestales o silvopasturas, de manejo y conservación de suelos y fertilización orgánica, de selección de semillas y seguimiento de cultivos andinos.

En todos los proyectos se generó una alta participación en actividades de ejecución, capacitación, seguimiento y evaluación, que despertaron motivación y actitudes de solidaridad entre las familias.

## 3. Análisis de impactos y sostenibilidad

### Impactos Ambientales

En el ámbito ambiental es quizá donde mayores realizaciones ha logrado este proceso, pues aquí se concentran los objetivos inmediatos del programa. Aunque inicialmente los temas ambientales no se ubican en el primer orden de prioridades comunitarias, es en el proceso de ejecución en donde la población se involucra; este cambio de actitud progresiva se explica por varios factores, entre los que resalta el marco establecido por los objetivos que el proyecto debe cumplir, que se vuelven responsabilidad tanto de los dirigentes, como las ONGs co ejecutoras, técnicos y el PPD a través de las organizaciones de monitoreo y evaluación.

### Impactos Generales

Partiendo de que el PPD se ha planteado como reto “iniciar procesos sustentables de manejo y conservación de la biodiversidad existente, impulsando nuevas formas de entendimiento de las comunidades con la naturaleza y su biodiversidad” (Carpio et al., 2001), se puede asegurar que este propósito ha sido alcanzado en todos los proyectos; la riqueza biológica representada en los ecosistemas y la diversidad de especies y genética ha logrado mantenerse o incrementarse mediante la conservación, protección y/o manejo de los recursos naturales, a través de la valoración y creación de conciencia ambiental, principalmente a base de la capacitación.

*“Antes de que vinieran, se seguía talando el manglar y no solamente ellos, las camaronerías, sino la misma comunidad talaba para llevar madera y nadie sabía lo valioso que era, hasta que lo hicieran conocer porque desde ahí pararon y hoy, seguimos luchando, conservando” (Washington Saltos - Manglar La Boca)*

La conservación y manejo de los recursos naturales, si bien no ha contribuido a mejorar los ingresos económicos de la población, ha influenciado en la diversificación y mejoramiento de la dieta alimentaria, la protección de las fuentes hídricas utilizadas para consumo humano y de riego, mejoramiento de la fertilidad y conservación de suelos, reducción de talas y quemadas indiscriminadas, disminución en la caza y pesca ilegal y recuperación e incremento de la biodiversidad andina.

Otro impacto común alcanzado, es que todos los proyectos han despertado a nuevas iniciativas productivas sustentables como el rescate de especies no maderables y su propagación y el aprovechamiento de plantas ornamentales, medicinales, y fibras vegetales así como en ecoturismo, alternativas que no ponen en riesgo los recursos naturales.

*“Hemos seguido con los trabajos ya con nuestros propios esfuerzos, nos prestaron el dinero que genera el ecoturismo y nos pusimos esta tiendita que es de las mujeres ... nosotras tenemos que seguir adelante y poner la fábrica de mermeladas, también un grupo de jóvenes está poniendo la fábrica de lácteos, eso es como seguir para el futuro, igual nosotros queremos tener para el futuro un buen mercado...” (Matilde Sánchez - Yunguilla)*

Un impacto generalizado es la búsqueda de control y manejo territorial, aquí los proyectos trabajaron en base a un ordenamiento de las fincas con criterios agroecológicos, o desde pequeños espacios de páramo o bosque y desde allí se expandieron hasta espacios más amplios como la comunidad o áreas comunales.

*“El bosque Sural tiene una importancia considerable, primeramente por encontrarse en un lugar no muy cercano, está en un lugar donde forma parte de un gran biocorredor, entonces tener ese bosque ahí permite expandir la información, algunas*



*técnicas del manejo de los bosques, de los cultivos y no causar mas impactos. La ubicación geográfica en esa cuenca del Chacayacu tiene una importancia realmente que no podríamos calcular, incluso en una forma indirecta estamos protegiendo todo lo que son las aguas que bajan a la costa"* (Carlos Quizhpe - Fundación Molleturo)

### Impactos Específicos

En el caso de los impactos específicos, estos se relacionan con las características y énfasis que tuvo cada proyecto debido a su ubicación en un ecosistema determinado y al recurso natural que se propusieron manejar, a la cultura del grupo o a la experiencia de las ONGs que apoyaron técnicamente la ejecución.

Cuatro de los diez proyectos han logrado conocer y valorar la biodiversidad existente a través de la investigación, mediante estudios, inventarios o listados de flora y fauna, los mismos que se han convertido en una oportunidad para las comunidades, quienes a través de éstos promocionan la riqueza de sus áreas (Yunguilla, Manta Real, Sural, Cumandá).

En lo tecnológico, los proyectos PPD han permitido probar "nuevas tecnologías" con el objetivo de contribuir a la sustentabilidad de los recursos naturales, como es el caso de la Agroforestería, Agroecología, Forestería Análoga, las mismas que al garantizar resultados a largo plazo disminuyen las expectativas de explotación a corto y mediano plazo.

Muchos proyectos también han contribuido a formar y capacitar a técnicos/as locales, que son hoy promotores de nuevas ideas de gestión ambiental e impulsan a su localidad para que los procesos continúen, multiplicadores además las propuestas trabajadas con el PPD.

*"... estoy trabajando como extensionista para las comunidades donde se están haciendo réplicas de la experiencia de Yunguilla, coordinando con otras comunidades, enseñando lo que hay acá, lo*

*que he aprendido y lo que acá se hace, y a nivel personal también me ha servido de mucho la capacitación"* (José Collahuazo - Yunguilla).

Por otra parte, se han encontrado limitantes y problemas que han obstaculizado o impedido el alcance de los impactos esperados; así se encuentran igualmente limitantes internos y limitantes externos a los proyectos.

Entre los limitantes internos están:

El hecho de ser un fondo semilla que "está encaminado a tratar problemas ambientales globales mediante aportes económicos de pequeña escala", produce un impacto dentro de un área de influencia muy limitada, lo que no ha permitido incidir en las políticas ambientales.

Los conocimientos o prácticas positivas tradicionales o locales no han logrado ser rescatados o revalorados en todos los proyectos, mas bien se han manejado y se han difundido las tecnologías anteriormente indicadas, que si bien pueden garantizar una sustentabilidad a largo plazo, al no tener seguimiento y continuidad y no haber logrado articularse a iniciativas locales, regionales o nacionales tienden a su desaparición paulatina.

Los proyectos que trabajan en el rescate de la agrobiodiversidad se ha encontrado con limitaciones prácticas, las familias luego del rescate de muchas variedades de semillas nativas, para los siguientes períodos de cultivo no siembran todas las semillas "rescatadas", sino optan por las que han logrado mejor adaptación y menor trabajo, produciéndose nuevamente una pérdida de variedades nativas.

Cuando nos referimos al tema de la agrobiodiversidad, los productos andinos que se recuperan (ocas, mashua, mellocos, etc) tienen un valor para la genética y en términos relativos para la seguridad alimentaria familiar, pero no poseen viabilidad en el mercado por los cambios en los patrones de consumo, lo que ocasiona su pérdida paulatina. Al respecto merece profundizarse la lógica de las familias en la selección y recuperación de estas semillas, cuyos resultados nos darían las pautas para el desarrollo de este tema.

*"No se pensaba para el mercado, porque por ejemplo si queremos promover la producción de ocas en gran escala, no hay mercado y ahora menos que el mercado está copado de todo lo que viene de afuera. Nuestros productos no pueden competir en ese mercado"* (César Pilataxi - Comuna San Pablo Urco).

Limitantes de naturaleza externa son las diferencias entre los discursos institucionales y comunitarios, en ellos se reflejan las prioridades que cada uno le asigna al tema del desarrollo, pero también el uso de conceptos que desde la perspectiva técnica tienen significados precisos, pero que no empatan con las concepciones de las comunidades, sobre todo indígenas, que poseen cosmovisiones mucho más amplias. Conceptos como "biodiversidad" o "ecosistema", no han podido ser entendidos e interiorizados en todos los ámbitos, ya que dependen de la cultura de cada pueblo.

*"... tal vez lo que no se logró profundizar muchísimo fue el tema de la biodiversidad, porque como concepto, posiblemente como siempre nos forman como técnicos hablamos a la gente de biodiversidad un poco desde los conceptos que han desarrollado afuera, queriendo aquí introducir y no hablamos en un lenguaje más común, que la gente entiende. Posiblemente eso fue uno de los elementos que limitó para que cause mayor impacto en la gente"*. (César Pilataxi - Comuna San Pablo Urco).

Otro limitante generalizado, es la ausencia de una perspectiva de largo plazo en la gestión de los recursos naturales, pues luego de concluidos los proyectos, los ejecutores no mantienen el vínculo con las organizaciones que acompañaron los proyectos y con el mismo PPD. Esto determina que los logros obtenidos queden en cierta incertidumbre si no existe alguna gestión interna o externa que las involucre en procesos mayores.

Existen otros problemas estructurales que no favorecen la sostenibilidad y sobre los cuales no se puede lograr incidencias significativas desde la comunidad o un proyecto estos son el mercado, el

minifundio y la migración.

"... en este país estamos sí sintiendo desesperación y continuamos con la migración, a lo mejor se nos acaba la paciencia o todo ese empuje, porque toda la dinámica de la comunidad se ve afectada directamente por estos problemas externos. Hasta el momento no hemos tenido muchos migrantes de acá de la comunidad, han habido unos dos o tres que incluso se fueron a España, pero la mayoría estamos acá, inclusive ni a la ciudad no han salido. Pero de aquí a dos años si es que sigue así tan desesperante la cuestión, a lo mejor los guías, los jóvenes nos digan "vámonos al exterior" porque aquí nos vamos a morir de hambre, eso es más complicado. Por eso yo creo que el tema de sustentabilidad no se puede decir hacia el futuro, nosotros estamos haciendo todo lo posible para que así sea, pero no se puede decir con certeza si va a ser sustentable" (Germán Collahuazo - Yunguilla).

### Impactos Socio-organizacionales

Los proyectos apoyados por el PPD han tenido una influencia directa en el fortalecimiento de las organizaciones sociales, pues es política institucional y línea estratégica del programa promover acciones colectivas a través de organizaciones las mismas que pueden ser organizaciones consolidadas y de amplia trayectoria; organizaciones de base que están en proceso de crecimiento, o también organizaciones conformadas precisamente con la expectativa del proyecto.

Esta influencia se expresa en el crecimiento cuantitativo y cualitativo de las mismas, la dinamización de sus estructuras, la creación de nuevas organizaciones, la adquisición de reconocimiento social, el mejoramiento de sus conocimientos y capacidades de gestión y el apoyo al surgimiento o consolidación de liderazgos. Adicionalmente, se logró introducir en la agenda de las organizaciones



la preocupación ambiental como eje de nuevas iniciativas.

*"No tanto fue capacitar a la parte direccional, sino más bien los mecanismos de trabajo, de planificación, permitieron hacer como una política de trabajo de la comunidad y eso se fue consolidando en cada organización. en cada sector denominamos aquí, fue estructurándose una política organizativa y estableciéndose directivas sólidas y la directiva central quedó fortalecida". (César Pilataxi - Comuna San Pablo Urco).*

La conflictividad social subyacente a toda colectividad humana aparece como otra constante en estos procesos de ahí que no todos los logros organizativos se mantuvieron luego de finalizado el proyecto, en unos casos -sobre todo en aquellas organizaciones que se conformaron para el proyecto- se iniciaron una serie de conflictos debido al surgimiento de grupos que se disputaron el derecho sobre el recurso natural o la posesión de los bienes adquiridos e infraestructura construida por el proyecto.

Los comportamientos diferenciados de las organizaciones y su desenvolvimiento posterior a la conclusión del proyecto, parecerían indicarnos que existen mayores posibilidades de éxito y sostenibilidad cuando los proyectos se insertan en procesos mayores o cuando son el inicio de procesos que sobrepasan las metas y compromisos del proyecto, para lo cual es necesario que éste haya desarrollado la capacidad de involucrar no sólo a la organización sino a la comunidad y a otros agentes del desarrollo.

Aquí hay que resaltar los niveles de autonomía que han alcanzado estas organizaciones, así, organizaciones mayores manejaron los proyectos directamente sin apoyo de ONGs (Sural, San Pablo Urco, Sisid) capitalizando para sí aprendizajes decisivos en la gestión de proyectos y del desarrollo local; las demás avanzaron al ritmo de los enfoques y prácticas participativas de las ONGs que las auspiciaron, así, aquellas experiencias que con-

tinúan trabajando son precisamente las que han tenido un apoyo técnico con visión de sostenibilidad y que han intentado generar capacidades instaladas desde el principio.

*"Si bien desde un inicio Maquipucuna era la que hacía todo, luego ya los técnicos poco a poco nos han ido soltando para que hagamos las cosas, eso estaba bien porque al inicio se manejó una dependencia de la comunidad a lo que es la ONG, e inclusive cuando queríamos cortar un palo o hacer una reunión teníamos que preguntar a la ONG, pero ahora nos hemos soltado completamente y somos independientes en el buen sentido de la palabra". (Germán Collahuazo - Yunguilla)*

Impacto novedoso es la perspectiva político-territorial que están asumiendo las organizaciones sobre todo aquellas de segundo grado, con el antecedente del fortalecimiento del movimiento indígena y campesino en Ecuador. La visión territorial en las acciones colectivas tiene particular relevancia en la medida que implica el fortalecimiento de las identidades locales a partir de una apropiación y valoración del entorno natural, el crecimiento y visibilización de las actorías sociales populares en la escala local, y la búsqueda de espacios de participación social y política.

*"... se ha logrado fortalecer cada uno de los territorios geográficos, como es una comunidad tan grande está organizada en directivas, pero al mismo tiempo se ha logrado fortalecer la estructura del gobierno central comunitario como nosotros lo denominamos, esa es una de las riquezas, fortalezas o resultados que ha dejado el proyecto". (César Pilataxi - Comuna San Pablo Urco)*

### Concertación con actores

En todas las experiencias, la capacidad de

concertación y gestión con otros actores se ha desarrollado y para ello ha contribuido la lógica del programa PPD, pues conservar un recurso natural implica conflictos con aquellas personas o grupos (comunitarios o externos) que lucran de él. En esta lucha, las organizaciones y comunidades han tenido que enfrentarse -con buenos resultados- a actores sociales con poder, estableciendo nuevas reglas del juego en las tradicionales relaciones de inequidad de clase o étnica. Este es el caso de proyectos como La Boca (comunidad-camaroneros) y Yunguilla (comunidad-hacendados).

*"Con los camaroneros ahora ya somos amigos, ya no nos hacen problema porque en una reunión reconocieron que el Manglar era parte de la comunidad, sino que antes no había quién defendiera. Al principio fue problema pero ellos reconocieron que estaba protegido por tantas organizaciones". (Editha Cabañas - Manglar La Boca)*

La dinámica de los proyectos ha hecho que las organizaciones y comunidades se relacionen además con actores muy diversos, sobre todo instituciones de desarrollo (Consejo Provincial, Municipalidad, Ministerio del Ambiente, Escuelas, Universidades, ONGs, etc.), a fin de conseguir apoyo para actividades del proyecto u otras de desarrollo comunitario.

Las debilidades encontradas al respecto dan cuenta de que el ejercicio de concertación se ha limitado al diálogo o la elaboración de convenios, de mucha fragilidad en la medida que no se han equiparado las relaciones de poder. Además, los proyectos no han avanzado a plantearse otro tipo de relaciones con los actores -sobre todo con los gobiernos locales- que apunten a la construcción de políticas públicas locales y nacionales.

Esta nueva modalidad de relacionamiento implicaría un avance en las visiones y retos de las organizaciones y un requerimiento importante en el tema de la sostenibilidad, pues los procesos tendrán mayor viabilidad en la medida que existan mejores condiciones sociales, políticas, legales e institucionales.

### Conocimientos, saberes e información

La adquisición de nuevos conocimientos, el desarrollo de capacidades y destrezas y el renacer de la "conciencia ambiental" a través de la información, capacitación y prácticas del proyecto, es uno de los mayores aportes "intangibles" de los proyectos PPD. Existen sin embargo diferentes niveles de aprendizaje, apropiación e involucramiento que dependen del contexto socio-económico y la trayectoria de la organización.

Este logro es desde nuestro punto de vista, uno de los puntales para la generación de procesos sostenibles, en la medida que todo lo que se aprende e interioriza en las personas y los colectivos sociales pasa a modificar prácticas culturales y en este caso a crear un nuevo tipo de cultura ambiental. Otro aporte es que se ha producido una réplica y difusión de estos conocimientos a personas de las comunidades no directamente involucradas en el proyecto, a otras comunidades y a nuevas generaciones. Finalmente este es un capital humano y social que no se pierde con la salida del proyecto o la falta de financiamiento.

*"El logro más grande que hemos conseguido nosotros es la capacitación, porque la mayoría estamos capacitados, sabemos lo que nos cuesta y lo que tenemos en el bosque...". (Nube Parra - Manta Real)*

Es necesario advertir sin embargo que esta condición de sostenibilidad pelagra si no pasa a formar parte de un sistema interrelacionado, así, el temor de muchas comunidades y organizaciones es que si se ahonda la crisis económica las personas capacitadas migren o que la gente se vea obligada a regresar a sus viejas prácticas depredatorias.

### Autoestima, autonomía y empoderamiento

Los testimonios de los/as entrevistados dan cuenta del aumento de la autoestima, el logro de mayor autonomía individual -sobre todo de las



mujeres- y el impulso al empoderamiento, este último más complejo en la medida que supone procesos de cambio y adquisición de poder tanto a nivel individual como colectivo.

Efectivamente, el desarrollo de los proyectos con sus logros y limitaciones, no sólo ha tenido impactos de tipo organizativo y comunitario, sino también de tipo personal, de ahí que consideramos que una visión de sostenibilidad debe reflexionar también sobre la influencia de los proyectos en la parte individual y subjetiva de los/as participantes y en sus relaciones cercanas y primigenias.

*"Antes nos decían a nosotros los yumbos, que somos del monte, que no saben nada, ni sirven para nada, pero cuando vienen los turistas, pasamos por Calacali y saben que la comunidad ha participado, ven que la gente se ha educado, que ahora es mas suelta, tiene autoestima, mientras antes teníamos problemas hasta de alzar la voz, ahora tranquilamente, mientras antes nos decían ¿de dónde eres?, nosotros queríamos decir de Quito y ahora decimos de Yunguilla". (Germán Collahuazo - Yunguilla)*

Los logros alcanzados son una consecuencia fundamentalmente del trabajo realizado a nivel organizativo o de acciones colectivas, sustentadas en las metodologías participativas impulsadas por el PPD y por las ONGs coejecutoras y las ONGs de monitoreo, cuyo rol es garantizar el involucramiento de la población en los procesos. Sin embargo, temas como la autoestima, autonomía y empoderamiento desde el nivel personal -que constituyen puntos claves para que los cambios logrados puedan mantenerse en el tiempo- no se trabajan con la profundidad que requieren.

### Equidad social y genero

La incorporación del enfoque de género ha sido impulsado por el programa con fuerza tanto desde una perspectiva estructural, esto es la pre-va- le- cencia de prácticas machistas y excluyentes de

la mujer en la gestión del desarrollo, como operativamente en los proyectos.

En este sentido, los logros obtenidos se expresan en la mayor participación de las mujeres en la organización, el rescate y la valoración de su palabra, el desarrollo de destrezas, conocimientos y capacidades, el surgimiento de organizaciones de mujeres y su presencia en algunos espacios de liderazgo o poder. Un aporte significativo de estos proyectos es haber puesto en la agenda comunitaria y de las organizaciones el tema y además crear las condiciones para su desarrollo, de ahí que el impulso a la participación y organización de mujeres ha permitido que ellas puedan tener espacios propios para el encuentro que les permiten articular sus intereses particulares y colectivos como mujeres y a su vez incrementar el "capital social" de las mujeres.

*"Las mujeres en el cantón Sosoranga son el punto de referencia, son conocidas como las molineras porque procesan café, ellas participan activamente en las reuniones, hace 3 o 4 meses la municipalidad emprendió una reformulación de su Plan de Desarrollo y las compañeras de la Asociación fueron invitadas a integrar las cuatro mesas temáticas..." (Sergio Abad - Tambo Negro)*

Este proceso también fue conflictivo, pues la presencia femenina en la gestión inicial de los proyectos, tuvo una fuerte oposición de los esposos y una desvalorización de su accionar. A medida que ellas fueron consolidando sus organizaciones y logrando mayor visibilización interna y externa, los hombres de las comunidades progresivamente acompañaron y apoyaron estos emprendimientos.

Los límites de estos logros se encuentran en que los iniciales cambios sólo encontrarán asidero si el trabajo con enfoque de género es apropiado de mejor manera por los proyectos y las comunidades de tal suerte que cuestionen las relaciones de poder y creen mecanismos para revertirlas.

Finalmente, en el tema de la equidad, los proyectos han centrado su preocupación en la realización de acciones positivas para las mujeres. Es

necesario además ampliar el espectro a la diversidad de inequidades: étnicas, de clase, regionales, etc. considerando su influencia en la vida y dinámica comunitaria.

### Impactos Económicos

#### Impactos Generales

Entre los impactos comunes en el ámbito económico encontramos que a excepción del proyecto Yunguilla, los demás tienen muchas dificultades para generar beneficios económicos sostenibles, pues las actividades alternativas sostenibles no tienen por el momento la suficiente rentabilidad.

Los emprendimientos productivos que inicialmente tuvieron gran acogida en los grupos organizados, sobre todo de mujeres, se encontraron desde el proceso y más aun cuando ya no contaron con asesoría técnica ni subsidios, con serias limitaciones para adecuarse a las lógicas del mercado. Las experiencias desarrolladas alrededor de la producción de café (Proyecto Tambo Negro), plantas medicinales (San José de Las Palmas), plantas ornamentales (Manta Real), cultivos andinos (San Pablo Urco), artesanías (Furare), cría de alpacas (Sisid), no han podido prosperar por las limitada capacidad de producción en términos de cantidad; además lo poco que producen tampoco tiene significación en términos de rentabilidad para un grupo que deberá repartirse la utilidad, lo cual redundante que en la mayoría de los casos la iniciativa se "congele" hasta encontrar un nuevo proyecto que la subsidie.

*"Se vende la lana, pero el mantenimiento y la mano de obra cuestan caro, entonces se pierde en la relación costo/beneficio, es una actividad no rentable, más bien estamos perdiendo por la cantidad de alpacas, ... aquí hacen falta iniciativas con sentido comercial". (Segundo Palchisaca - Comuna Sisid)*

Otro factor común a los proyectos es que en

ninguno se realizan estudios técnicos (aunque sean muy sencillos), fundamentalmente Estudios de Factibilidad Técnica del Proyecto, Estudios de Factibilidad Financiera y Estudios de Mercado, requisitos mínimos para determinar la viabilidad y sostenibilidad de la actividad económica que se impulsa.

Influyen además los "desencuentros culturales" entre la lógica campesina y del mercado que implican también relacionamientos con las estructuras legales y con los mecanismos de mercadeo, factores que implicaron desalientos, confusiones y deserciones, sin embargo, los que al final han capitalizado los aprendizajes ahora saben que cualquier proyecto nuevo debe partir de esos condicionantes.

*"Nosotros nunca antes habíamos manejado un fondo así con tanta estrictez y fue una experiencia bastante dura, a veces no se conoce cómo se realizan esas gestiones, fue un aporte bien interesante; es que a partir de este proyecto se han ido dando nuevas cosas". (Segundo Palchisaca - Comuna Sisid)*

#### Impactos Específicos

En términos específicos, debido a la falta de análisis y estudios de las alternativas económicas, muchos proyectos no contaban con equipamiento y capacidad instalada acorde a la demanda del mercado, a lo cual se suma la falta de condiciones físicas para la producción, (no sólo del terreno o materia prima a utilizar sino también de la mano de obra a emplear y las condiciones del entorno como es el caso de vías de acceso).

*"Se ha hecho artesanía en caña guadúa y bambú, pero hay una desventaja aquí frente a esto y por eso no hemos continuado, la humedad ambiental en la época de invierno es muy alta y cuando hemos tratado estas artesanías la humedad entra y entre 8 a 15 días que han pasado en la tienda se dañan, el material se mancha, y pierde calidad,*



entonces ya no se compra. Esto un poco desmotivaba a la gente que estaba produciendo acá, claro que la gente necesitaba perfeccionarse, producir calidad, desarrollar más habilidades, pero no veíamos por las condiciones de humedad que no facilitaban este trabajo". (Angel Suco - Técnico FURARE)

Uno de los factores más débiles han sido los procesos de promoción y comercialización que implican contactos, redes, conocimientos, generación de valor agregado, análisis de la oferta y demanda, etc. Para la realización de las alternativas económicas no se ha tomado en cuenta, el punto de vista de la oferta asociada a la demanda existente en el mercado para esos productos, ya que de lo contrario se corre el riesgo de producir y no tener a quien vender.

Sin embargo, hubo también proyectos que a más de plantearse nuevas alternativas, buscaron el mejoramiento de las condiciones de la producción agropecuaria tradicional, en este caso los impactos económicos tienen mayor sustento, aunque no contamos con indicadores para fundamentar los cambios en la productividad y en los ingresos, sin embargo cualitativamente las personas involucradas valoran sustancialmente los logros con la introducción de tecnologías sustentables.

En el campo administrativo, si bien la mayoría de proyectos no presentan una estructura de funciones determinadas claramente, ni cuentan con un organigrama con responsabilidades definidas, nos encontramos con experiencias que han logrado desarrollar estas destrezas:

*"El proyecto ha fortalecido la parte administrativa-comunitaria porque anteriormente no había eso, ahora sabemos que la parte administrativa y técnica no tiene que ver con los cambios de los dirigentes, sino tiene que mantenerse, se ha logrado visibilizar y diferenciar el rol del dirigente y de lo que es la parte administrativa-técnica. Ese ha sido uno de los aportes del proyecto". (César Pilataxi - Comuna San Pablo Urco)*

El proyecto Yunguilla merece resaltarse pues ilustra la importancia del factor económico, en el cual las propuestas económicas y una gestión dinámica para darles viabilidad son el mejor instrumento para la sostenibilidad ambiental, pues este proyecto es de los pocos que está logrando consolidarse, a partir de concebir al "ecoturismo como un paraguas" para un sinnúmero de iniciativas que se generaron.

*"El ecoturismo representó uno de los mejores proyectos, tanto en la parte ambiental como de ingresos, pero tampoco podemos saturar esa actividad, inclusive los guías ya estaban peleándose porque todos querían ser guías, pero no todos pueden serlo, entonces hay que ir buscando otros ingresos para la gente que sean complementarios pero que estén dentro de la misma línea de la conservación". (German Collahuazo - Yunguilla)*

Lamentablemente, los demás proyectos, se topan con una trama de inviabilidades relacionadas con su integración al mercado, que generan riesgos a los logros ambientales y organizacionales.

#### 4. Conclusiones

##### Lecciones aprendidas para la Sostenibilidad:

**La concepción de la sostenibilidad:** No existe un factor determinante para la sostenibilidad, es la confluencia de un conjunto de requisitos interrelacionados lo que garantiza este proceso. Si un factor falla, la sostenibilidad se pone en riesgo. Ejemplo: si no existe rentabilidad en un proyecto, la participación disminuye y los logros ambientales peligran.

**Integralidad en la concepción y gestión de proyectos de desarrollo:** Las comunidades no fragmentan la vida en componentes, y los proyectos deben reflejar esa integralidad. Operativamente un proyecto no puede abarcar todos los aspectos pero la gestión debe incorporar esa visión; las comunidades serán quienes definan las prioridades y las articulen.

**Compromisos previos a la ejecución de un proyecto:** Una evaluación ex ante debe dar cuenta de la importancia, validez y motivación que la comunidad le asigna a los objetivos y resultados de un proyecto; preferencialmente debe ser parte de procesos mayores y en marcha y contar con mecanismos precisos de continuidad post financiamiento PPD. Debe presentar objetivos realistas en tiempos, espacios y recursos definidos.

**La organización social como pilar de acciones colectivas sostenibles:** Si no existen estructuras solventes y adecuadas para la gestión de cualquier acción colectiva, estas definitivamente están condenadas al fracaso. En nuestro estudio, en la mayoría de los proyectos donde las organizaciones sociales surgieron para su gestión, una vez concluido el financiamiento la movilización se dispersó y no se han concretado nuevas iniciativas porque la capacidad de gestión de las mismas y la intensidad de las relaciones construidas no resultaron solventes.

**Control del proceso:** Las organizaciones sociales deben ser las protagonistas de los procesos de desarrollo, por ello debe constar en las propuestas las responsabilidades técnicas, gerenciales y políticas en la administración del proyecto. Las ONGs de apoyo tienen la obligación de transferir capacidad de gestión a todos los niveles para lo que deberían presentar un plan preciso de acción participativa en la toma de decisiones. Es muy importante además dejar claro desde el principio, los roles de cada una y transparentar los intereses de financieras, ONGs, organizaciones y comunidades.

**Desarrollo de capital humano y social:** La capacitación constituye una estrategia clave en la formación del capital humano y social, pero esta debe ser parte de un proceso de largo alcance y contemplar varias dimensiones. En esta experiencia se ha demostrado que la gente asume una responsabilidad ambiental sólo desde la comprensión de su valor.

**Identidad y empoderamiento:** El trabajo sobre los aspectos subjetivos demuestran ser de gran valor en la construcción de la autoestima, el fortalecimiento de la identidad y la cultura local y en el empoderamiento individual y colectivo, elementos que contienen una dinámica potente en

procesos de desarrollo y su sostenibilidad.

**Equidad y género:** La equidad de género debe pasar del discurso a la práctica a través de una diferenciación clara de intereses y necesidades y de respuestas diferenciadas; pero debe complementarse con una estrategia de familia y comunidad para no generar exclusiones innecesarias en contextos que requieren unidad. Este enfoque debe desatar las potencialidades de la gente y para que sea transformador, incorporar el tema del poder.

**Redes y alianzas institucionales:** El principal factor que está limitando la continuidad de los proyectos es la carencia de un sistema de soportes institucionales y organizacionales, cabe reflexionar entonces sobre la posibilidad de anclar estos procesos en instancias de coordinación, autoapoyos y redes entre los cerca de cien proyectos auspiciados por el PPD- Ecuador e incidir sobre programas y políticas macros.

Para ello es necesario contar con una identificación de actores claves y una estrategia de concertación social tanto a nivel interno como con actores externos que den viabilidad a los procesos.

**Viabilidad económica:** Si bien la parte económica es considerada en el programa, no tiene un peso sustantivo en lo operacional. Si una propuesta de conservación y manejo de los recursos naturales no va acompañada con actividades productivas sustentables orientadas al mejoramiento de la calidad de vida en términos tangibles, ésta tiene menores opciones de sostenibilidad.

**Seguridad alimentaria:** Las necesidades de las familias que participan en los proyectos no son exclusivamente generar ingresos, son también lograr condiciones de producción autosustentables, por ello los proyectos deben contemplar que el mercado no es el objetivo único de las iniciativas productivas e incorporar con mayor fuerza el tema de la seguridad alimentaria.

**Dialogo de saberes:** El saber ancestral sobre manejo y conservación de recursos naturales y biodiversidad está en progresiva degradación y los esfuerzos por recuperarlos son espúreos en tanto no se establecen compromisos para ello y una metodología de trabajo clara.

Lo poco que se recupera no tiene una sistematización ni una estrategia de difusión y tiende a



perderse en anécdotas y folclore. En el dialogo de saberes prima todavía una relación asimétrica donde lo externo resulta lo dominante y lo endógeno lo parcial.

**Impactos de mayor escala:** Los proyectos generan logros, pero a nivel micro y si estos no se complementan con las múltiples experiencias locales y nacionales, los conocimientos adquiridos y la biodiversidad recuperada no tienen mayor impacto. Es necesario una política institucional que organice y difunda los logros de los proyectos a través de una centralidad de información y distribución que sirva de nexo entre estas experiencias.

**La Gestión Ambiental Comunitaria:** Los hallazgos relevantes de esta sistematización hacen referencia a la "viabilidad natural" subyacente en las comunidades al tema ambiental, el cual a partir de un trabajo de develación de los potenciales existentes en recursos naturales y de programas

de capacitación-acción, se convierte en un eje altamente movilizador y articulador de los demás aspectos del desarrollo.

Para el PPD, la misión planteada está cumplida, pues el objetivo de "sembrar" una nueva cultura y actitud con respecto a los recursos naturales se da con estos proyectos semilla, el problema radica en las posibilidades de continuidad pues el tema ambiental no es cuestión de un proyecto sino de una estrategia global de desarrollo local y esto ya rebasa al programa en mención.

**Seguimiento ex post:** En este proceso es necesario desarrollar algún mecanismo de acompañamiento ex post para orientar las iniciativas generadas hacia concreciones reales a través de conexiones y asesorías a las organizaciones que quedan huérfanas luego de concluido el financiamiento.

## 5. Agradecimientos:

Dejamos constancia de nuestro agradecimiento a:

- Todas las comunidades, organizaciones, líderes/as y ONGs pertenecientes a los 10 proyectos estudiados, que participaron activamente en esta sistematización.
- El Grupo Chorlaví en las personas de Julio Berdegú por su eficiencia en la gerencia del programa y Germán Escobar por su apoyo en el seguimiento de esta convocatoria;
- Al Programa de Pequeñas Donaciones de Naciones Unidas PPD en la persona de su coordinadora Ana María Varea, por su apertura y apoyo, a Nelly Cevallos, tesista por sus aportes y comentarios.

## 6. Referencias bibliográficas

- Berdegú, J., Ocampo, A., Escobar, G: 2000. "Sistematización de experiencias locales de desarrollo agrícola y rural". PREVAL-FIDAMERICA.
- Carpio, P., Toledo, E. 2001. "Innovaciones comunitarias para el manejo y conservación de la biodiversidad", PPD/PNUD/FMAM. Quito-Ecuador.
- DelNet. 2002. "El Desarrollo Local como motor de cambio". Programa de Formación OIT, Unidad Didáctica 1. Italia.
- Levi y Anderson, L. 1980. "La tensión psicosocial. Población Ambiente y Calidad de Vida".
- PPD. 1997-2001. Documentos de los proyectos PPD e Informes de Evaluación de proyectos. Ecuador.



# Otras Investigaciones Científicas





# Espectro de energía disipada y control del daño sísmico

E. García<sup>1</sup>

R. Riddell<sup>2</sup>

## Resumen

En base al estudio de la respuesta inelástica de sistemas de un grado de libertad sometidos a terremotos se presenta un método para construir espectros de energía disipada por histéresis. La cantidad de energía disipada, junto con otros parámetros de respuesta, permiten estimar la capacidad de deformación necesaria para evitar el colapso frente a un terremoto de diseño dado. Se estudia la correlación entre diversos índices de intensidad del movimiento del suelo y la energía y la respuesta espectral para identificar los índices de intensidad más apropiados para la evaluación de la amplificación de respuesta y construcción de espectros de energía y respuesta inelástica. Se discuten las propiedades de modelos de relaciones fuerza-deformación y de los modelos elastoplástico, bilineal y bilineal con degradación de rigidez utilizados. Se utiliza una familia de 52 registros sísmicos, principalmente obtenidos en el anillo Circumpacífico. El análisis estadístico de las respuestas de numerosos sistemas permite obtener los factores necesarios para construir espectros de energía disipada y espectros inelásticos convencionales del tipo Newmark-Hall. La combinación de estos espectros permite estimar la capacidad última de deformación requerida para sobrevivir el terremoto de diseño, capacidad que puede convenientemente presentarse en forma espectral como ilustra un ejemplo.

## Abstract

The inelastic response of single-degree-of-freedom systems subjected to earthquake motions is studied and a method to derive hysteretic energy dissipation spectra is proposed. The amount of energy dissipated through inelastic deformation combined with other response parameters allow to estimate the required deformation capacity to avoid collapse for a given design earthquake. A detailed analysis of correlation between

1. Facultad de Ingeniería,  
Universidad de Cuenca,  
Ecuador.

egarcia@ucuenca.edu.ec  
2. Departamento de  
Ingeniería Estructural y  
Geotécnica, Universidad  
Católica de Chile.  
riddell@ing.puc.cl



energy and ground motion intensity indices is carried out to identify the indices to be used as scaling parameters and base line of the energy dissipation spectrum. A brief discussion of the desired characteristics of load-deformation models is presented, and the elastoplastic, bilinear, and stiffness degrading models used are described. Systems with 5% damping, subjected to a world-wide ensemble of 52 earthquake records is considered. The

statistical analysis of the response data provides the factors for constructing the energy dissipation spectrum as well as Newmark-Hall inelastic spectra. The combination of these spectra permits to estimate the ultimate deformation capacity required to survive the design earthquake, capacity that can also be presented in spectral form as an example shows.

### Introducción

En los últimos 10 o 15 años el enfoque del diseño sísmico se ha ido orientando progresivamente al concepto de desempeño. El daño observado durante terremotos, incluidos países desarrollados, ha llamado la atención de la sociedad en cuanto a la filosofía de diseño sísmico y a la forma que ella se implementa en la práctica. Tal como se enunció originalmente (Blume, Newmark y Corning, 1961), dicha filosofía establecía que "durante un terremoto inusual, mas intenso que el terremoto mas severo que pueda probablemente ocurrir durante la vida útil de una estructura, ésta podrá experimentar grandes deformaciones, incluso serias deformaciones permanentes, requiriendo reparaciones mayores, pero sin colapsar". Dejando de lado los términos imprecisos del enunciado anterior que data de los inicios de la década del 60 del siglo pasado, tanto en cuanto a la definición del evento sísmico en cuestión como al nivel de desempeño estructural involucrado, el hecho es que aún hoy en día, el que una estructura satisfaga un código de diseño no garantiza que no colapsará. La razón de ello radica en que los códigos de diseño sísmico enfatizan en la *resistencia* de la estructura, mientras la capacidad de deformación y disipación de energía requeridas se espera resulten naturalmente como consecuencia de cumplir con los requisitos de detallamiento del código de diseño del material respectivo, pero nunca se realiza una verificación del nivel de comportamiento o desempeño de la estructura diseñada frente a un sismo severo.

Se puede especular acerca de las condiciones existentes cuando dicha filosofía fue enunciada. Apenas se habían calculado, dificultosamente, espectros elásticos de los primeros acelerogramas obtenidos a partir de mediados de la década del 30. Ellos mostraban niveles impensados de amplificación, en comparación con el típico esfuerzo de corte basal de diseño del orden del 10% del peso que se usaba. Aún así, la evidencia de los terremotos demostraba que construcciones bien diseñadas podían sobrevivirlos. Los primeros espectros inelásticos se conocen a fines de la década del 50 y comienzos de los 60, ellos traen la respuesta: nace la *ductilidad*. Las estructuras pueden diseñarse para niveles bajos de resistencia si se les provee de capacidad de disipación de energía. Los análisis inelásticos en aquella época eran imposibles, salvo para sistemas muy simples. El camino a seguir en los 70 queda claro: se mantienen los niveles de diseño que se estaban usando, es decir no se contraría la *experiencia*, y se recurre al detallamiento para hacerse cargo de la ductilidad. Se mantiene la ficción del análisis elástico, ya sea de fuerzas laterales equivalentes o de superposición modal espectral.

El cambio de milenio nos trae el puente desde el diseño *elástico* basado en *fuerzas*, al diseño *inelástico* basado en *deformaciones*. Fundamentalmente porque hoy se estima que existen mejores herramientas para evaluar la respuesta inelástica de una estructura. Posiblemente la respuesta es el análisis no-lineal tridimensional para verificar el comportamiento de las estructuras frente a

sismos severos. Sin embargo, todavía queda mucho por mejorar y estandarizar estos procedimientos antes que puedan utilizarse generalizada y rutinariamente en el medio profesional. Claramente, el propósito no será simplemente una verificación del estado límite. Frente a las importantes pérdidas económicas en terremotos recientes, la sociedad parece estar tomando conciencia de la necesidad de explicitar el nivel de protección que se le ofrece, lo que nos obliga a revisar cual es el nivel de daño aceptable. Es claro entonces que la evaluación del comportamiento o nivel de daño esperado será el tema central en los próximos años.

Mientras los procedimientos de análisis sofisticados no estén disponibles y se hallen completamente validados, los métodos simples serán de gran utilidad. Además, la búsqueda de técnicas simples permite adentrarse en los aspectos fundamentales que controlan un problema. Teniendo en mente los objetivos antes señalados, se abordó este estudio de la disipación de energía (Riddell y García, 2001), comenzando por la correlación entre energía e intensidad, para terminar con reglas para construir espectros de energía. Conforme a estudios recientes, el daño estructural es una combinación de *deformación máxima* (o ductilidad) con *daño acumulativo* causado por ciclos repetitivos de respuesta en el rango inelástico. En este contexto, el espectro de energía es una componente necesaria para la evaluación del daño. Modelos de daño disponibles se pueden aplicar directamente a partir del espectro de energía y de un espectro inelástico

estándar de tipo Newmark-Hall, estableciéndose de esta forma una relación directa entre *resistencia, deformación, ductilidad, disipación de energía y daño estructural*.

### Modelación de la relación fuerza deformación

Dada la abundante evidencia experimental del comportamiento inelástico de elementos y sistemas estructurales, podría pensarse que la modelación de dicho comportamiento es cosa resuelta. Sin embargo, en opinión de estos autores no es precisamente ese el caso; por ello han querido referirse brevemente al tema aquí. Evidentemente los modelos tienen el propósito de simular el comportamiento real, y sin duda es posible producir un modelo complejo, que con numerosos parámetros apropiadamente calibrados, se *ajuste* a las singularidades observadas en un experimento en particular. Desafortunadamente dichos parámetros no gozarán de generalidad, y muy posiblemente, su uso en otra aplicación puede presentar gran divergencia con la realidad. Por ello la tendencia ha sido proponer modelos simples, regidos por pocos parámetros, pero con la propiedad de retener las características fundamentales de la respuesta estructural que se desea modelar; un ejemplo notable al respecto es el modelo generalmente conocido como Takeda-Sozen (Takeda et al, 1970) al que nos referiremos mas adelante.

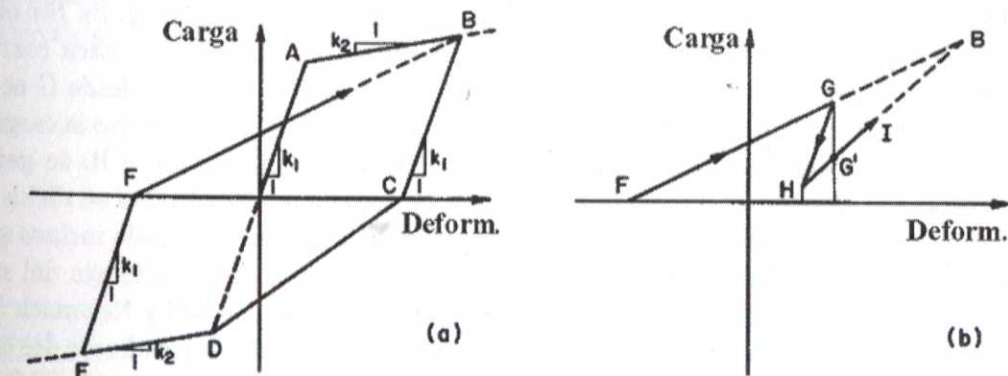


Figura 1. Modelo bilineal con degradación de rigidez: a) Forma genérica de un ciclo amplio, b) trayectoria espuria por regla constitutiva errónea.



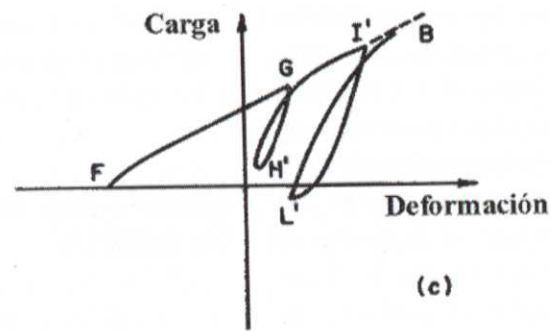


Figura 1. c) trayectorias reales experimentales

Normalmente, las leyes constitutivas con que se construyen los modelos están fuertemente influenciadas por resultados experimentales en que las probetas han sido sometidas a sucesivos ciclos de histéresis asociados a amplias y crecientes deformaciones plásticas en ambos sentidos. Sin embargo, bajo excitación sísmica, las estructuras experimentan un gran número de ciclos pequeños, asimétricos, y temporalmente incompletos, que se anidan al interior de ciclos de mayor amplitud. Es frecuente encontrar en la literatura modelos con claras deficiencias constitutivas, reflejadas en su incapacidad para desarrollar ciclos de pequeña amplitud con formas realistas. Como se ha elaborado anteriormente (Riddell y Newmark, 1979a), las dificultades surgen principalmente cuando se desea incorporar el fenómeno de degradación de rigidez, pero ellas no se limitan a dicho caso. A continuación se presentan algunos ejemplos comunes de deficiencias constitutivas.

Un modelo bilineal con degradación de rigidez, muy atractivo por su simplicidad, fue originalmente propuesto por Clough (1966) y ha inspirado numerosos otros modelos del tipo *lineal a trozos*. Sus reglas son simples: el modelo fluye con rigidez  $k_2$  (fig. 1a), la carga desde una fuerza nula se realiza siempre apuntando al punto más alejado antes alcanzado en cada dirección (inicialmente los puntos de fluencia A y D y posteriormente puntos como B ó E en la fig. 1a), y la descarga ocurre con una pendiente igual a la elástica inicial  $k_1$ . Ciclos amplios que sucesivamente excedan

puntos tales como B y E representarán en forma simplificada pero realista lo observado experimentalmente en estructuras de hormigón armado sin caída de la resistencia. Sin embargo, de ocurrir una descarga en el camino entre F y B, por ejemplo en el punto G hasta el punto H (fig. 1b), la recarga desde H, según la regla general seguiría el camino HI (apuntando hacia B). Esta última situación es definitivamente irreal, la situación real sería de forma similar al lazo GH'I' en la fig. 1c. Volviendo a la fig. 1b, es claro que no se ha disipado energía entre los puntos G y G' (que corresponden a igual deformación) sino por el contrario hay una ganancia neta de energía (energía que devuelve el sistema), mientras en lazos realistas (fig. 1c) siempre hay disipación. Un intento de corrección del modelo se muestra en la fig. 2a. Aquí se impone como regla que la recarga desde H pase primero por G antes de apuntar a B, mejorando ciertamente la irregularidad descrita en la fig. 1b. Sin embargo esta condición es insuficiente para corregir el modelo, ya que si la descarga desde G ocurriese como ilustra la fig. 2b, al revertirse la carga por el camino KLM (apuntando hacia B) se genera la situación espuria que se observa en dicha figura. Este intento de corrección puede incluso generar problemas graves de inconsistencia del modelo, como han advertido (Riddell y Newmark 1979a), al presentarse situaciones que ofrecen dos caminos diferentes alternativos en un mismo instante (situación en que H, K y L son coincidentes).

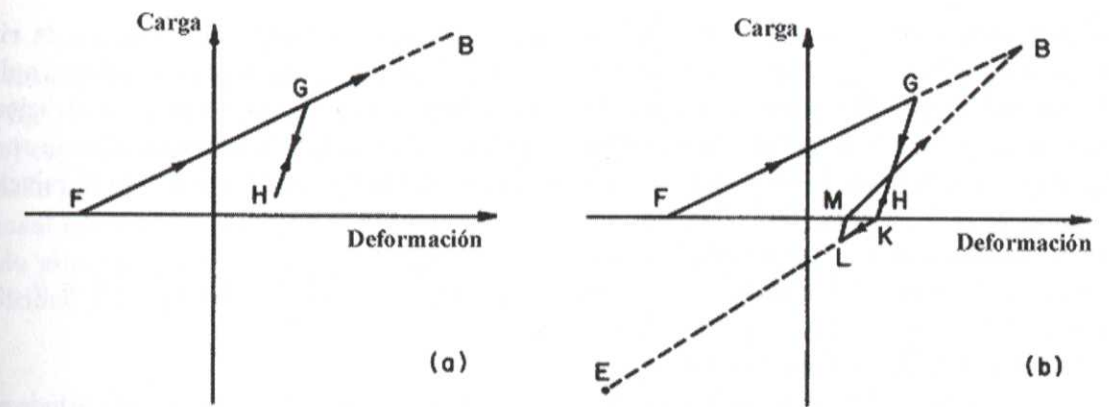


Figura 2. Reglas alternativas conducentes a modelo inconsistente

Para evitar dichas inconsistencias, Riddell y Newmark (1979a, 1979b) propusieron un modelo con degradación de rigidez que no permite dejar ciclos (lazos) sin cerrar. Este modelo, inspirado en el modelo de Takeda-Sozen, tiene las características que ilustra la fig. 3; las líneas de segmentos en estas figuras muestran las trayectorias válidas a seguir al término del camino representado por la línea sólida. El modelo de Takeda y Sozen se rige por un set de 16 reglas primarias, cada una de las cuales se subdivide en tres o más reglas secundarias, es decir las reglas constitutivas componen un complejo "árbol de decisiones". Otani y Sozen (1972) propusieron una simplificación del modelo Takeda-Sozen consistente básicamente en cambiar su curva primaria trilineal por una bilineal; este cambio les permitió reducir las reglas primarias de 16 a 11, manteniéndose dos o tres opciones para cada regla. Aunque estos modelos manejan cuidadosamente hasta dos ciclos anidados al interior de un ciclo de amplitud completa, igualmente

podrían producirse inconsistencias, por cierto con una probabilidad de ocurrencia y margen de error muy menores. El manejo de un número indefinido de ciclos anidados requeriría de un número infinito de reglas para administrar los modelos de Takeda-Sozen u Otani-Sozen; de hecho ellos necesitaron varios centenares de líneas de código Fortran para su implementación, como es característico en modelos estructurados en forma de "árbol de decisiones". Justamente la dificultad para generar estos modelos, con la prolijidad de los autores originales, es posiblemente la causa de que con frecuencia se observen imitaciones defectuosas de ellos en la literatura. El modelo de Riddell y Newmark mencionado, no se basa en una lógica de "árbol de decisiones" sino en la definición de la "espinas dorsal" o trayectoria única posible en cada instante (líneas de segmentos en la fig. 3). El algoritmo que rige este modelo está disponible a solicitud al primer autor.

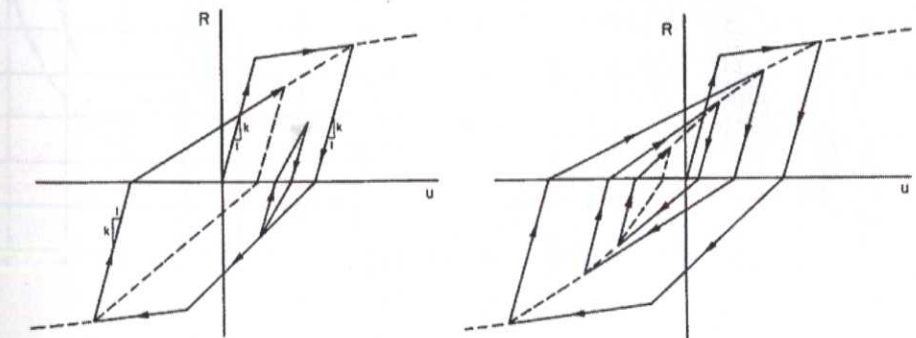


Figura 3. Modelo bilineal con degradación de rigidez de Riddell-Newmark



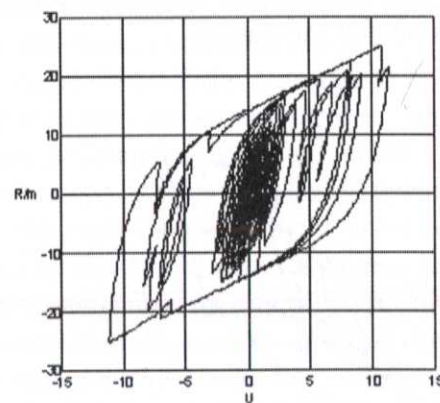
La discusión anterior se centró en modelos del tipo "lineales a trozos". Otra categoría de modelos son los regidos por expresiones analíticas que generan relaciones fuerza deformación en forma de curvas suaves. Precursor de ellos es el conocido modelo Ramberg-Osgood (1943). Estos modelos son con frecuencia utilizados en estudios probabilísticos de la respuesta de sistemas no-lineales. Entre ellos destaca el modelo de Buoc (1967) posteriormente generalizado por Wen (1976) y ajustado en diversos trabajos suyos posteriores. En este modelo, la variable que define la forma de los ciclos de histéresis esta dada por la siguiente ecuación diferencial:

$$\dot{Z} = -\Gamma|\dot{u}|Z|Z|^{n-1} - \vartheta\dot{u}|Z|^n + \Delta\dot{u} \quad (1)$$

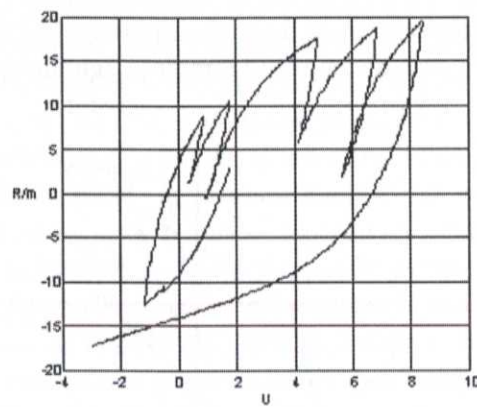
Los parámetros  $\Gamma, \vartheta, \eta$  y  $\Delta$  permiten generar una gran variedad de formas de histéresis. Las ecuaciones siguientes se refieren a un caso particular donde la fuerza restitutiva de un sistema de un grado de libertad se compone de un término lineal y un término histerético, tal que:

$$R = \alpha \frac{F_y}{D_y} u + (1 - \alpha) F_y Z \quad (2)$$

en que  $D_y$  es la deformación de fluencia,  $F_y$  la fuerza de fluencia, y  $\alpha$  es a la razón entre la



(a)



(b)

Figura 4. Comportamiento del modelo de Buoc-Wen para un conjunto particular de parámetros

rigidez "post-fluencia" del sistema y la rigidez elástica inicial. A modo de ejemplo se aplicó el modelo escogiendo los parámetros arbitrarios  $\eta=1, \alpha=0.1, \Gamma=\vartheta=0.5/D_y$  y  $\Delta=1/D_y$  quedando la variable adimensional  $Z$  de la ec. 1 dada por la relación:

$$D_y \dot{Z} + 0.5|\dot{u}|Z + 0.5\dot{u}|Z| - \dot{u} = 0 \quad (3)$$

Considerando un sistema con período propio  $T=2$  segundos,  $D_y=0.8$  cm, y amortiguamiento  $\xi=5\%$  se evaluó su respuesta al registro de Melipilla, Chile, componente N00E, 03/03/85. La fig. 4 muestra la respuesta en términos de la relación fuerza deformación ( $R/m$ =fuerza por unidad de masa versus  $u$ =deformación relativa). La fig. 4a muestra la respuesta completa, en la que ya se visualizan formas irreales, mientras la fig. 4b muestra un detalle de la respuesta en el intervalo de tiempo  $30 < t < 33$  segundos. En ésta última se aprecia mas claramente una secuencia de lazos irreales con forma de sierra. Nuevamente la conclusión es que los parámetros de estos modelos deben seleccionarse cuidadosamente fijándose no sólo en la forma que el modelo trata ciclos cerrados de gran amplitud sino también en el manejo de ciclos pequeños incompletos.

En este estudio en particular se consideró un sistema de un grado de libertad como se muestra en la fig. 5, con amortiguamiento  $\xi=0.05$  (5% del crítico) cuya relación fuerza deformación  $R=R(u)$  está dada por tres modelos: elastoplástico, bilineal, y bilineal con degradación de rigidez (fig. 6). El modelo elastoplástico es muy atractivo por su simplicidad y, como se mencionará mas adelante,

proporciona en promedio, resultados en general conservadores con respecto a los correspondientes a los otros modelos. No se consideró degradación de la resistencia de los sistemas por estimarse que en una estructura bien diseñada y detallada la pérdida de capacidad debe ocurrir a deformaciones extremas cercanas al estado limite.

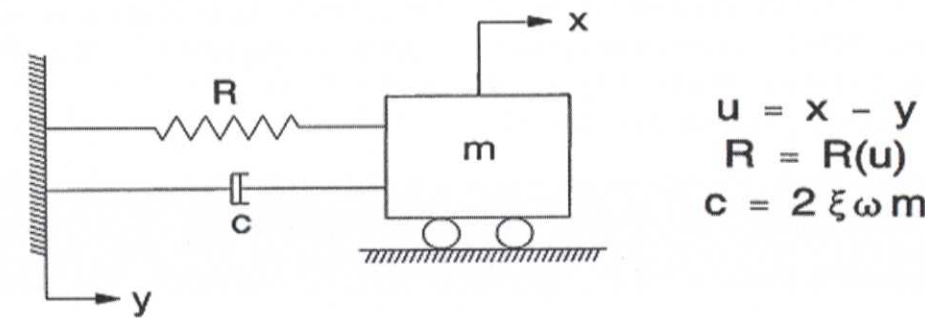


Figura 5. Modelo de un grado de libertad utilizado

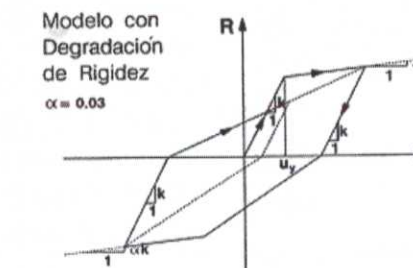
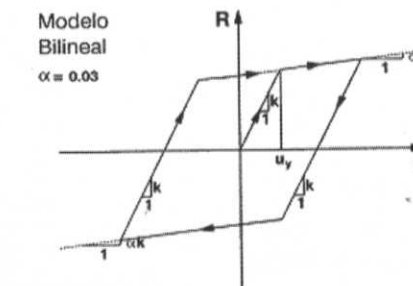
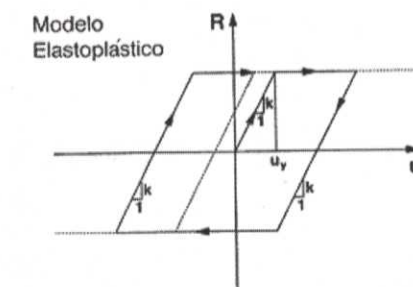


Figura 6. Modelos fuerza-deformación utilizados en este estudio



**Registros sísmicos utilizados**

Se utilizó una familia de 52 registros de terremotos, los que se listan en la tabla 1. Ellos corresponden a movimientos de intensidad moderada a alta. En general se observaron daños en el entorno de los sitios donde se registraron estos eventos. La mayoría de los registros satisface los siguientes niveles de intensidad: aceleración máxima del suelo >0.25g y/o velocidad máxima del suelo >25 cm/seg. No hubo intento de formar grupos de registros de características similares en cuanto a condiciones geotécnicas, ambiente tec-

tónico, Intensidad de Mercalli, distancia a la falla u otras. La razón fue la falta de información completa y la dificultad de formar grupos de tamaño estadísticamente significativo. Si en el futuro se diera la oportunidad de establecer grupos afines, la dispersión de resultados debiese disminuir, de modo que las estimaciones de energía tendrían mayor precisión. En todo caso, cabe advertir que los resultados de este estudio no pueden extrapolarse a suelos blandos, ya que la gran mayoría de los registros utilizados fueron obtenidos en suelo firme.

**Tabla 1: Registros Sísmicos utilizados en el estudio**

Estación, Componente, Fecha	Aceleración máx. (g)	Velocidad Max. (cm/seg)	Desplazamiento máx. (cm)
CMD Vernon, USA, S08W (10/3/1933)	-0.133	-29.03	-19.50
El Centro, USA, S00E (18/5/1940)	-0.348	-33.45	-12.36
Olympia, USA, N86E (13/4/1949)	0.280	17.09	-9.38
Eureka, USA, N79E (21/12/1954)	0.258	-29.38	-12.55
Ferndale, USA, N44E (21/12/1954)	-0.159	-35.65	14.72
Kushiro Kisyo-Dai, Japan, N90E (23/4/1962)	0.478	-20.01	5.22
Ochiai Bridge, Japan, N00E (5/4/1966)	-0.276	23.66	8.36
Temblor, USA, S25W (27/6/1966)	0.348	-22.52	-5.55
Cholame 2, USA, N65E (27/6/1966)	0.489	78.08	-26.27
Cholame 5, USA, N85E (27/6/1966)	0.434	25.44	-6.89
Lima, Peru, N08E (17/10/1966)	0.409	-15.20	-11.67
El Centro, USA, S00W (8/4/1968)	0.130	-25.81	12.96
Hachinohe, Japan, N00E (16/5/1968)	0.269	-35.43	-9.68
Aomori, Japan, N00E (16/5/1968)	-0.257	-39.12	-19.97
Muroran, Japan, N00E (16/5/1968)	-0.220	30.28	7.90
Itajima Bridge, Japan, Long. (6/8/1968)	0.612	-22.56	-4.59
Itajima Bridge, Japan, Long. (21/9/1968)	-0.261	-12.93	-2.80
Toyohama Bridge, Japan, Long. (5/1/1971)	0.450	15.90	3.38
Pacoima, USA, S16E (9/2/1971)	1.171	113.23	-41.92
Orion LA, USA, N00W (9/2/1971)	0.255	30.00	16.53
Castaic, USA, N21E (9/2/1971)	0.316	17.16	-5.05
Bucarest, Romania, S00E (4/3/1977)	0.206	75.12	-19.93
San Juan, Argentina, S90E (23/11/1977)	0.193	-20.60	6.33
Ventanas, Chile, Trans. (7/11/1981)	0.268	-17.87	-8.04
Papudo, Chile, Long. (7/11/1981)	-0.603	-18.93	-7.43
La Ligua, Chile, Long. (7/11/1981)	-0.469	-18.83	4.49
Rapel, Chile, N00E (3/3/1985)	0.467	-21.64	-6.54
Zapallar, Chile, N90E (3/3/1985)	0.304	13.46	-1.69
Llo-Lleo, Chile, N10E (3/3/1985)	-0.712	-40.29	-10.49

Vina del Mar, Chile, S20W (3/3/1985)	0.363	30.74	-5.42
UTFSM, Chile, N70E (3/3/1985)	0.176	14.60	3.11
Papudo, Chile, S40E (3/3/1985)	0.231	12.41	1.60
Llay Llay, Chile, S10W (3/3/1985)	-0.352	-41.79	8.43
San Felipe, Chile, N80E (3/3/1985)	0.434	-17.77	-3.50
El Almendral, Chile, N50E (3/3/1985)	0.297	-28.58	-5.78
Melipilla, Chile, N00E (3/3/1985)	-0.686	34.25	12.02
Pichilemu, Chile, N00E (3/3/1985)	0.259	-11.68	3.73
Iloca, Chile, N90E (3/3/1985)	0.278	15.09	1.39
SCT, Mexico, N90E (19/9/1985)	-0.171	-60.61	21.16
Corralitos, USA, N00E (18/10/1985)	0.630	-55.20	12.03
KSR Kushiro, Japan, N63E (15/1/1993)	0.725	33.59	4.73
Pacoima DAM, USA, S05E (17/1/1994)	-0.415	44.68	4.65
Newhall, USA, N00E (17/1/1994)	0.591	-94.73	28.81
Pacoima-Kagel, USA, N00E (17/1/1994)	0.433	-50.88	-6.64
Sylmar, USA, N00E (17/1/1994)	0.843	-128.88	-30.67
Santa Monica, USA, N90E (17/1/1994)	-0.883	41.75	-15.09
Moorpark, USA, S00E (17/1/1994)	0.292	20.28	4.67
Castaic, USA, N90E (17/1/1994)	0.568	-51.51	-9.19
Arieta, USA, N90E (17/1/1994)	0.344	-40.37	8.36
Century City-LA, USA, N90E (17/1/1994)	0.256	21.36	-6.51
Obregon Park-LA, USA, N00E (17/1/1994)	-0.408	-30.86	-2.65
Hollywood-LA, USA, N00E (17/1/1994)	-0.389	22.26	4.27

**Ecuación del movimiento y expresiones de energía**

La ecuación del movimiento del sistema que se muestra en la fig. 5 puede escribirse como:

$$\ddot{u}(t) + 2\xi\omega\dot{u}(t) + \frac{R(u)}{m} = -\ddot{y}(t) \quad (4)$$

Donde u es el desplazamiento relativo de la masa m con respecto a su base,  $\omega = \sqrt{k/m}$  es la frecuencia angular elástica no amortiguada, R(u) es la fuerza restitutiva histerética con parámetros de rigidez k y  $\alpha$  (fig. 6),  $\xi=c/2\omega m$  es el factor de amortiguamiento como fracción del crítico, e  $\ddot{y}(t)$  es la aceleración basal. Integrando la ec. 4 con respecto a u conduce a la bien conocida ecuación de balance de energía (Kato y Akiyama, 1975; Zahrah y Hall, 1982) que debe satisfacerse en todo instante durante el movimiento

$$E_K + E_D + E_H + E_S = E_I \quad (5)$$

donde, usando  $du = \dot{u}dt$

$$E_K = \int_0^t \ddot{u}(t) \dot{u}(t) dt = \frac{1}{2} [\dot{u}(t)^2 - \dot{u}(0)^2] \quad (6)$$

representa la energía cinética por unidad de masa, la que se hace cero si la velocidad relativa inicial es nula y la integración se extiende suficientemente para que el sistema haya vuelto al reposo al después de finalizado el movimiento;

$$E_D = 2\xi\omega \int_0^t \dot{u}^2(t) dt \quad (7)$$

es la energía por unidad de masa disipada por el amortiguador viscoso;



$$E_H + E_S = \frac{1}{m} \int_0^t R(u) \dot{u}(t) dt \quad (8)$$

es un término que comprende la energía histerética EH, o energía disipada por unidad de masa debida a comportamiento inelástico, y ES la energía de deformación almacenada por unidad de masa, que también se hace nula cuando el sistema llega al reposo; y

$$E_I = -\int_0^u \ddot{y}(t) du = -\int_0^t \ddot{y}(t) \dot{u}(t) dt \quad (9)$$

es el input de energía por unidad de masa, o energía total que la base en movimiento le suministra al sistema; entonces, al final de la excitación, la ecuación del movimiento (ec. 5) queda

$$E_H + E_D = E_I \quad (10)$$

es decir, la energía total EI impartida a la estructura debe disiparse por medio del amortiguamiento y del comportamiento inelástico.

### Características de los espectros de energía de Input e Histerética

Para cada registro sísmico las respuestas se calcularon para 250 frecuencias uniformemente distribuidas en la escala logarítmica en el intervalo 0.02 - 50 hertz (cps), para 6 valores prefijados de la ductilidad de desplazamiento ( $\mu = 1, 1.5, 2, 3, 5$  y 10), y para los tres modelos de relación fuerza deformación antes descritos (fig. 6). La combinación de estos parámetros con los 52 registros utilizados resultan en un total de 234000 sistemas diferentes cuyos resultados se presentaron en forma de espectros de respuesta elástica e inelástica y espectros de energía de input y disipada por histéresis.

Resulta conveniente presentar las respuestas en términos de la raíz de la energía ( ) porque

esta cantidad es linealmente proporcional a la amplitud del movimiento del suelo, es decir, si el registro de aceleración se amplifica por un factor  $\lambda$ , el espectro se amplifica por el mismo factor. Los espectros inelásticos presentan esta misma propiedad; en efecto, debido a que la deformación de fluencia de los sistemas inelásticos se toma como una fracción del desplazamiento alcanzado en respuesta elástica, cuando un registro se amplifica por un factor  $\lambda$  y el nivel del punto de fluencia es simultáneamente amplificado por el mismo factor, el factor de ductilidad de respuesta es el mismo que tendría el sistema con su relación fuerza deformación no-amplificada sometido al registro sísmico no-amplificado. A su vez, ya que EI y EH se han definido como energías por unidad de masa, sus raíces tienen unidad de velocidad y los tres ejes del gráfico logarítmico tripartito tienen las mismas unidades físicas del espectro de respuesta convencional. Esto permite referirse a las tres regiones espectrales típicas: región de frecuencias altas o períodos cortos (sistemas rígidos sensibles a la aceleración del suelo), región de frecuencias y períodos intermedios (respuestas controladas por la velocidad del suelo), y región de frecuencias bajas o períodos largos (sistemas flexibles sensibles al desplazamiento del suelo). Estas sensibilidades se apreciarán muy claramente en la sección siguiente cuando se correlacionen respuestas con índices de intensidad del movimiento. Cabe advertir que los intervalos de frecuencia que definen las regiones específicas, no necesariamente coinciden exactamente para espectros inelásticos y de energía.

En la fig. 7 se presenta el espectro de energía input (o energía total), en términos de para el registro SCT, componente N90E, obtenido en la ciudad de México el 19 de Septiembre de 1985, para sistemas con relación fuerza deformación elasto-plástica. La primera observación es que la energía entregada depende de la frecuencia, es decir no todos los sistemas reciben el mismo input. En este caso particular el espectro presenta una zona de máxima amplificación muy angosta, con un pico coincidente con la frecuencia predominante del movimiento (0.5 cps) (análogamente a lo que exhibe el espectro de respuesta para este registro) con del

orden de 500 veces aquella entregada a sistemas muy rígidos, es decir una energía EI 250.000 mayor. En cuanto al efecto del comportamiento inelástico se aprecia que, para frecuencias menores a la predominante del suelo los sistemas elásticos e inelásticos reciben básicamente energías de orden

similar, mientras que para frecuencias mayores a la predominante los sistemas inelásticos reciben mayor energía en la medida que aumenta la ductilidad, por ejemplo, para una frecuencia de 10 cps, la razón de energías entre  $\mu=1$  y  $\mu=10$  es del orden de 100.

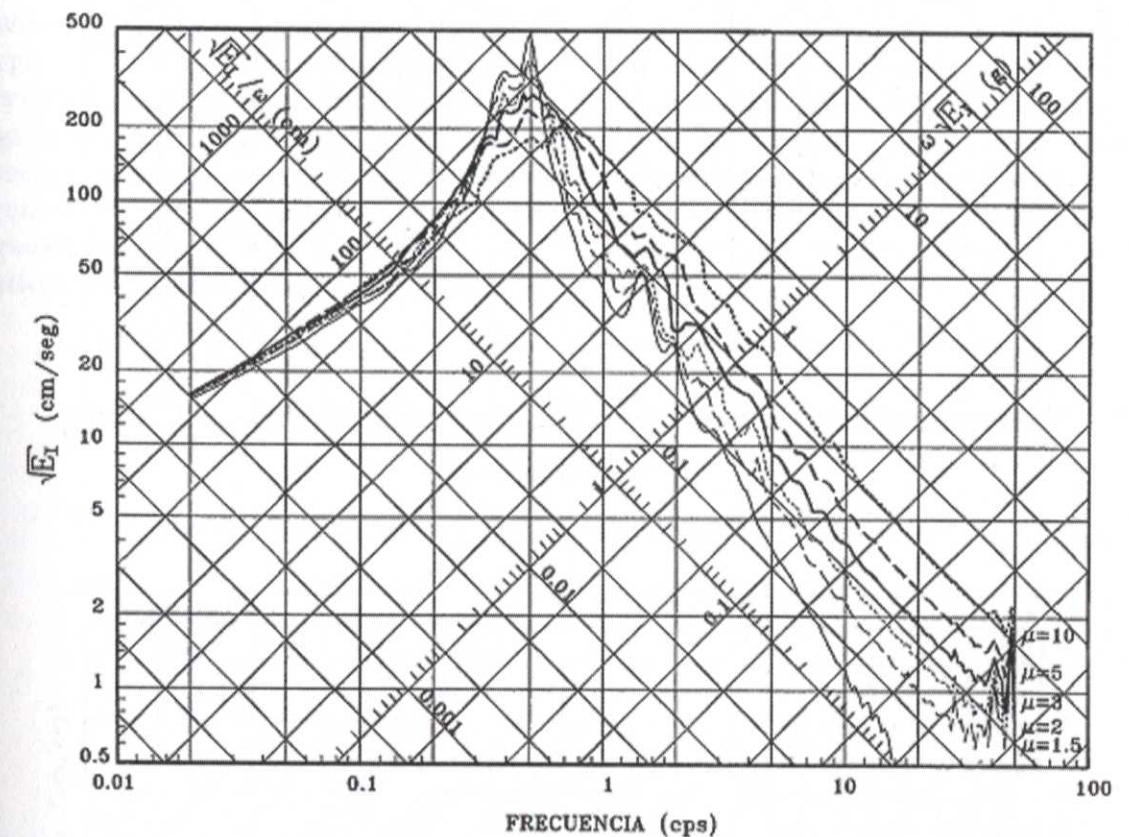


Figura 7. Espectro de energía input, registro SCT N90E México 1985, sistemas elasto-plásticos.

La fig. 8 muestra el espectro de energía histerética para el mismo registro y relación fuerza deformación anteriores. Esta figura no muestra una curva para  $\mu=1$  ya que entonces EH=0. La forma del espectro es similar a la de la fig. 7 pero mas suave. A su vez, la energía disipada es proporcional al factor de ductilidad, directamente para frecuencias mayores a la predominante, aunque no tan ordenadamente para la región opuesta del espectro. Si se comparan sistemas de alta frecuencia, por ejemplo 10 cps, en ambas

figuras se observará que los espectros para  $\mu$  tienen ordenadas muy similares, es decir los sistemas muy rígidos (en relación a la frecuencia predominante del suelo) disipan su energía casi exclusivamente por comportamiento histerético y no por amortiguamiento viscoso. Por el contrario, en la medida que disminuye la frecuencia, la participación del amortiguamiento aumenta, llegándose en el extremo izquierdo del espectro ( $f=0.02$ ) a que la energía disipada por histéresis es sólo del orden del 25% de la energía input total.



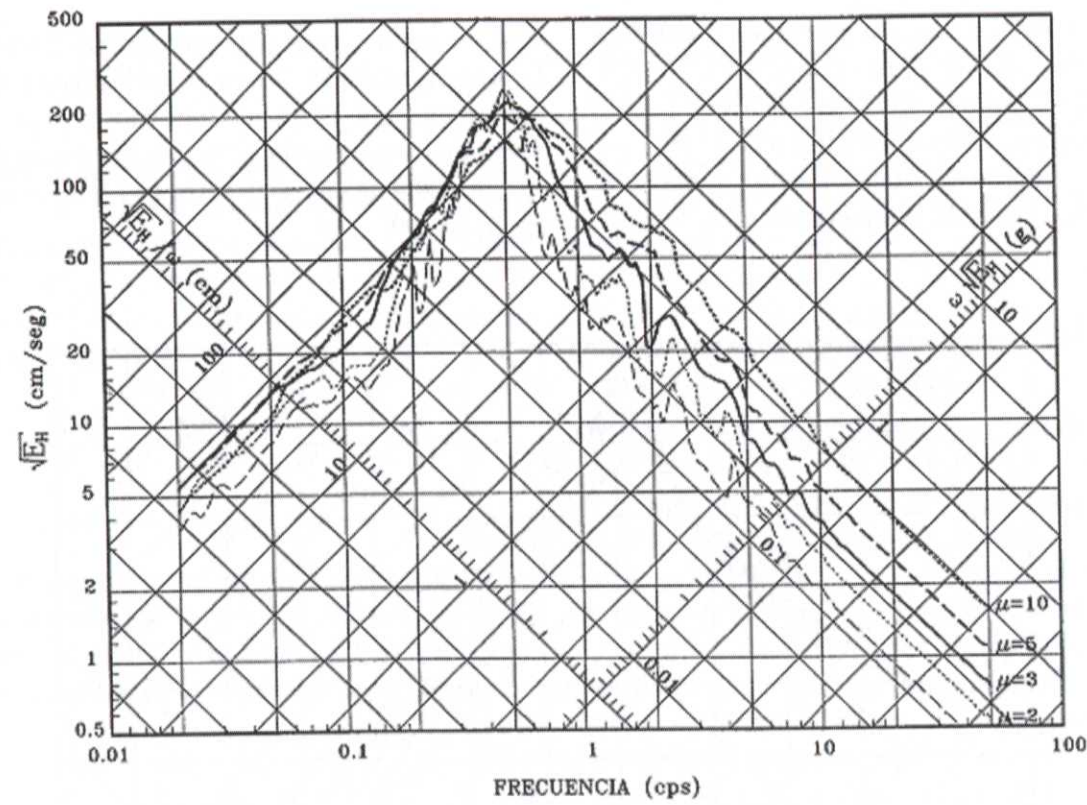


Figura 8. Espectro de energía histerética, registro SCT N90E México 1985, sistemas elastoplásticos

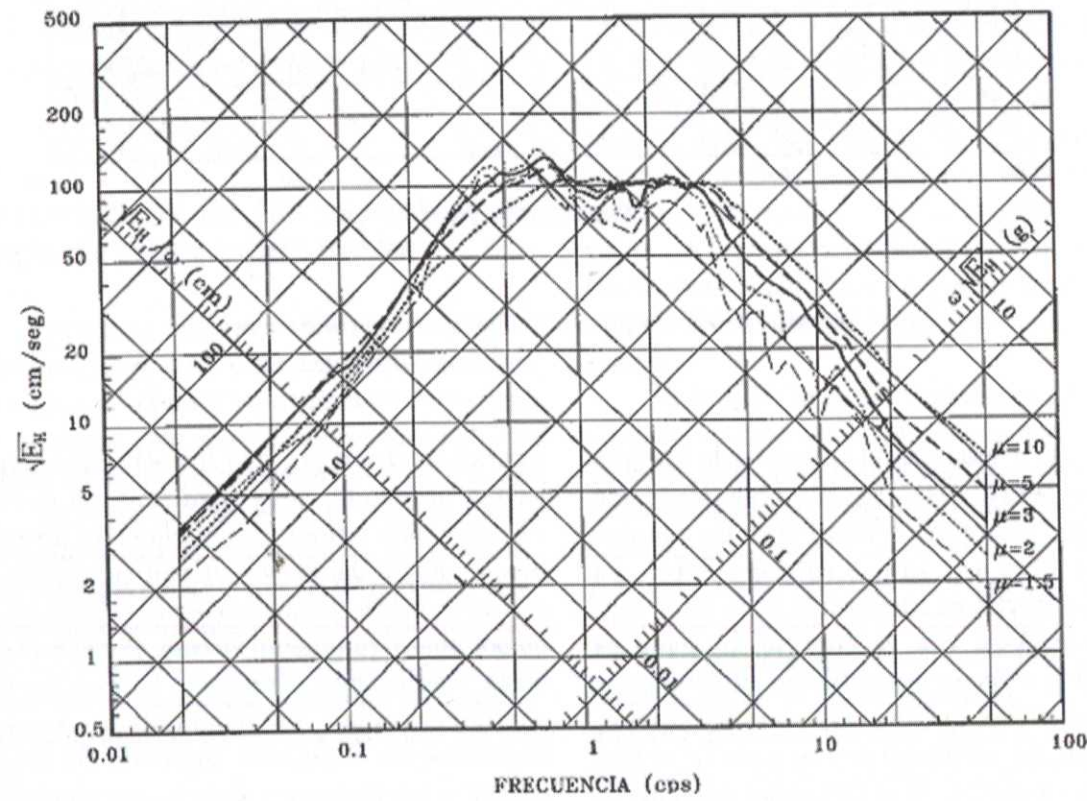


Figura 9. Energía histerética, registro de Sylmar, N00E, Northridge 1994, sistemas elastoplásticos

Esta observación es de carácter general y no una singularidad del registro SCT mexicano.

Las figs. 9 y 10 muestran espectros de energía disipada por histéresis para el registro de Sylmar, componente N00E, obtenido en Northridge, California, el 17 de Enero de 1994, para sistemas elastoplásticos y con degradación de rigidez respectivamente. No se aprecia en este caso gran influencia del tipo de relación fuerza deformación, excepto en la zona de frecuencias altas. Esta observación es de carácter general ya que, en dicho rango de frecuencias, las demandas de disipación de energía serán en promedio (para la familia de terremotos usada) mayores en sistemas con degradación de rigidez que en sistemas elastoplásticos, mientras los sistemas bilineales se

ubicarán en posición intermedia. La observación anterior se puede explicar con el argumento físico de que la rigidez efectiva de un sistema con degradación de rigidez es menor que la del elastoplástico y por lo tanto su período efectivo es mas largo, desplazándose el primero a una zona espectral en que las demandas de energía son mayores. Por otra parte, en comparación con los espectros para México (figs. 7 y 8) destaca una zona de velocidad mas ancha, denotando un contenido de frecuencias mas amplio del registro de Sylmar; además, en éste caso se aprecia una forma espectral de tipo trap-ezoidal trilineal, la que será en general común en los espectros de energía, al contrario de lo observado para el registro SCT en México.

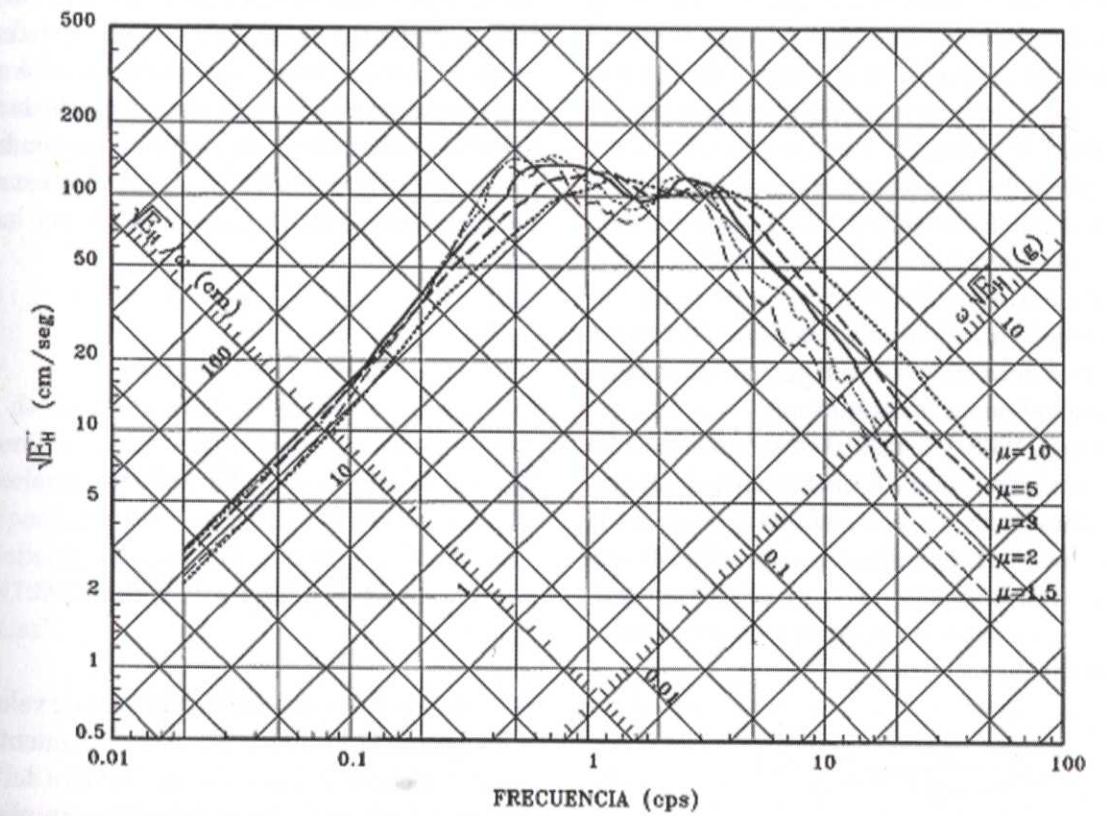


Figura 10. Energía histerética, registro de Sylmar, N00E, Northridge 1994, sistemas con degradación de rigidez



### Correlación entre energía e índices de intensidad del movimiento

La correlación entre EI y EH y diversos índices que se han propuesto para caracterizar la intensidad de los movimientos sísmicos se estudió con el propósito de identificar parámetros apropiados para la normalización o escalamiento de los registros necesaria para derivar espectros de energía. Es claro que la intensidad del movimiento no puede representarse por un solo parámetro, como enfáticamente dicen Housner y Jennings (1982): "Es esencialmente imposible describir un fenómeno complejo por un número único, inevitablemente se pierde gran cantidad de información cuando ello se intenta". Obviamente una representación completa de un registro sólo puede lograrse en forma espectral, la que refleja su contenido de frecuencias y las amplitudes correspondientes. Por ello, como en el caso de los espectros de respuesta, se pensó que diferentes índices de intensidad podrían resultar adecuados en las tres regiones características del espectro. Aún cuando la intención primaria era la correlación de los índices con la energía, se aprovechó de evaluar también correlaciones entre índices de intensidad y ordenadas espectrales, con el objeto de hacer un diagnóstico acabado de las cualidades de los índices disponibles. Consecuentemente, se consideró un vasto grupo de índices, los que se definen a continuación.

Lange (1968) y Arias (1970) propusieron una medida de intensidad de un acelerograma que, según lo sostenido por estos autores, relaciona la suma de las energías disipadas, por unidad de masa, para una población de osciladores amortiguados, en el espectro completo de frecuencias ( $0 < \omega < \infty$ ):

$$I_A(\xi) = \frac{\cos^{-1}\xi}{g\sqrt{1-\xi^2}} \int_0^{t_r} \ddot{y}^2(t) dt \quad (11)$$

donde  $t_r$  es la duración total del movimiento del suelo y  $g$  es la aceleración de gravedad. Housner (1975) argumentó que una medida de la destructividad sísmica podía ser representada por la tasa promedio de acumulación de energía

suministrada por unidad de masa; considerando que la integral del cuadrado de la aceleración es proporcional al input total de energía, él propuso como índice de la "potencia de un terremoto" a la expresión:

$$P = \frac{1}{t_1 - t_2} \int_{t_1}^{t_2} \ddot{y}^2(t) dt \quad (12)$$

donde  $t_1$  y  $t_2$  son el inicio y término respectivamente de la parte fuerte del movimiento. Matemáticamente, la ec. 12 es el promedio de la aceleración al cuadrado en el intervalo de tiempo entre  $t_1$  y  $t_2$ . La popular definición de "duración significativa del movimiento" de Trifunac and Brady (1975) se adoptó en este estudio, i.e., el intervalo entre los instantes  $t_5$  y  $t_{95}$  para los cuales se alcanzan respectivamente el 5% y el 95% del término integral en la ec. 11. Con la definición anterior, la potencia del terremoto, o valor cuadrático medio de la aceleración, queda dado por la ec. 13. Similarmente los índices valor cuadrático medio de la velocidad  $P_v$  y valor cuadrático medio del desplazamiento  $P_d$  quedan dados por las ecs. 14 y 15:

$$P_a = \frac{1}{t_{95} - t_5} \int_{t_5}^{t_{95}} \ddot{y}^2(t) dt \quad (13)$$

$$P_v = \frac{1}{t_{95} - t_5} \int_{t_5}^{t_{95}} \dot{y}^2(t) dt \quad (14)$$

$$P_d = \frac{1}{t_{95} - t_5} \int_{t_5}^{t_{95}} y^2(t) dt \quad (15)$$

donde  $\dot{y}(t)$  e  $y(t)$  son las historias de velocidad y desplazamiento del suelo respectivamente. De aquí en adelante la duración significativa del movimiento se designará por  $t_d = t_{95} - t_5$ . Por simplicidad, sin mayor preocupación por la definición de duración ni por las constantes involucradas en la ec. 11, las integrales del cuadrado de la aceleración, velocidad, y desplazamiento del suelo han sido también utilizadas (Nau y Hall, 1982) como índices de la forma:

$$E_a = \int_0^{t_r} \ddot{y}^2(t) dt \quad (16)$$

$$E_v = \int_0^{t_r} \dot{y}^2(t) dt \quad (17)$$

$$E_d = \int_0^{t_r} y^2(t) dt \quad (18)$$

Los valores raíz-cuadrada-media de los parámetros del movimiento del suelo, o valores efectivos  $a_{rms} = \sqrt{P_a}$ ,  $v_{rms} = \sqrt{P_v}$ , y  $d_{rms} = \sqrt{P_d}$  también han sido considerados medidas potenciales de la intensidad de un registro sísmico (Housner, 1964, 1970) como también las raíces cuadradas de los índices dados por las ecs. 16 a 18:  $a_{rs} = \sqrt{E_a}$ ,  $v_{rs} = \sqrt{E_v}$ , y  $d_{rs} = \sqrt{E_d}$ .

También se han propuesto otros índices que se basan en las cantidades antes indicadas, combinándolas con diferentes ponderaciones, o incluyendo nuevos parámetros. Araya y Saragoni (1980) definieron el "potencial destructivo" de un terremoto como

$$P_D = \frac{I_A}{v_0^2} \quad (19)$$

donde  $I_A$  es dado por la ec. 11 y  $v_0$  es el número de cruces por cero por unidad de tiempo del acelerograma; la relevancia de este índice es la incorporación del contenido de frecuencias del movimiento del suelo a través de  $v_0$ . Park, Ang y Wen (1985) encontraron que la "intensidad característica"

$$I_c = a_{rms}^{1.5} t_d^{0.5} \quad (20)$$

era un indicador razonable de la destructividad de un movimiento basal porque presentaba buena correlación con el daño estructural expresado en términos del índice de daño estructural que ellos propusieron (ec. 40).

Fajfar et al. (1990) propusieron la expresión

$$I_F = v_{max} t_d^{0.25} \quad (21)$$

como medida de la capacidad del movimiento del suelo para dañar estructuras con período fundamental de vibración en el rango intermedio de frecuencias, donde  $v_{max}$  es la velocidad máxima del suelo.

Todos los índices anteriores dependen sólo y directamente del movimiento del suelo. Ellos se utilizaron en conjunto con los valores máximos de los parámetros del movimiento, aceleración  $a_{max}$ , velocidad  $v_{max}$ , y desplazamiento  $d_{max}$  para evaluar su correlación con las energías de input e histéretica, y con las ordenadas espectrales. Sólo se utilizó un parámetro basado en la respuesta misma, la intensidad espectral de Housner. Observando que la pseudo-velocidad de respuesta  $S_v$  y la máxima energía almacenada en un vibrador lineal elástico se relacionan por  $E_{s,max} = mS_v^2/2$ , Housner (1952) argumentó que el espectro mismo era una medida de la severidad de un registro, y definió la intensidad espectral

$$S_I(\xi) = \int_{0.1}^{2.5} S_v(\xi, T) dT \quad (22)$$

Cabe destacar que desde el punto de vista de su correlación con variables de respuesta este es un índice de tipo a posteriori en cuanto él mismo está ya basado en la respuesta del vibrador. En cambio, todos los otros índices previamente mencionados corresponden a parámetros del movimiento del suelo previos al cálculo de la respuesta misma es decir a priori.

Para evaluar las correlaciones deseadas se escogieron sistemas con tres frecuencias de control: 0.2, 1 y 5 cps, representando cada una de ellas a cada una de las regiones espectrales características. Dos tipos de energía se calcularon para cada frecuencia: la energía input para un sistema elástico, o energía disipada por amortiguamiento (EI=ED), y la energía disipada por histéresis EH por un sistema inelástico con ductilidad de respuesta  $\mu=3$ . El uso de otros valores de la ductilidad condujo a las mismas conclusiones que se pre-



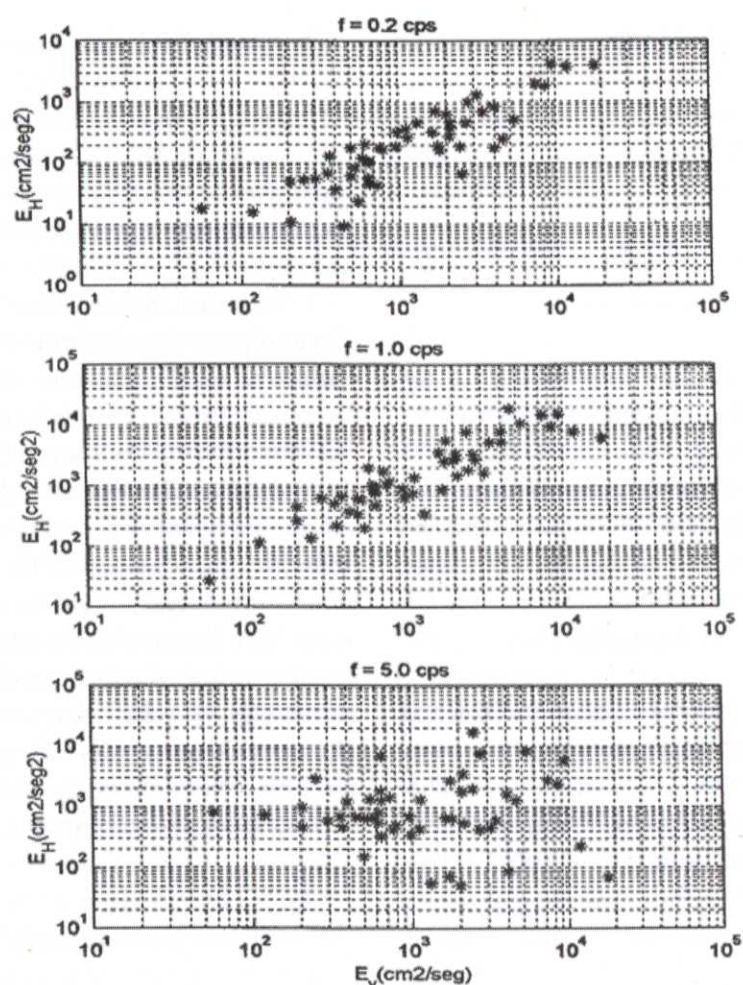


Figura 11. Energía histerética EH vs. índice Ev para 52 registros y frecuencias de control en 0.2, 1 y 5 cps.

sentarán a continuación. Para visualizar la correlación entre energía y todos los índices de intensidad, se construyeron gráficos como la fig. 11. En particular, esta figura muestra la relación entre el índice Ev (ec. 17) y EH, donde cada asterisco corresponde a cada uno de los 52 registros sísmicos considerados en el estudio. Se puede observar que Ev y EH presentan buena correlación para frecuencias intermedias (1 y 0.2 cps), pero no presentan correlación alguna en 5 cps. Para tener una medida objetiva de la correlación, se ajustaron a los datos curvas de la forma

$$E = \alpha Q^\beta \quad (23)$$

donde E es energía, Q es el índice de intensidad, y  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros determinados mediante análisis de regresión no-lineal (o

regresión lineal de los logaritmos de las variables). La calidad del ajuste se juzga mediante el coeficiente de correlación dado por

$$\rho = \frac{n \sum (l nQ \ l nE) - \sum l nQ \sum l nE}{\sqrt{(n \sum (l nQ)^2 - (\sum l nQ)^2)(n \sum (l nE)^2 - (\sum l nE)^2)}} \quad (24)$$

Los coeficientes de correlación entre energía e intensidad, para todos los índices, para las tres frecuencias de control, se resumen en las tablas 2 y 3. Así mismo, en las tablas 4 y 5 se presentan las correlaciones entre los índices de intensidad y las ordenadas espectrales de respuesta elástica e inelástica para las frecuencias de control. En las tablas mencionadas se muestra el "ranking" de los índices, destacándose los mejores para cada frecuencia.

**Tabla 2:** Cofeciente de correlación entre energía de input E1 y diversos índices de intensidad para sistemas elásticos

Índice	f=0.2 cps		f=1 cps		f=5 cps	
	p	Rango	p	Rango	p	Rango
dmax	0.862	2	0.469		0.244	
vmax	0.736		0.657	4	0.083	
amax	0.127		0.353		0.664	3
Ed and drs	0.811	5	0.403		0.216	
Ev and vrs	0.905	1	0.785	2	0.029	
IA and Ea and ars	0.341		0.612		0.713	1
Pd and drms	0.748		0.323		0.309	
Pv and vrms	0.761		0.574		0.091	
Pa and arms	0.139		0.294		0.514	
PD	0.685		0.553		0.156	
IC	0.289		0.536		0.693	2
IF	0.817	4	0.772	3	0.039	
SI	0.842	3	0.792	1	0.012	
td	0.201		0.301		0.122	

**Tabla 3:** Coeficiente de correlación entre la energía histerética EH y diversos índices de intensidad para sistemas elastoplásticos con ductilidad de respuesta m=3

Índice	f=0.2 cps		f=1 cps		f=5 cps	
	p	Rango	p	Rango	p	Rango
dmax	0.918	1	0.629		0.163	
vmax	0.750		0.781	4	0.108	
amax	0.027		0.276		0.817	2
Ed and drs	0.886	2	0.531		0.249	
Ev and vrs	0.871	3	0.901	2	0.050	
IA and Ea and ars	0.175		0.549		0.786	3
Pd and drms	0.839	4	0.478		0.201	
Pv and vrms	0.766		0.723	5	0.140	
Pa and arms	0.052		0.281		0.751	4
PD	0.669		0.478		0.044	
IC	0.140		0.488		0.839	1
IF	0.804	6	0.878	3	0.069	
SI	0.826	5	0.917	1	0.133	
td	0.129		0.301		0.122	



**Tabla 4:** Coeficiente de correlación entre ordenadas del espectro de respuesta elástica y diversos índices de intensidad

Índice	f=0.2 cps		f=1 cps		f=5 cps	
	p	Rango	p	Rango	p	Rango
dmax	0.9381	1	0.6289		-0.1283	
vmax	0.7387		0.8158	3	0.1101	
amax	0.1826		0.3603		0.8146	1
Ed, drs	0.8680	3	0.4880		-0.2443	
Ev, vrs	0.7483		0.7932	4	-0.0639	
IA, Ea, ars	0.1624		0.4553		0.5921	
Pd, drms	0.9000	2	0.5163		-0.1345	
Pv, vrms	0.7882	4	0.7557	5	0.1278	
Pa, arms	0.2018		0.3655		0.7107	2
PD	0.5420		0.6294		-0.0511	
IC	0.1920		0.4578		0.6900	3
IF	0.7146		0.8338	2	0.0112	
SI	0.7732	5	0.8829	1	0.0713	
td	-0.0843		0.0289		-0.2740	

**Tabla 5:** Coeficiente de correlación entre ordenadas del espectro inelástico y diversos índices de intensidad para sistemas bilineales con ductilidad de respuesta m=3

Índice	f=0.2 cps		f=1 cps		f=5 cps	
	p	Rango	p	Rango	p	Rango
dmax	0.9380	1	0.6956		0.1184	
vmax	0.7841		0.8705	3	0.4431	
amax	0.1753		0.2854		0.8769	1
Ed, drs	0.8807	3	0.5663		-0.0262	
Ev, vrs	0.7640	5	0.8692	4	0.2062	
IA, Ea, ars	0.1585		0.4571		0.6595	4
Pd, drms	0.9021	2	0.5694		0.0962	
Pv, vrms	0.8047		0.8014	5	0.4260	
Pa, arms	0.1929		0.3260		0.8037	2
PD	0.5615		0.7008		0.1992	
IC	0.1857		0.4432		0.7733	3
IF	0.7631		0.9087	2	0.3300	
SI	0.7752	4	0.9454	1	0.3770	
td	-0.0769		0.0833		-0.3211	

Cabe destacar que el coeficiente de correlación es el mismo para aquellos índices que sólo difieren en una constante o en su exponente. Varias observaciones se pueden hacer de los resultados presentados en estas tablas:

a) Como era de esperar, ningún índice muestra correlación satisfactoria con la energía en las tres regiones espectrales simultáneamente, en realidad los índices relacionados con la aceleración del suelo ( $a_{max}$ ,  $a_{rs}$ ,  $a_{rms}$ ,  $I_c$ ) son mejores para sistemas rígidos (5 cps), los índices relacionados con la velocidad del suelo ( $v_{max}$ ,  $v_{rs}$ ,  $v_{rms}$ ,  $I_F$ ,  $S_I$ ) son mejores para sistemas de frecuencia intermedia (1 cps), y los índices relacionados al desplazamiento del suelo ( $d_{max}$ ,  $d_{rs}$ ) son mejores para sistemas flexibles (0.2 cps); mas aún, ningún índice es apropiado en dos regiones espectrales simultáneamente, con la excepción quizás de  $E_v$  y  $v_{rs}$  que son satisfactorios para las frecuencias de control de 0.2 y 1 cps;

b) Los parámetros máximos del movimiento del suelo ( $a_{max}$ ,  $v_{max}$ ,  $d_{max}$ ) muestran buena correlación con las energías y ordenadas espectrales, especialmente en las regiones de desplazamiento y aceleración donde  $d_{max}$  y  $a_{max}$  son el mejor y casi el mejor índice respectivamente;

c) Estas conclusiones coinciden con las de Nau y Hall (1982); ellos examinaron los mismos índices usados aquí (excepto  $P_d$ ,  $I_c$  e  $I_F$ ) y encontraron que ninguno de ellos presentaba ventajas notorias sobre los parámetros máximos del movimiento del suelo ( $a_{max}$ ,  $v_{max}$ ,  $d_{max}$ ) para el propósito de predecir la respuesta elástica e inelástica;

d) En virtud de lo anterior,  $a_{max}$ ,  $v_{max}$  y  $d_{max}$  deben ser considerados en conjunto como índices muy significativos para caracterizar la intensidad de la demanda sísmica, especialmente también por la fácil comprensión de su significado y por la disponibilidad de metodologías para estimarlos para terremotos futuros (análisis de amenaza);

e) Es de interés notar que la muy popular intensidad de Arias ( $I_A$ ), que correlaciona muy bien con la energía de input ( $E_I$ ) en la zona de aceleración, es superada como índice de intensidad en la misma zona por la simple  $a_{max}$  y por  $I_c$  (tablas

3, 4, 5), y por cierto no tiene significación en las zonas de velocidad y desplazamiento;

f) La intensidad espectral de Housner es el mejor índice para  $f=1$  cps, se posiciona aceptablemente aunque a la zaga de los mejores índices en la zona de desplazamiento, y naturalmente no funciona en la zona de aceleración. Nau y Hall (1982) experimentaron con  $S_I$  modificando los límites de integración que indica la ec. 22, evaluando  $S_I$  sobre tres intervalos de frecuencia distintos que correspondían respectivamente a las tres regiones espectrales típicas, encontrando que tales índices modificados usados como parámetros de normalización conducían a menor dispersión de las ordenadas espectrales de respuesta elástica que aquella obtenida mediante normalización a los parámetros máximos del movimiento del suelo ( $a_{max}$ ,  $v_{max}$ ,  $d_{max}$ ). Sin embargo, tal ventaja se diluía al considerar respuestas inelásticas con ductilidades mayores que 3. La conclusión de Nau y Hall en relación con las respuestas elásticas era absolutamente predecible, ya que  $S_I$  es en sí misma una variable de respuesta elástica y por cierto se correlaciona con sí misma. Como se la calificó antes  $S_I$  es una variable a posteriori y por tanto no es en esencia un parámetro base para predecir respuestas. Dicho de otra manera, predecir  $S_I$  es equivalente a predecir la respuesta.

g) Aunque la duración del movimiento ( $t_d$ ) por sí sola no correlaciona bien ni con energía ni con las ordenadas espectrales, su combinación con otro índice puede mejorar el coeficiente de correlación; por ejemplo, el índice de Fajfar ( $I_F$ ) mejora la correlación de  $v_{max}$  tanto con las energías como con las ordenadas espectrales elásticas e inelásticas. Sin embargo, el índice de Park ( $I_c$ ) que mejora la correlación de  $a_{rms}$  con las energías la empeora tratándose de ordenadas espectrales.

El estudio anterior sirvió para reducir a unos pocos los índices potencialmente apropiados para ser usados como base para la predicción de espectros de energía. A continuación se realizaron dos estudios mas. Primero, examinando la dispersión de espectros de energía disipada ( $E_H$ ) calculados para numerosas frecuencias, se confirmó que las tendencias antes descritas no



quedaban limitadas a las frecuencias de control utilizadas sino se extendían a todo el rango de frecuencias o región espectral que dichas frecuencias representaban. Y segundo, considerando la eventual conveniencia de incorporar  $t_d$ , se evaluaron nuevos índices compuestos de la forma

$$I = Q^{\gamma_1} t_d^{\gamma_2} \quad (25)$$

Los exponentes  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  se determinaron mediante un esquema de optimización cuyo objetivo fue minimizar, sobre cada una de las tres regiones espectrales relevantes, el coeficiente de variación promedio  $\overline{COV}$  de los espectros de energía histerética ( $E_H$ ) para los 52 registros previamente normalizados utilizando  $I$  como parámetro de escala. La definición de  $\overline{COV}$  se presentará en la sección siguiente. Los exponentes  $\gamma$  se evaluaron para numerosos casos: usando los índices de intensidad ( $Q$ ) mas prometedores en cada región espectral, para los tres tipos de relación fuerza deformación, y para los 5 valores del factor de ductilidad (1.5, 2, 3, 5, 10). En cada caso la optimización consistió en variar  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  en incrementos de 0.1 partiendo de  $\gamma_1 = \gamma_2 = 0$ , calcular  $\overline{COV}$  para cada par  $(\gamma_1, \gamma_2)$ , y graficar curvas de nivel para  $\overline{COV}$ . Un ejemplo típico de tal gráfico es el que se presenta en la fig. 12, donde el par óptimo es aproximadamente  $\gamma_1=0.8$  y  $\gamma_2=0.42$ , para un  $\overline{COV}$  mínimo de 0.44. Puede observarse en la fig. 12 que el  $\overline{COV}$  no es muy sensible a  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  ya que la superficie  $\overline{COV}(\gamma_1, \gamma_2)$  tiene curvatura suave en la vecindad de su valor mínimo. Finalmente, se encontró que los índices  $Q$  que condujeron a los menores valores del  $\overline{COV}$  fueron  $d_{max}$  en la región de desplazamientos,  $v_{rms}$  en la región de velocidad y  $a_{max}$  con  $a_{rms}$  en la región de aceleración. Sin embargo, usando  $v_{rms}$  en vez de  $v_{max}$  sólo produjo una reducción adicional de 9% en el  $\overline{COV}$ , mientras el uso de  $a_{rms}$  en vez de  $a_{max}$  resultó en una variación despreciable del  $\overline{COV}$  para sistemas elasto-

plásticos y bilineales y en una reducción de 13,6% para sistemas con degradación de rigidez. Notando que las ventajas de utilizar  $v_{rms}$  y  $a_{rms}$  no son significativas, y considerando que no hay recomendaciones disponibles para estimar estos parámetros para terremotos futuros, se decidió proponer índices compuestos basados sólo en los máximos del movimiento del suelo  $d_{max}$ ,  $v_{max}$  y  $a_{max}$ . Por otra parte, ya que el  $\overline{COV}$  es poco sensible a  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$ , y como los pares óptimos  $(\gamma_1, \gamma_2)$  no varían significativamente para los distintos valores del factor de ductilidad ni para las diferentes relaciones fuerza deformación utilizadas, se seleccionaron valores de  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  que pueden extenderse aproximadamente a todos los casos. Consecuentemente, se recomiendan los siguientes índices compuestos para efectos de normalizar los registros sísmicos para la predicción la energía disipada por histéresis durante la respuesta sísmica:

$$I_d = d_{max} t_d^{1/3} \quad (26)$$

$$I_v = v_{max}^{2/3} t_d^{1/3} \quad (27)$$

$$I_a = \begin{cases} a_{max} t_d^{1/3} & (28a) \\ a_{max} & (28b) \end{cases}$$

donde  $I_d$  se aplica en la región de desplazamientos del espectro para cualquier relación fuerza deformación,  $I_v$  se aplica en la región de velocidad, también para cualquier modelo, e  $I_a$  se aplica en la región de aceleración, conforme a la ec. 28a para sistemas con degradación de rigidez y conforme a la ec. 28b para sistemas elastoplásticos o bilineales.

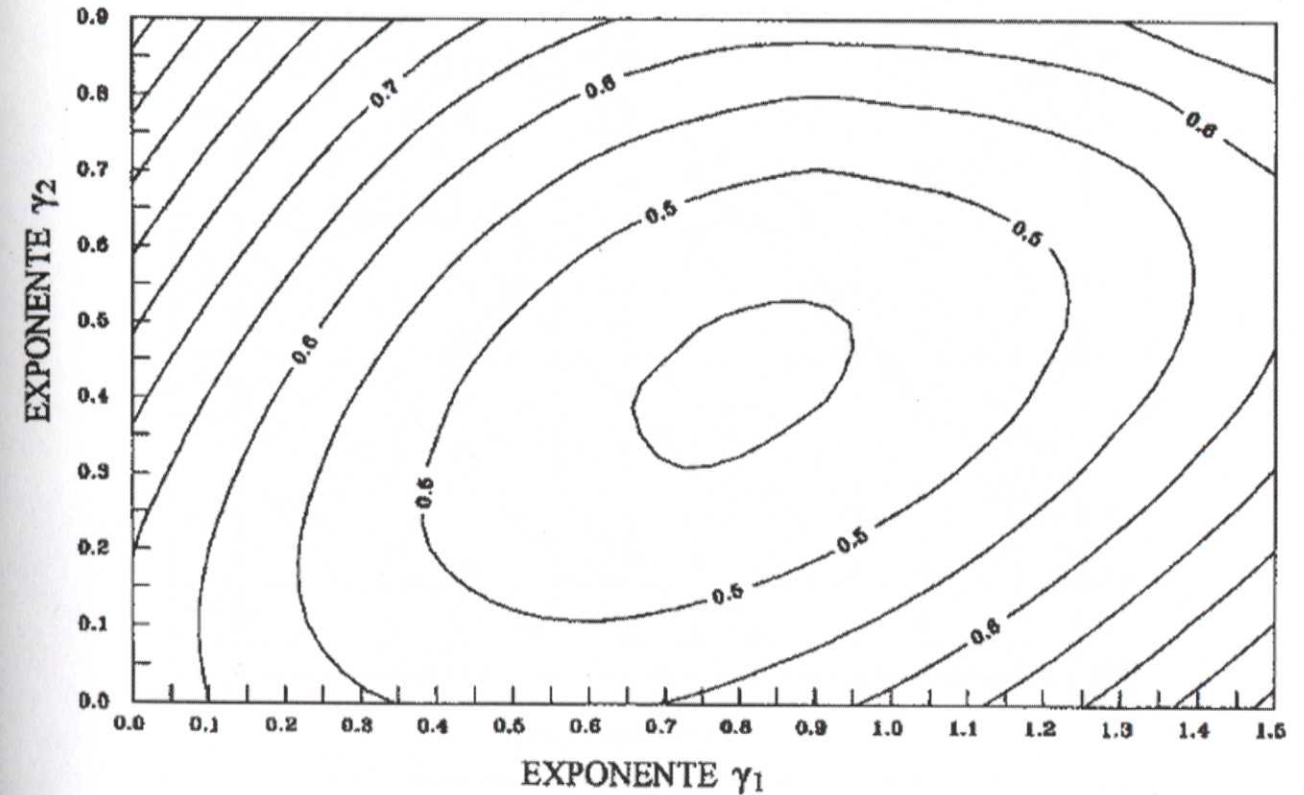


Figura 12. Curvas de nivel para  $\overline{COV}$  para el espectro  $E_H$  normalizado a  $v_{rms}^{2/3} t_d^{1/3}$  para sistemas bilineales con 5% de amortiguamiento y ductilidad de respuesta  $\mu=3$ .

### Análisis estadístico de los espectros de energía $E_H$

Teniendo disponibles los espectros de energía disipada por comportamiento inelástico EH para los 52 registros utilizados, el primer paso fue calcular espectros promedio. Designando el espectro de energía como:

$$S_H = \sqrt{E_H} = S_H(f, \xi, \mu, R(u)) \quad (29)$$

el espectro normalizado promedio queda dado por:

$$S_H(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{S_{Hi}(f)}{I_i} \quad (30)$$

donde  $f$  es la frecuencia circular ( $f=\omega/2\pi$ ),  $I_i$  es el factor de normalización para el  $i$ -ésimo registro,  $n$  es el número de registros, y  $S_{Hi}$  es el  $i$ -ésimo espectro para valores dados de  $\xi$  y  $\mu$  y para un modelo dado de relación fuerza-deformación. En las figs. 13, 14 y 15 se presentan espectros de energía histerética promedio, normalizados a los índices  $d_{max}$ ,  $v_{max}$  y  $a_{max}$  respectivamente, para sistemas con degradación de rigidez.



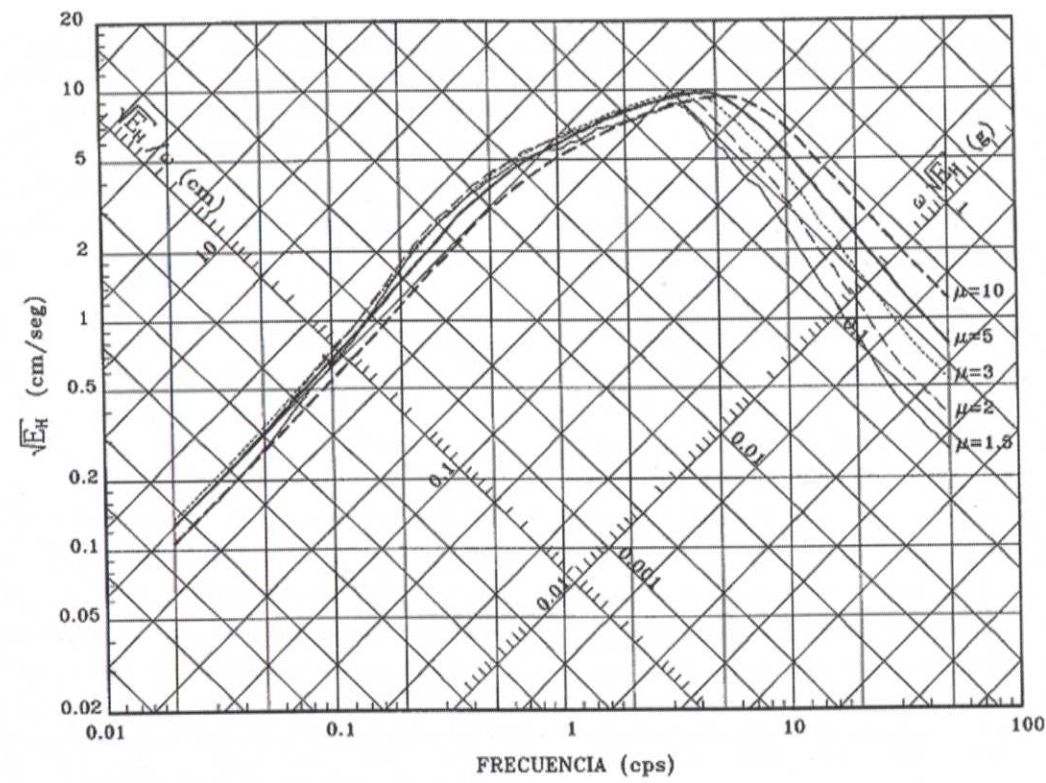


Figura 13. Espectros promedio de energía histerética  $E_H$  para registros normalizados a desplazamiento máximo del suelo ( $d_{max}$ ). Sistemas con degradación de rigidez y 5% de amortiguamiento.

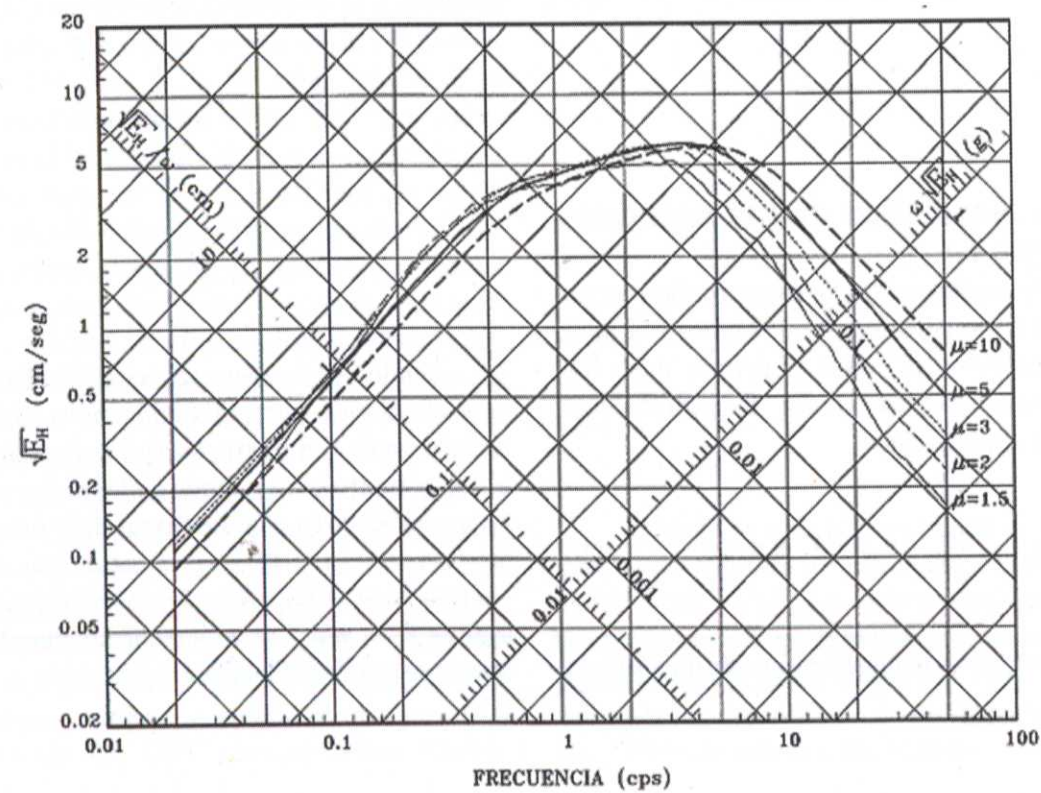


Figura 14. Espectros promedio de energía histerética  $E_H$  para registros normalizados a  $v_{max}^{2/3}$ . Sistemas con degradación de rigidez y 5% de amortiguamiento.

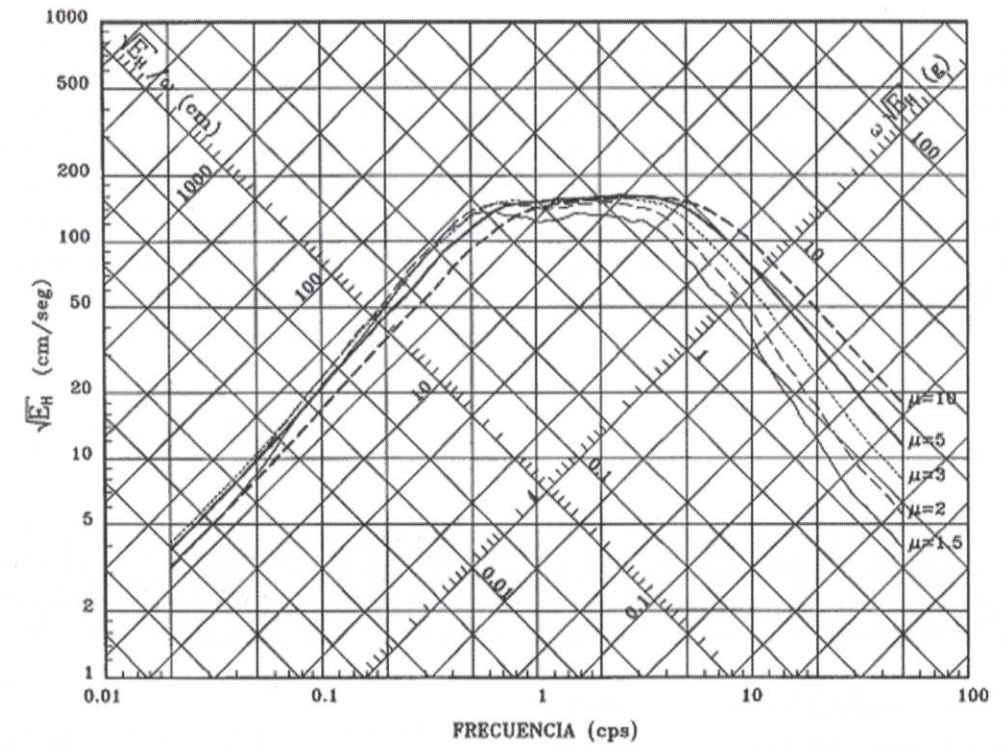


Figura 15. Espectros promedio de energía histerética  $E_H$  para registros normalizados a la aceleración máxima del suelo ( $a_{max}$ ). Sistemas con degradación de rigidez y 5% de amortiguamiento.

Cada figura es pertinente solamente en la región espectral que corresponde al índice de normalización utilizado. La forma de los espectros promedio para sistemas elastoplásticos y bilineales es similar. Se puede observar que: a) para frecuencias bajas y para un valor dado de  $\mu$ ,  $\sqrt{E_H}/\omega$  crece ligeramente con  $f$ , no varía significativamente al variar  $\mu$ , y es aproximadamente igual al desplazamiento máximo del suelo  $d_{max}$  (fig.

13); b) para frecuencias intermedias (fig. 14),  $\sqrt{E_H}$  tampoco varía significativamente con  $\mu$ , pero aumenta cuando  $f$  aumenta; y c) para frecuencias altas (fig. 15),  $\omega \sqrt{E_H}$  disminuye cuando  $f$  aumenta, pero crece con  $\mu$ . Los espectros promedio sugieren un espectro de energía de la forma JKLM que muestra la fig. 16. Notar que el espectro trilineal no es paralelo a los tres ejes del diagrama logarítmico tripartito.

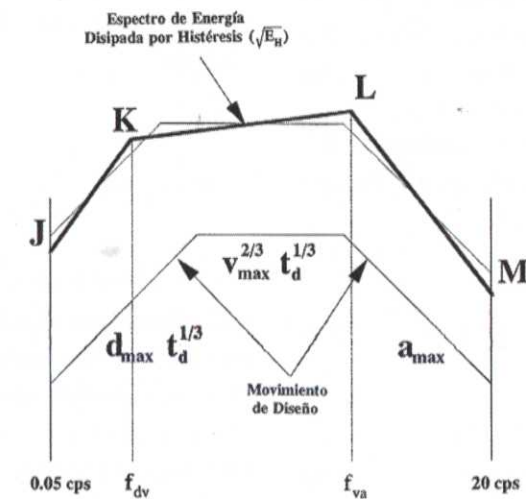


Figura 16. Forma del espectro suavizado de disipación de energía



El paso siguiente es determinar las frecuencias esquina  $f_{dv}$  y  $f_{va}$  (fig. 16) que limitan las tres regiones espectrales. Arbitrariamente se definió el rango completo de frecuencias de interés práctico por los límites inferior  $f_l=0.05$  cps y superior  $f_M=20$ cps (ver fig. 16). El espectro trilineal queda definido en el espacio logarítmico por curvas exponenciales

$$v_d = \delta_d f^{\epsilon_d} \quad (31a)$$

$$v_v = \delta_v f^{\epsilon_v} \quad (31b)$$

$$v_a = \delta_a f^{\epsilon_a} \quad (31c)$$

donde los seis coeficientes de la regresión,  $\delta$  y  $\epsilon$ , se determinan minimizando el error cuadrático entre el espectro tri-lineal  $v$  y el espectro promedio de energía  $S_H$ (ec. 30) en cada región espectral:

$$\Delta^2 = \sum_{j=1}^{nf} w_j [S_H(f_j) - v(f_j)]^2 \quad (32)$$

donde  $nf$  es el número de frecuencias,  $w_j = 0.5(f_{j+1} - f_{j-1})/(f_u - f_l)$  es un factor de ponderación para tomar en cuenta el espaciamiento variable (en escala lineal) de las frecuencias, y  $f_l$  y  $f_u$  son las frecuencias límite inferior y superior de la región espectral correspondiente. El proceso iterativo comienza con valores supuestos de las frecuencias esquina, las que se recalculan en cada ciclo. En las frecuencias esquina  $f_{dv}$  y  $f_{va}$  (con  $\omega_{dv}=2\pi f_{dv}$  y  $\omega_{va}=2\pi f_{va}$ ) rigen respectivamente las condiciones  $v_v=\omega_{dv}v_d$  y  $v_a=\omega_{va}v_v$ , entonces, usando las ecs. 31, las frecuencias esquina son

$$f_{dv}^{(i)} = \left[ \frac{\delta_v^{(i)}}{2\pi\delta_d^{(i)}} \right] \left( \frac{1}{1+\epsilon_d^{(i)} - \epsilon_v^{(i)}} \right) \quad (33a)$$

$$f_{va}^{(i)} = \left[ \frac{\delta_a^{(i)}}{2\pi\delta_v^{(i)}} \right] \left( \frac{1}{1+\epsilon_v^{(i)} - \epsilon_a^{(i)}} \right) \quad (33b)$$

donde  $i$  denota el  $i$ -ésimo ciclo de iteración. El procedimiento converge rápidamente hasta que  $f^{(i+1)}$  es tan cercano a  $f^{(i)}$  como se desee en cada esquina. El paso final es calcular estadísticas en cada región espectral para cada factor de ductilidad y para cada modelo de relación fuerza deformación. La varianza y la desviación estándar se definen como:

$$VAR(v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\int_{f_l}^{f_u} [S_{Hi}(f)/I_i - v(f)]^2 df}{f_u - f_l} \quad (34)$$

$$\sigma(v) = \sqrt{VAR(v)} \quad (35)$$

donde  $i$  denota el  $i$ -ésimo registro, y  $n$  es el número de registros. A su vez, como se mencionó en la sección anterior, para la evaluación de los índices de intensidad compuestos, se calculó el coeficiente de variación promedio sobre una región espectral en la forma

$$COV(v) = \sum_j w_j COV[v(f_j)] \quad (36)$$

donde  $COV[v(f_j)]$ , el coeficiente de variación discreto para cada frecuencia de la región, está dado por:

$$COV[v(f_j)] = \frac{1}{v(f_j)} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i [S_{Hi}(f_j)/I_i - v(f_j)]^2} \quad (37)$$

Los resultados finales del procedimiento antes delineado se resumen en las tablas 6, 7 y 8 para los modelos elastoplástico, con degradación de rigidez y bilineal respectivamente. Estas tablas dan los coeficientes  $\delta$  y  $\epsilon$  (ecs. 31) y los parámetros estadísticos respectivos de acuerdo a las ecs. 35 y 36. Además de los resultados asociados a normali-

zación por medio de los índices dados por las ecs. 26 a 28, que minimizan la dispersión, se entregan los resultados correspondientes a normalización con respecto a los parámetros máximos del movimiento del suelo sin considerar el factor  $t_a$ .

Las estadísticas calculadas se basan en el supuesto que la raíz cuadrada de la energía disipada por histéresis por unidad de masa ( $\sqrt{E_H}$ ) es una variable aleatoria con distribución normal.

Tal supuesto es correcto si la función de distribución de probabilidades derivada para  $E_H$  presenta buen ajuste con los datos reales de respuesta. La bondad del ajuste se verificó aplicando la prueba de Kolmogorov-Smirnov en tres frecuencias de control que exhibían la mayor dispersión; se encontró que la prueba satisfizo un nivel de significación de 5% por amplio margen.

**Tabla 6:**

**Factores para construir espectros de energía disipada ( $E_H$ ) para sistemas elastoplásticos con 5% de amortiguamiento**

Región Espectral e Índice de Normalización	Ductilidad $\mu$	$v_\mu = \delta_\mu f^{\epsilon_\mu}$		Desviación estándar $\sigma_\mu$	$\overline{COV}_\mu$
		$\delta_\mu$	$\epsilon_\mu$		
Desplazamiento $d_{max} t_d^{1/3}$	1.5	0.58	0.18	0.17	0.38
	2.	0.60	0.11	0.18	0.34
	3.	0.59	0.04	0.17	0.31
	5.	0.53	-0.14	0.17	0.31
	10.	0.44	-0.05	0.16	0.34
Desplazamiento $d_{max}$	1.5	1.49	0.20	0.44	0.38
	2.	1.58	0.13	0.50	0.37
	3.	1.53	0.06	0.55	0.38
	5.	1.38	-0.01	0.59	0.42
	10.	1.15	-0.04	0.57	0.48
Velocidad $v_{max} t_d^{2/3}$	1.5	1.28	0.15	0.82	0.57
	2.	1.55	0.17	0.94	0.53
	3.	1.75	0.18	0.99	0.48
	5.	1.85	0.17	0.99	0.45
	10.	1.88	0.14	0.93	0.42
Velocidad $v_{max}$	1.5	3.20	0.13	2.13	0.60
	2.	3.88	0.15	2.50	0.57
	3.	4.42	0.15	2.78	0.55
	5.	4.74	0.15	2.90	0.53
	10.	4.86	0.13	2.83	0.51
Aceleración $a_{max}$	1.5	3.56	-0.48	0.49	0.38
	2.	4.40	-0.44	0.65	0.38
	3.	5.16	-0.39	0.84	0.38
	5.	5.50	-0.29	1.06	0.38
	10.	5.73	-0.18	1.31	0.35



**Tabla 7:** Factores para construir espectros de energía disipada ( $E_H$ ) para sistemas con degradación de rigidez y 5% de amortiguamiento

Región Espectral e Índice de Normalización	Ductilidad $\mu$	$v_\mu = \delta_\mu f^{\epsilon_\mu}$		Desviación estándar $\sigma_\mu$	$\overline{COV}_\mu$
		$\delta_\mu$	$\epsilon_\mu$		
Desplazamiento $d_{max} t_d^{1/3}$	1.5	0.69	0.21	0.18	0.34
	2.	0.66	0.14	0.17	0.30
	3.	0.56	0.06	0.16	0.29
	5.	0.46	0.01	0.13	0.29
	10.	0.34	-0.04	0.10	0.30
Desplazamiento $d_{max}$	1.5	1.78	0.22	0.50	0.37
	2.	1.69	0.15	0.52	0.36
	3.	1.44	0.07	0.50	0.37
	5.	1.17	0.01	0.45	0.39
	10.	0.88	-0.03	0.36	0.40
Velocidad $v_{max}^{2/3} t_d^{1/3}$	1.5	1.67	0.17	1.00	0.52
	2.	1.85	0.18	1.04	0.48
	3.	1.91	0.18	1.00	0.44
	5.	1.87	0.18	0.92	0.40
	10.	1.75	0.18	0.83	0.37
Velocidad $v_{max}^{2/3}$	1.5	4.24	0.15	2.84	0.59
	2.	4.70	0.16	3.02	0.55
	3.	4.88	0.16	2.97	0.52
	5.	4.81	0.16	2.83	0.49
	10.	4.54	0.17	2.61	0.47
Aceleración $a_{max} t_d^{1/3}$	1.5	2.18	-0.41	0.41	0.49
	2.	2.39	-0.33	0.50	0.46
	3.	2.37	-0.21	0.60	0.42
	5.	2.27	-0.08	0.71	0.38
	10.	2.12	-0.06	0.83	0.34
Aceleración $a_{max}$	1.5	5.49	-0.41	1.10	0.53
	2.	6.05	-0.33	1.39	0.50
	3.	6.10	-0.22	1.71	0.47
	5.	5.88	-0.09	2.10	0.45
	10.	5.54	0.05	2.62	0.42

**Tabla 8:** Factores para construir espectros de energía disipada ( $E_H$ ) para sistemas bilineales con 5% de amortiguamiento

Región Espectral e Índice de Normalización	Ductilidad $\mu$	$v_\mu = \delta_\mu f^{\epsilon_\mu}$		Desviación estándar $\sigma_\mu$	$\overline{COV}_\mu$
		$\delta_\mu$	$\epsilon_\mu$		
Desplazamiento $d_{max} t_d^{1/3}$	1.5	0.59	0.19	0.17	0.38
	2.	0.62	0.12	0.18	0.33
	3.	0.59	0.04	0.17	0.31
	5.	0.51	-0.03	0.17	0.31
	10.	0.41	-0.08	0.14	0.34
Desplazamiento $d_{max}$	1.5	1.52	0.21	0.44	0.38
	2.	1.61	0.14	0.50	0.37
	3.	1.53	0.06	0.56	0.39
	5.	1.33	-0.02	0.58	0.43
	10.	1.05	-0.08	0.53	0.48
Velocidad $v_{max}^{2/3} t_d^{1/3}$	1.5	1.29	0.16	0.84	0.58
	2.	1.56	0.18	0.96	0.54
	3.	1.77	0.18	1.01	0.48
	5.	1.89	0.15	0.98	0.44
	10.	1.88	0.14	0.89	0.40
Velocidad $v_{max}^{2/3}$	1.5	3.22	0.14	2.22	0.62
	2.	3.93	0.16	2.63	0.59
	3.	4.51	0.16	2.88	0.56
	5.	4.85	0.13	2.91	0.53
	10.	4.86	0.12	2.76	0.50
Aceleración $a_{max}$	1.5	3.64	-0.49	0.51	0.39
	2.	4.67	-0.46	0.71	0.40
	3.	5.39	-0.37	0.95	0.41
	5.	5.85	-0.27	1.24	0.40
	10.	5.95	-0.13	1.59	0.37

Como parte del estudio, también se obtuvieron factores para construir espectros de diseño elástico e inelástico. El procedimiento original debido a Newmark y asociados (Veletsos y Newmark, 1960, 1964; Veletsos, 1969; Newmark y Hall, 1969, 1973; Newmark, Hall y Mohraz, 1973), posteriormente refinado por Riddell y Newmark (1979b) es conocido. En realidad la metodología formalizada por Riddell y Newmark (1979b) es mas simple que su extensión al caso de espectros de energía antes presentada porque las ordenadas del espectro de diseño trilineal en las tres regiones de amplificación del espectro son paralelas a los ejes del diagrama logarítmico tripartito. Los factores para sistemas elastoplásticos con 5% de amortiguamiento se presentan en la tabla 9. Estos

factores pueden usarse conservadoramente para sistemas bilineales y con degradación de rigidez ya que, en promedio, para una familia de registros sísmicos, las demandas de ductilidad en éstos últimos es menor que la impuesta a los primeros, como se ha reportado anteriormente (Riddell y Newmark, 1979b; Riddell, 1995) y confirmado en este estudio. Las ordenadas del espectro de diseño  $S_\mu$  para un factor de ductilidad dado  $\mu$  se obtienen aplicando los factores de amplificación  $\psi_\mu$  (tabla 9) a los parámetros del movimiento del suelo de diseño  $p_g$ :

$$S_\mu = \psi_\mu p_g \quad (38)$$



donde  $p_g$  representa a  $d_{max}$ ,  $v_{max}$ , o  $a_{max}$  dependiendo de la región espectral de interés. El espectro elástico  $S_e$  queda dado por la ec. 38 para el caso particular de  $\mu=1$ . Alternativamente el espectro inelástico puede obtenerse como

$$S_\mu = \phi_\mu S_e \quad (39)$$

con  $\phi_\mu$  dado también en la tabla 9. Es de interés comentar que la ec. 39 ha sido malentendida como equivalente a “derivar espectros inelásticos del análisis de respuestas elásticas”. Ciertamente esa es una desafortunada interpretación porque son las respuestas inelásticas las que conducen directamente a los factores  $\psi_\mu$  (amplificación promedio con respecto a los parámetros que definen la intensidad del movimiento del suelo) y simplemente  $\phi_\mu = \psi_\mu / \psi_{\mu=1}$ , como resulta evidente de combinar las ecs. 38 y 39. La presentación de la ec. 39 es consistente con las primeras propuestas de Veletsos y Newmark para el factor  $\phi_\mu$ , particularmente las aproximaciones basadas en las reglas de “igual desplazamiento” e “igual energía” que conducen a  $\phi_\mu$  dado por las razones  $1/\mu$  en las regiones de desplazamiento y velocidad, y  $1/\sqrt{2\mu-1}$  para la región de aceleración. Estas reglas sin embargo se han probado no-conservadoras para valores altos de ductilidad y amortiguamiento (Riddell y Newmark 1979b; Riddell et al, 2002), lo que también se observa en este estudio. La tabla 9 también entrega la desviación estándar  $\sigma_\mu$  y el coeficiente de variación  $COV = \sigma_\mu / \psi_\mu$  calculado sobre las regiones espectrales correspondientes.

Los valores de COV en la tabla 9 son consistentes con los de otros estudios. Riddell and Newmark (1979b) obtuvieron COVs en el rango 0.18-0.22 en la región de aceleración del espectro, 0.31-0.39 en la región de velocidad, y 0.41-0.49 en la región de desplazamiento, para  $\mu$  entre 1 y 10, mientras Riddell (1995) obtuvo COVs entre 0.19-0.31, 0.25-0.4, y 0.33-0.44 en las regiones

mencionadas respectivamente, para el mismo amortiguamiento y rango de valores de  $\mu$ . Miranda (1993) y Riddell (1995) han reportado valores de COV para el factor de modificación de respuesta  $R_\mu$  ( $R_\mu$ , la razón entre la respuesta elástica e inelástica, es un pariente cercano de  $\phi_\mu$ , el primero calculado para frecuencias individuales mientras el segundo corresponde a una banda de frecuencias). Miranda encontró que  $COV(R_\mu)$  variaba entre 0.25 y 0.45 para grupos de registros en roca o depósitos aluviales, para  $\mu$  entre 2 y 6, y crecía al aumentar la ductilidad; Riddell obtuvo prácticamente los mismos valores para el COV de  $R_\mu$ . Cabe destacar que Miranda y Riddell consideraron familias de registros agrupadas según las condiciones geotécnicas, y por tanto la dispersión debe ser menor que la de este estudio que consideró una variedad de registros en cuanto las condiciones geotécnicas y tectónicas. Ordaz y Pérez (1998) propusieron reglas para predecir  $R_\mu$  que exhiben menor dispersión que las de otras relaciones disponibles; sin embargo, debe tenerse presente que ellos predijeron  $R_\mu$  a partir de variables de respuesta: el espectro de velocidad relativa y/o el desplazamiento espectral. Los factores en las tablas 6 a 9 en cambio se utilizan para predecir respuestas en base a parámetros *a-priori*: los parámetros máximos del movimiento del suelo o índices de intensidad del movimiento. El COV (COV promedio) de los espectros de energía histerética en las regiones de aceleración y desplazamiento puede mantenerse en el rango 0.3-0.5 si se utilizan los índices de normalización apropiados (aquellos que incluyen  $t_d$ ). El COV mayor en la zona de velocidad puede reducirse si se utilizan  $v_{rs}$  o  $v_{rms}$  en vez de  $v_{max}$ , como se mencionó antes; sin embargo, no se dispone de estimaciones de los primeros para terremotos futuros, por ello se prefirió usar  $v_{max}$ . Si se utiliza  $v_{max}^{2/3} t_d^{1/3}$  como recomienda la ec. 27, el COV en la zona de velocidad está en el rango 0.37-0.58. Dicho rango refleja alta incertidumbre, pero no es extraordinariamente mayor que los valores típicos antes comentados.

**Tabla 9:** Factores para construir espectros de diseño elásticos e inelásticos para sistemas con 5% de amortiguamiento

Región Espectral e Índice de Normalización	Ductilidad $\mu$	$\psi_\mu$	$\sigma_\mu$	COV	$\phi_\mu$
Desplazamiento	1.	1.76	0.77	0.44	1.00
	1.5	1.07	0.45	0.42	0.61
	2.	0.76	0.32	0.42	0.43
	3.	0.50	0.23	0.45	0.29
	5.	0.30	0.14	0.46	0.17
$d_{max}$	10.	0.15	0.07	0.48	0.08
	1.	1.67	0.78	0.46	1.00
	1.5	1.05	0.42	0.40	0.62
	2.	0.78	0.31	0.40	0.47
	3.	0.54	0.21	0.39	0.32
Velocidad	5.	0.36	0.14	0.37	0.22
	10.	0.22	0.08	0.36	0.13
	1.	2.09	0.71	0.34	1.00
	1.5	1.46	0.38	0.26	0.70
	2.	1.23	0.28	0.23	0.59
Aceleración	3.	1.02	0.22	0.21	0.49
	5.	0.84	0.18	0.21	0.40
	10.	0.67	0.16	0.24	0.32
	$a_{max}$				

**Construcción de espectros de energía disipada por histeresis y aplicación al control de daños sísmicos**

El primer paso en la construcción de espectros de energía y de diseño involucra la definición de la amenaza sísmica o terremoto de diseño en términos de valores de los parámetros máximos del suelo asociados a probabilidades de excedencia asociadas a períodos de tiempo determinados. La discusión de este tema escapa al alcance de este artículo. Los espectros que se presentan en esta sección se anclarán a una aceleración máxima del suelo de diseño de 1g, valor que solamente tiene carácter referencial para efectos ilustrativos y no tiene efecto alguno en los comentarios que se harán. Dada la aceleración del suelo, la velocidad y desplazamiento se estimarán aproximadamente mediante las razones  $v_{max}/a_{max}$  y  $a_{max}d_{max}/v_{max}^2$ . En este estudio, se obtuvieron valores medios de dichas razones de 98.5 cm/sec/g 4, mientras Riddell y

Newmark (1979b) encontraron promedios de 89 y 6 respectivamente (aunque para una muestra menor de registros). Suponiendo  $v_{max}/a_{max}=85$  y  $a_{max}d_{max}/v_{max}^2=6$ , se obtienen  $v_{max}=85$  cm/sec and  $d_{max}=44$  cm. A continuación se construirán los espectros de energía y respuesta inelástica que se requieren para el control de daños. Se considerarán espectros para sistemas elasto-plásticos con 5% de amortiguamiento y para un factor de ductilidad de respuesta  $\mu$  igual a 5.

**Espectro de energía**

Suponiendo que no se dispone de una estimación para la duración del movimiento  $t_d$ , el movimiento del suelo de diseño (fig. 16) para construir el espectro de energía (ES) se toma simplemente como  $d_{max}=44$  cm,  $v_{max}^{2/3}=85^{2/3}=19$  cm/sec, y  $a_{max}=1g$ . Los coeficientes para determinar las ordenadas espectrales se entregan en la tabla 6. Suponiendo que se desea una evaluación conservadora, se



utilizarán factores asociados al valor medio mas una desviación estándar (probabilidad de excedencia igual a 15.9%). Entonces, los factores de amplificación espectral para  $\mu=5$  son  $v_d=(1.38+0.59)f^{-0.01}=1.97f^{-0.01}$  en la región espectral de desplazamiento,  $v_v=(4.74+2.9)f^{0.15}=7.64f^{0.15}$  en la región de velocidad, y  $v_a=(5.5+1.06)f^{-0.29}=6.56f^{-0.29}$  en la región de aceleración. Para  $f=0.05$ , la frecuencia mas baja del espectro (fig. 16), se obtiene un factor de amplificación  $v_d=2.03$ , entonces  $\sqrt{E_H}/\omega=d_{max}v_d=89\text{cm}$ . determina el punto J del espectro (fig. 16). Similarmente, para  $f=20$ ,  $v_a=2.75$  da  $\omega\sqrt{E_H}=2.75a_{max}=2.75g$  que corresponde al punto M (fig. 16). La frecuencia esquina  $f_{dv}$  se calcula de la condición  $d_{max}v_d(\omega)=v^{2/3}_{max}v_v$ , es decir,  $86.7f^{0.01}\omega=145.2f^{0.15}$  que da  $f_{dv}=0.207$  y  $\sqrt{E_H}=v^{2/3}_{max}v_v=145.2(0.207)^{0.15}=115\text{ cm/sec}$  (punto K en la fig.16). La frecuencia esquina  $f_{va}$  se obtiene de  $v^{2/3}_{max}v_v(\omega)=a_{max}v_a$ , i.e.,  $145.2f^{0.15}\omega=6433f^{-0.29}$ , de donde resulta  $f_{va}=3.882\text{ cps}$  y  $\sqrt{E_H}=v^{2/3}_{max}v_v=145.2(3.882)^{0.15}=178\text{ cm/sec}$  (punto L en la fig.16). El espectro trilineal de energía así obtenido se muestra en la fig. 17, para el cual los ejes relevantes en el diagrama tripartito son  $\sqrt{E_H}/\omega$ ,  $\sqrt{E_H}$ , y  $\omega\sqrt{E_H}$  en las regiones de desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente. Puede observarse en la fig. 17 que la demanda de disipación de energía varía en forma importante con la frecuencia. En la ordenada máxima del espectro ( $f=3.88\text{ cps}$ )  $E_H=31684\text{ cm}^2/\text{sec}^2$ , mientras en los extremos del espectro  $E_H$  es 780 y  $460\text{ cm}^2/\text{sec}^2$  respectivamente, i.e., razones del orden de 40 y 70 respectivamente.

### Espectro Inelástico

Como se escogió antes, los parámetros del movimiento del suelo de diseño son  $d_{max}=44\text{ cm}$ ,

$v_{max}=85\text{ cm/sec}$ , y  $a_{max}=1g$ . En este caso, primero debe construirse el espectro inelástico referido al punto de fluencia (IYS), también llamado espectro de ductilidad constante (Chopra, 1995), que corresponde a un gráfico de la deformación de fluencia  $u_y$  que se debe dar al sistema para limitar su máxima deformación  $u_{max}$  a un múltiplo especificado del mismo  $u_y$  ( $u_{max}=\mu u_y$ ). Dado que los factores en la tabla 9 sintetizan las características de una familia de 52 registros, el espectro corresponde a un espectro suave de diseño, en contraposición al concepto de espectro de respuesta que se refiere a la respuesta frente a una excitación individual específica. En este caso, las variables espectrales de interés son  $u_y$  en el eje de desplazamientos, y  $\omega^2 u_y$  en el eje de aceleración; esta última cantidad multiplicada por la masa da la fuerza de fluencia del sistema ( $F_y$ ), la cual, en el caso de un sistema elastoplástico, es a su vez la resistencia máxima del sistema. En la region de amplificación del espectro, entre 0.15 cps y 10 cps, las ordenadas espectrales se obtienen utilizando factores asociados a la media-mas-una-desviación-estándar ( $\psi_{\mu}+\sigma_{\mu}$ ) dados en la tabla 9 para  $\mu=5$ : 0.44, 0.5, y 1.02 para las regiones de desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente. Entonces, las ordenadas espectrales son:  $44\cdot 0.44=19\text{ cm}$ ,  $85\cdot 0.5=43\text{ cm/sec}$ , y  $1g\cdot 1.02=1.02g$ . El espectro se completa con zonas de transición: en la frecuencia mas baja (0.05 cps) la ordenada espectral es  $d_{max}/\mu=44/5=8.8\text{ cm}$ , en la frecuencia mas alta (33 cps) la ordenada espectral es  $a_{max}\mu^{-0.07}=0.89g$  (ver Riddell y Newmark, 1979b). El espectro inelástico completo se presenta en la fig. 17.

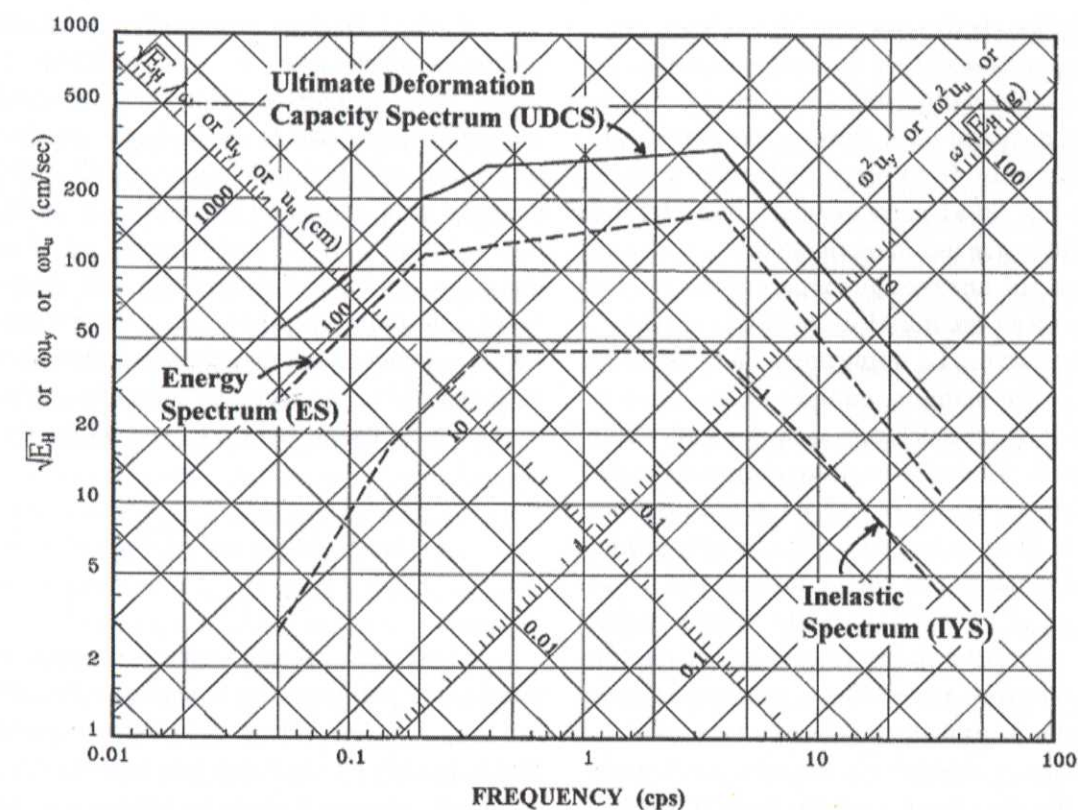


Figura 17. Espectros de diseño inelástico, de energía histerética, y de capacidad de deformación requerida para ductilidad  $\mu=5$  y movimiento de diseño dado por  $d_{max}=44\text{ cm}$ ,  $v_{max}=85\text{ cm/sec}$ , y  $a_{max}=1g$ .

El segundo espectro de interés es el de deformación total (TDS), que simplemente entrega la máxima deformación del sistema  $u_{max}=\mu u_y$ . Se obtiene multiplicando el IYS por  $\mu$ . En este caso, el eje relevante del diagrama logarítmico tripartito es el eje de desplazamientos, que corresponde a  $u_{max}$ . Aunque este tipo de representación espectral ha estado disponible por mas de 40 años, es menos conocido; deberá hacerse mas popular en la medida que crece el interés por la estimación de desplazamientos en conexión con el diseño basado en desempeño. Este espectro no se incluye en la fig. 17 para mayor claridad de ella.

### Consideraciones sobre el daño

Bastantes trabajos se han realizado con el objeto de comprender mejor los factores que controlan el daño estructural y el colapso como

resultado de un terremoto. Una presentación y discusión del tema excede el objetivo de este artículo. Varias referencias claves sobre el tema se entregan en el artículo de Riddell y García (2001), las que a su vez contienen abundante bibliografía. Parece haber acuerdo en que el daño estructural ocurre no solo debido la máxima deformación o máxima ductilidad desarrollada, sino también se asocia a la energía histerética disipada por la estructura. Park y Ang (1985) propusieron un modelo simple para la evaluación del daño sísmico de estructuras de hormigón armado:

$$D_{PA} = \frac{u_{max}}{u_u} + \beta \frac{mE_H}{F_y u_u} \quad (40)$$

donde  $u_{max}$  es la deformación máxima debida a la excitación sísmica, (como se definió antes),  $u_u$



es la capacidad de deformación última bajo carga monotónica cuasi-estática,  $F_y$  es la resistencia de fluencia (como se definió antes),  $mE_H$  es la energía histerética disipada total,  $\beta$  es un parámetro que pondera el efecto de la carga cíclica en el daño estructural, y  $D_{PA} \geq 1$  corresponde a daño total o colapso. Notar que  $u_{max}/u_u$  sería igual a 1 si  $u_{max}$  se midiera en un ensayo de carga cuasi-estático monotónico, a su vez  $mE_H/F_y u_u$  también sería igual a 1 en ese ensayo. La implicancia de la ec. 40 es que bajo carga sísmica, cuando tiene lugar la disipación de energía cíclica,  $u_{max}$  no puede alcanzar  $u_u$ . Valores de  $\beta$  basados en datos empíricos (Park y Ang, 1985) varían entre -0.3 y 1.2, con una media de 0.15 (Chai et al, 1995). Ya que este último valor ha sido usado por varios autores,  $\beta=0.15$  se utilizará en el ejemplo siguiente. Mayor información y elaboración sobre valores apropiados de  $\beta$  para diferentes materiales y configuraciones estructurales es probablemente una necesidad.

Usando el espectro de energía presentado aquí, combinado con el espectro tipo Newmark-Hall, se puede hacer una estimación simple de la capacidad de deformación que se requiere suministrar a una estructura. En efecto, tomando  $D_{PA}=1$ , la deformación última debe satisfacer:

$$u_u > u_{max} + \beta \frac{mE_H}{F_y} \quad (41)$$

recordando que  $u_u$  es la capacidad de diseño basada en ensayos cuasi-estáticos monotónicos y en el conocimiento disponible de ese tipo de comportamiento, mientras el segundo miembro de la ec. 41 contiene las variables de la respuesta sísmica. Éstas últimas se leen directamente del espectro presentado mas arriba; en efecto,  $u_{max}$  es el TDS,  $F_y/m$  es el IYS pero leído en el eje de aceleración (o  $IYS \cdot \omega^2$  si se lee en el eje de desplazamiento), y  $E_H$  es  $ES$  al cuadrado. En forma simbólica, para cada frecuencia, la ec. 41 puede escribirse como

$$UDCS > TDS + \beta \frac{ES^2}{IYS} \quad (42)$$

donde UDCS es el espectro de capacidad última de deformación. En otras palabras, UDCS indica la capacidad de deformación monotónica requerida para que la estructura sobreviva el terremoto de diseño sin colapsar. El UDCS de acuerdo a la ec. 42 se presenta en la fig. 17, naturalmente UDCS debe leerse en el eje de desplazamiento. Notar también que diferentes niveles de daño aceptable, i.e., objetivo de desempeño, pueden establecerse tomando diferentes valores de  $D_{PA}$ , por ejemplo, tomando  $D_{PA}=0.5$  la condición de diseño dada por la ec. 41 queda

$$u_u > 2 \left( u_{max} + \beta \frac{mE_H}{F_y} \right) \quad (43)$$

El atractivo de esta expresión es que la cantidad entre paréntesis en el segundo miembro no cambia, i.e., se obtiene del mismo espectro de diseño basado en el mismo movimiento del suelo de diseño, pero ciertamente se debe suministrar mayor capacidad de desplazamiento a la estructura si se desea un mejor desempeño. La implicancia de lo anterior es que el diseño por desempeño no necesita especificarse por medio de un conjunto de movimientos del suelo de diferentes intensidades, sino a través de un movimiento de diseño con el desempeño controlado por los parámetros de diseño seleccionados ( $F_y$  or  $\mu$ ) y la capacidad de deformación monotónica suministrada ( $u_u$ ). Finalmente, es relevante mencionar que tal enfoque alternativo al control de daño ha sido propuesto por Fajfar (1992) en términos del concepto de "ductilidad equivalente", que corresponde a una ductilidad límite que no puede ser excedida de modo de satisfacer un nivel de desempeño dado (daño admisible). Como consecuencia del deterioro resultante del comportamiento cíclico inelástico, la ductilidad equivalente  $\mu_{max}$  es menor que capacidad última de ductilidad  $\mu_u$  determinada bajo carga monotónica. El método requiere estimar un parámetro que depende de  $E_H$  y  $u_{max}$ , el cual se puede obtener con facilidad de los espectros de energía y deformación total presentados en este artículo.

## Resumen y conclusiones

Con este estudio se ha intentado contribuir a una mayor comprensión del fenómeno de disipación de energía histerética en sistemas de un grado de libertad, motivado por reconocer que la disipación de energía es una forma de daño estructural y por tanto juega un importante rol en la evaluación del desempeño sísmico. Una investigación básica se realizó para identificar índices de intensidad del movimiento del suelo que presentaran buena correlación con las energías de input e histerética y con las ordenadas espectrales elásticas e inelásticas. Se concluyó que: a) ningún índice presenta correlación satisfactoria con la energía o las ordenadas espectrales simultáneamente en las tres regiones del espectro, b) los parámetros máximos del movimiento del suelo presentan buena correlación con las variables de interés, y c) índices compuestos de la forma  $I=Q^{\gamma_1} t_d^{\gamma_2}$ , donde  $Q$  es el máximo del movimiento del suelo (desplazamiento, velocidad o aceleración) y  $t_d$  es la duración significativa del movimiento, se recomiendan como los mas apropiados para normalizar espectros de energía, tanto porque que la incorporación de  $t_d$  reduce la incertidumbre, como porque los parámetros del movimiento del suelo pueden predecirse con relativa facilidad.

El paso siguiente fue el análisis estadístico de los espectros de energía calculados para 52

registros sísmicos, con el objeto de producir reglas para la construcción de espectros de energía disipada aplicando factores de amplificación al movimiento del suelo de diseño, en forma muy similar al método de Newmark-Hall, aunque algo mas elaborado en este caso porque el espectro trilineal obtenido no resulta paralelo a los ejes del diagrama logarítmico tripartito. Se presentan factores para construir espectros de energía para sistemas elastoplásticos, bilineales, y con degradación de rigidez, incluyendo estadísticas que permiten generar espectros asociados a diferentes probabilidades de excedencia.

Finalmente, basándose en el modelo de daño de Park y Ang, y utilizando el espectro de energía propuesto combinado con espectros del tipo Newmark-Hall, puede estimarse la capacidad de deformación requerida por una estructura para diferentes niveles deseados de desempeño. El espectro de energía presentado completa la información sobre la respuesta sísmica de sistemas de un grado de libertad, estableciéndose la relación entre *resistencia, ductilidad, disipación de energía y daño estructural*. Naturalmente, la confiabilidad de las evaluaciones o predicciones de daño dependerán fundamentalmente de la calidad del modelo de daño utilizado.

## Referencias

- Araya, R y R Saragoni (1980), Capacidad de los movimientos sísmicos de producir daño estructural, SES I 7/80 (156), Universidad de Chile, Santiago.
- Arias, A (1970), A measure of earthquake intensity, in Seismic Design for Nuclear Power Plants, MIT Press.
- Blume, J A, N M Newmark y L H Corning (1961), Design of multistory reinforced concrete

buildings for earthquake motions, Portland Cement Association, Skokie, Illinois.

- Buoc, R (1967), Forced Vibration of mechanical systems with hysteresis, Proceedings of the 4th Conference on Nonlinear Oscillators, Praga, Checoslovaquia.
- Chai, Y H, K M Romstad y S M Bird (1995), Energy-based linear damage model for high intensity seismic loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121.
- Chopra, A K (1995), Dynamics of Struc-



tures, Prentice-Hall Inc.

- Clough, R W (1966), Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements, Report No. 66-16, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
- Fajfar, P, T Vidic, y M Fischinger (1990), A measure of earthquake motion capacity to damage medium-period structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 9, N° 5.
- Fajfar, P (1992), Equivalent ductility factors taking into account low-cycle fatigue, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21.
- Housner, G W (1952), Spectrum intensities of strong motion earthquakes, Proceedings of the Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, EERI, California.
- Housner, G W y P C Jennings (1964), Generation of artificial earthquakes, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 90, EM1.
- Housner, G W (1970), Strong Ground Motion, Chapter 4 in *Earthquake Engineering*, R.L. Wiegel editor, Prentice-Hall Inc.
- Housner, G W (1970), Design Spectrum, Chapter 5 in *Earthquake Engineering*, R.L. Wiegel editor, Prentice-Hall Inc.
- Housner, G W (1975), Measures of severity of earthquake ground shaking, Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI, Ann Arbor, Mi.
- Housner, G W y P C Jennings (1980), Earthquake design criteria, Monograph Series, Earthquake Engineering Research Institute, California.
- Kato, B y H Akiyama (1975), Energy input and damages in structures subjected to severe earthquakes, *A.I.J.*, N° 235.
- Lange, J G (1968), Una medida de intensidad sísmica, Departamento de Obras Civiles, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Miranda, E (1993), Site-dependent strength-reduction factors, *Journal of Structural Engrg.*, ASCE, Vol. 119, No. 12.
- Nau, J M y W J Hall (1982), An evaluation of scaling methods for earthquake response spec-

tra, Structural Research Series N° 499, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Ill.

- Newmark, N M y W J Hall (1969), Seismic design criteria for nuclear reactor facilities, 4th WCEE, Vol. 3, Chile.
- Newmark, N M, W J Hall y B Mohraz (1973), A study of vertical and horizontal earthquake spectra, U.S. Atomic Energy Commission Report WASH-1225, Washington D.C.
- Newmark, N M y W J Hall (1973), Procedures and criteria for earthquake resistant design, *Building Practices for Disaster Mitigation*, National Bureau of Standards, Building Science Series N° 46.
- Ordaz M y L Perez-Rocha (1998), Estimation of strength-reduction factors for elastoplastic systems: A new approach, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, No. 9.
- Otani, S y M A Sozen (1972), Behavior of multistory reinforced concrete frames during earthquakes, Structural Research Series N° 392, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Ill.
- Park, Y-J y A H-S Ang (1985), Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 111, 4.
- Park, Y-J, A H-S Ang y Y K Wen (1985), Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 111, 4.
- Ramberg, W y W T Osgood (1943), Description of stress-strain curves by three parameters, Technical Note 902, NACA.
- Riddell, R y N M Newmark (1979a), Force-deformation models for nonlinear analysis, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 105, ST12.
- Riddell, R y N M Newmark (1979b), Statistical analysis of the response of nonlinear systems subjected to earthquakes, Structural Research Series N° 468, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Riddell, R (1980), Effect of damping and type of material nonlinearity on earthquake re-

sponse, 7th WCEE, Vol. 4, Turkey.

- Riddell, R (1995), Inelastic design spectra accounting for soil conditions, *Earthquake Engrg. and Structural Dynamics*, Vol. 24, No. 11.
- Riddell, R y J E García (2001), "Hysteretic energy spectrum and damage control", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 30, N° 12, pp. 1791-1816.
- Riddell, R, J E García y E Garcés (2002), "Inelastic deformation response of SDOF systems subjected to earthquakes", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, N° 3.
- Takeda, T, M A Sozen, y N N Nielsen (1970), Reinforced concrete response to simulated earthquakes, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 96, No. ST12.
- Trifunac, M D y A G Brady (1975), A study on the duration of strong earthquake ground motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, 3.
- Veletsos, A S y N M Newmark (1960), Effect of inelastic behavior on the response of simple

systems to earthquake motions, Proceedings of the 2WCEE, Vol. 2, Japan.

- Veletsos, A S y N M Newmark (1964), Response spectra for single-degree-of-freedom elastic and inelastic systems, Report No. RTD-TDR-63-3096, Vol. III, Air Force Weapons Laboratory, Albuquerque, N. Mex.
- Veletsos, A S (1969), Maximum deformation of certain nonlinear systems, Proceedings of the 4th WCEE, Vol. I, Chile.
- Wen, Y K (1976), Method for random vibration of hysteretic systems, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 102, EM2, pp 249-263.
- Zahrah, T y W J Hall (1982), Seismic energy absorption in simple structures, Structural Research Series N° 501, Department of Civil Engineering, University of Illinois, Urbana, Illinois.