

ESTUDIOS DE GEOGRAFÍA

Volumen 7

EL AGUA EN EL ECUADOR

Clima, precipitaciones, escorrentía

Pierre Pourrut

Editor científico



ORSTOM

l'institut français de
recherche scientifique
pour le développement
en coopération



**CORPORACION
EDITORA NACIONAL**



7

Estudios de Geografía

Pierre Pourrut
Editor científico

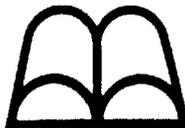
EL AGUA EN EL ECUADOR *Clima, precipitaciones, escorrentía*



l'institut français de
recherche scientifique
pour le développement
en coopération



**Colegio de Geógrafos
del Ecuador**



**CORPORACION
EDITORIA NACIONAL**

con la colaboración de:
Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI)
Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG)

Quito, 1995

CORPORACIÓN EDITORA NACIONAL

Hernán Malo González (1931-1983)

Presidente Fundador

Ernesto Albán Gómez

Presidente

Luis Mora Ortega

Director Ejecutivo

COLEGIO DE GEÓGRAFOS DEL ECUADOR

Nelson Gómez

Presidente

Freddy López

Vicepresidente

Mario Andino

Tesorero

Blanca Carrera

Secretaria

Estudios de Geografía COMITÉ EDITORIAL

René Marocco

Luis Mora

Guillermo Bustos

6. EL AGUA EN EL ECUADOR Clima, precipitaciones, escorrentía

Impreso y hecho en el Ecuador

*Traducción, diagramación y dibujo en
computador (a partir de la versión francesa):*

María Dolores Villamar

Impresión: RR Editores Asociados,
Calle Principal y Tercera transversal,
Urbanización La Pulida, Quito

ISBN: 9978-84-035-4 Colección
9978-84-222-5 Volumen 7

Derechos de autor: Inscripción 009300,
Depósito legal 000815

Cubierta: Cuadro de Olmedo Cuyo
Toaquizza, fotografía de Michel Portais

Corporación Editora Nacional

Roca 230 y Tamayo,

Teléfono (593-2) 554358-558,

Fax (593-2) 566340,

Apartado 17-12-886,

Quito, Ecuador

Colegio de Geógrafos del Ecuador

Apartado 17-08-8505,

Quito, Ecuador

*Lista alfabética
de los colaboradores asociados a los estudios,
por pertenencia institucional*

BURGEAP

Lucien Bourguet

INAMHI

Galo Lozada

Jorge Meneghine

Miguel Rodríguez

CRM

Mayer Sabando

INERHI

Miguel Alemán

Fernando Barriga

W. Echeverría

Vicente Jiménez

H. Lizarzaburu

Hernán Orellana

Ernesto Parra

Jaime Peñafiel

Marco Quirola

Ángel Segovia

Alfredo Silva

Carlos Solórzano

Galo Toscano

Homero Villacrés

PRONAREG-MAG

Víctor Aguayo

Leonardo Astudillo

Alejandro Bermeo

Fabían Burbano

Marcelo Cisneros

Roberto Cruz

Víctor Estay

Gustavo Gómez

Ramiro Larreátegui

Iván Leiva

Juan Merchán

Eugenio Pesantes

Iván Romo

Óscar Róvere

Marcelo Sáenz

Bella Vélez

EMAP-Q

Rafael Alulema

Galo Chávez

Guillermo Dávila

José Ojeda

Gustavo Ruiz

(Los nombres de los principales colaboradores aparecen en negrillas y cursivas.)

Nota: Una omisión, siempre posible, sería totalmente involuntaria.

Agradecimientos

Los autores del presente libro desean agradecer en general a los colegas del ORSTOM de otras disciplinas y a los ingenieros y técnicos de las contrapartes ecuatorianas quienes, con el mismo entusiasmo desinteresado, trabajaron hombro con hombro durante largos años, a fin de producir, a la brevedad posible, los elementos capaces de contribuir a un desarrollo armónico del sector rural ecuatoriano. La participación de todos fue determinante para la obtención de los resultados temáticos aquí presentados, pero es justo mencionar especialmente a:

- *Michel Portais y François Vicariot, sucesivos Representantes del ORSTOM en el Ecuador,*
- *Enrique Suárez, Director del PRONAREG, incansable pionero de la regionalización agraria,*
- *Roberto Cruz, responsable ecuatoriano de los estudios hidrológicos.*

Por otra parte, Pierre Pourrut desea expresar su inmensa gratitud a Bernard Pouyaud, hasta 1994 responsable del Departamento Aguas Continentales (DEC) del ORSTOM, al igual que a Frédéric Moniod, Vice-Presidente de la Comisión Científica de Hidrología-Edafología y responsable de la Unidad de Investigación 2E, quienes le autorizaron a tomar la distancia necesaria y le dieron el espacio de libertad suficiente para concebir esta obra. Desea también mencionar la valiosa participación de los colegas coautores de esta publicación, en especial la de Jean-François Nouvelot.

ÍNDICE

	página		página
Índice	iii	Artículo V	
Presentación	v	Anomalías y fenómenos climáticos extremos	
Preámbulo	vii	Pierre Pourrut, Jean-François Nouvelot	67
A manera de introducción		Artículo VI	
Bernard Pouyaud	ix	Estimación de los escurrimientos superficiales de aguas altas y análisis de las relaciones lluvia-escorrentía	
Artículo I		Éric Cadier, Georges Girard,	
Estudios hidroclimatológicos: marco, crónica y aspectos metodológicos sucintos		Jean-François Nouvelot, Pierre Pourrut,	
Éric Cadier, Pierre Pourrut, Michel-Alain Roche,		Michel Travaglio, Rafael Aulema,	
Roberto Cruz, Gustavo Gómez,		Iván Leiva, Fabián Burbano, Roberto Cruz	77
Alejandro Bermeo, Galo Toscanot	1	Artículo VII	
Artículo II		Los regímenes hidrológicos ecuatorianos	
Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos		Pierre Pourrut, Gustavo Gómez	103
Pierre Pourrut, Gustavo Gómez,		A manera de conclusión	
Alejandro Bermeo, Angel Segovia	7	Frédéric Moniod	109
Artículo III		Bibliografía	111
Clima del Ecuador		Abreviaciones y siglas utilizadas	113
Pierre Pourrut, Oscar Róvere, Iván Romo,		Contenido	115
Homero Villacrés.....	13	Lista de figuras	117
Artículo IV		Lista de cuadros	118
Análisis estadístico y regionalización de las precipitaciones en el Ecuador		Lista de mapas	118
Jean-François Nouvelot, Patrick Le Goulven,			
Pierre Pourrut, Miguel Alemán.....	27		

No existe en el Ecuador recurso más importante que el agua.

Después de varios años de inventario de los recursos naturales renovables, los equipos ecuatoriano-franceses del PRONAREG-ORSTOM llegaron a esa conclusión. Ya sea en la península de Santa Elena, o bien en el valle del Chota, en Tungurahua o en Loja, el acceso al agua es a menudo más importante que el acceso a la tierra. Además, en el callejón interandino, las desigualdades de riqueza potencial están estrechamente vinculadas al acceso al agua.

Así, se puso de relieve que, para lograr una regionalización agraria en zonas agrícolas homogéneas, los principales factores de diferenciación eran los valores de precipitaciones y el porcentaje de tierras regadas. El valor de los suelos vendría después. Finalmente, los estudios sobre sistemas de producción mostraron que los conflictos por el acceso al agua eran a menudo más decisivos que aquellos por el acceso a la tierra.

Por todas estas razones, una vez terminado el programa de regionalización agraria, el INERHI y el ORSTOM llevaron a cabo un importante proyecto pluridisciplinario de investigación sobre el riego, en sus aspectos tanto hidrológicos como socio-económicos. Los resultados básicos fueron presentados en numerosas publicaciones y dieron lugar a un banco de datos informatizado (BIDRIE) que quisiéramos sea accesible para todos.

Hoy en día, el 70 % de la energía eléctrica en el Ecuador es de origen hidráulico y el sector atraviesa una trágica crisis que los responsables políticos intentan atribuir principalmente a las irregularidades del clima.

El conocimiento de datos hidro-climatológicos confiables y la calibración de modelos de flujo de las aguas y de manejo de los recursos hídricos constituyen entonces factores decisivos en el desarrollo económico del país. A eso se orienta el actual programa « Inundaciones y Sequías en el Ecuador » (INSEQ) desarrollado por el INAMHI y el ORSTOM.

Sin embargo, los excelentes trabajos realizados en materia de hidro-climatología ponen de relieve la necesidad de emprender en el Ecuador una nueva etapa de conocimiento del agua. En efecto, en el campo de los estudios ambientales, mucho se ha hecho sobre la vegetación, los suelos, el aire, pero todavía la contaminación de las aguas por la urbanización, la industrialización y la explotación minera no ha sido objeto de una suficiente atención por parte de los científicos.

Nuestros ríos y lagos son actualmente medios en donde la vida desaparece y los males se propagan.

Será pues necesario que se impulsen investigaciones en hidrobiología, complementarias a los trabajos fundamentales en hidrología cuya síntesis nos presenta Pierre Pourrut en este libro.

Pierre Pourrut, mi colega en el ORSTOM, quien fue también durante seis años Representante de nuestro Instituto en el Ecuador y eminente miembro del Colegio de Geógrafos de este país, siempre tuvo un agudo sentido de la responsabilidad del investigador frente a las demandas de la sociedad en el Ecuador.

Sus investigaciones tuvieron siempre como finalidad el desarrollo y la protección del patrimonio común y dieron lugar a una verdadera cooperación con numerosos ingenieros y científicos ecuatorianos asociados a esas investigaciones.

Estoy seguro de que la presente obra constituye un instrumento esencial para la capacitación de los jóvenes ingenieros hidrólogos ecuatorianos.

Así, es con gran sinceridad y toda mi amistad que le agradezco por la síntesis que nos permite, ahora, ofrecer al público ecuatoriano y a los hidro-meteorólogos de lengua española.

Michel Portais
Representante del ORSTOM
en el Ecuador

Preámbulo

Los estudios relativos a los recursos hídricos, al igual que todos los estudios emprendidos por el ORSTOM en el Ecuador, se desarrollan en el marco del acuerdo general de cooperación cultural, científica y técnica entre este país y Francia, suscrito el 13 de abril de 1954. Por otra parte, un acuerdo firmado directamente con el gobierno ecuatoriano en abril de 1988 establece las modalidades de intervención del ORSTOM en el Ecuador.

Los resultados aquí presentados son el fruto de investigaciones realizadas en estrecha colaboración con contrapartes ecuatorianas constituidas por organismos públicos y entidades de educación superior. Sin excepción alguna, dieron lugar a la suscripción de acuerdos específicos que definían el objeto de la cooperación, la respectiva participación y las diversas condiciones de funcionamiento y de financiamiento. Se debe citar en particular el acuerdo firmado el 13 de julio de 1974 entre el ORSTOM y el Ministerio ecuatoriano de Agricultura y Ganadería (MAG) con el objeto de realizar estudios integrales de regionalización agraria. Estos se desarrollaron en el seno del Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG) y el acuerdo fue renovado en dos ocasiones, el 26 de mayo de 1977 y el 16 de marzo de 1982. En 1986, las investigaciones se ampliaron a temas más específicos: formulación de un plan nacional de riego con el Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI), estimación de la erosión e instauración de prácticas de conservación de suelos con la Dirección Nacional Agrícola (DNA). Además, en 1993, se inició, en colaboración con el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI), un programa de estudio de las Inundaciones y Sequías en el Ecuador (INSEQ).

Para definir mejor las circunstancias que dieron origen a esta obra, al contexto legal que se acaba de evocar deben agregarse condiciones de orden histórico y coyuntural. Abordémoslas el 9 de enero de 1976, fecha en que Pierre Pourrut era recibido en Quito por Eric Cadier, miembro de un grupo pluridisciplinario binacional al que se le había encargado la misión, en ese entonces de vanguardia, de establecer un diagnóstico sintético regional con miras a favorecer el desarrollo agro-silvo-pastoral del país en su conjunto; actuando como pionero, se esforzaba, desde 14 meses atrás, en sentar las primeras bases metodológicas destinadas a introducir los resultados de una hidrología, que seguía siendo tradicional, dentro de estudios

para los cuales el calificativo de « integrados » aún estaba desprovisto de un verdadero sentido.

Para el recién llegado era el inicio de una estadía de cerca de quince años durante la cual iría a acoger a su vez a los hidrólogos cuyos nombres están asociados a esta obra, que vinieron al Ecuador por períodos que iban desde algunos meses hasta cinco años. Esta permanencia lo llevó, a diversos niveles, a participar en el diseño y la ejecución de todos los programas de investigación en hidroclimatología, hidrogeología y evaluación de los recursos hídricos, erigiéndose de esa manera en una suerte de « memoria ». Es por ello que, antes de que los recuerdos que conserva se desvanezcan, sus responsables científicos creyeron útil la elaboración de una síntesis de los principales resultados obtenidos. Con el aval de los hidrólogos que trabajaron en el Ecuador, asumió el papel de coordinador de tal síntesis.

Esta síntesis condensa y resume un enorme trabajo de inventario y análisis regional realizado desde 1975 por equipos de investigadores y técnicos del MAG, del INERHI, del INAMHI y del ORSTOM, y que se concretó oportunamente en más de 4.000 páginas de textos e informes.

La presente síntesis, por su brevedad, puede esconder la importancia del trabajo de base realmente efectuado. Su ambición es doble:

1. Pretende ante todo ser un texto práctico de referencia para los hidrólogos o especialistas que se interesaren en esta región. Así, presenta un orden de magnitud de los principales parámetros climáticos e hidrológicos y un panorama global de los regímenes y recursos hídricos explotables. El período considerado para los cálculos se detiene en 1987, y en el mejor de los casos en 1988, pues la información más reciente no estaba disponible. Por otro lado, dada la pésima calidad de buena parte de los datos básicos, se debe señalar que ciertos criterios estadísticos fueron a veces descartados en favor de una interpretación subjetiva derivada de la experiencia en el terreno, opción que probablemente podrá ser cuestionada.

2. Pretende también ser sintética e ir más allá de una simple exposición de resultados. Es por ello que ciertos textos se dedican a descifrar los lógicos procesos que rigen la trilogía « condiciones naturales/elementos del balance hídrico/recursos » o intentan dilucidar la variabilidad, las interacciones y por lo tanto el respectivo papel de los agentes responsables de problemas hídricos o climáticos específicos.

A manera de introducción

Aparte del honor y el placer (en ocasiones también la envidia), de firmar órdenes de comisión o de asignación de investigadores del Departamento Aguas Continentales (DEC) del ORSTOM, enviados a este maravilloso país que es el Ecuador, no habría encontrado una razón que no fuera la amistad para que Pierre Pourrut me pidiera redactar un prefacio « inspirado » para esta obra colectiva, síntesis esperada de veinte años de cooperación « orstomiana » con nuestras contrapartes ecuatorianas en el campo del agua.

Recordando ciertas vivencias personales, ligadas a aspectos más biológicos que cuantitativos del ámbito acuático ecuatoriano, durante mis cortos y muy raros viajes al Ecuador, con los pies en el agua a la sombra de los volcanes (en particular el Cayambe), no podía sino aceptar, diciéndome que tal vez, en un día próximo, una presentación oficial de esta obra cuyo prefacio habría escrito, justificaría nuevamente mi presencia en ese país, nuevo pretexto para las vivencias antes citadas.

Por mi relación personal con los principales actores hidrológicos de esta presencia del ORSTOM en el Ecuador (E. Cadier, J.-F. Nouvelot, P. Pourrut, P. Le Goulven), sé del cariño que los une a esa tierra y por lo tanto del interés con el que han contribuido a concretar esta obra colectiva.

Pues el Ecuador es un país sumamente atractivo, probablemente porque, como Francia pero en otro registro, es también extremadamente variado, testimonio de todas las facetas que ofrece un entorno tropical, desde sus confines oceánicos de esteros y lagunas hasta las cimas volcánicas y glaciares de las dos cordilleras andinas separadas por el callejón interandino, antes de la inmensa cuenca amazónica y sus enormes ríos que drenan las estribaciones orientales de los Andes.

En el primer artículo, tres de los principales investigadores hidrólogos que se sucedieron en el Ecuador, unidos a sus contrapartes nacionales, presentan las metodologías aplicadas a sus trabajos de inventario inicial de los recursos hídricos. Ellas les permitieron, ya en 1979, proporcionar a los utilizadores potenciales un conjunto de mapas en los que se sintetizaban todos los datos reunidos y elaborados durante sus trabajos al finalizar las dos etapas de síntesis, regional y nacional.

El segundo artículo trata de los factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos y pone en evidencia los múltiples contrastes, de latitud, de proximidad o de alejamiento del océano y de la llanura amazónica, pero sobre todo de altitud y de orientación frente a los vientos dominantes, que confieren a los climas y regímenes hidrológicos ecuatorianos toda su rica diversidad.

El artículo III intenta describir el clima (o más bien los climas) del Ecuador. No se vacila en aportar una contribución a las obras de los grandes « clasificadores » proponiéndose una clasificación original de los climas ecuatorianos que tiene el mérito al menos de ser comprensible para un hidrólogo...

El artículo IV, que hace el análisis estadístico y propone una regionalización de las precipitaciones en el Ecuador, es seguramente el más importante y el más original de esta obra. Asocia dos enfoques complementarios. El primero, tradicional, resulta en una definición somera de normas pluviométricas utilizables en el Ecuador. El segundo, más moderno, propone una zonificación más exacta limitada al Norte del país, después de un análisis crítico (y en ocasiones una propuesta de corrección) de los datos, con una aplicación a la cuenca del río Mira. El estudio relativo a las intensidades pluviográficas es particularmente importante cuando se conocen los problemas de erosión que afronta el Ecuador. Asimismo, la homogeneización de las pluviometrías de la cuenca del Mira es el pretexto para un estudio sumamente interesante de las relaciones entre precipitaciones y altura. Finalmente, se evidencia la utilidad de los métodos propuestos para el manejo del recurso confrontado con las necesidades actuales y previsibles.

En el artículo V, los autores toman en cuenta las anomalías y los fenómenos climáticos extremos vinculados a la especificidad geográfica y climática del Ecuador. Los fenómenos El Niño son tratados evidentemente desde la óptica del hidrólogo. Se da un lugar especial al Niño de 1982-1983 y a sus consecuencias hidrológicas.

El artículo VI tiene como objetivo un estudio de la escorrentía de aguas altas y el análisis de las relaciones lluvia-escorrentía superficial. Se trata generalmente de un enfoque hidrológico tradicional, con las dificultades que se presentan habitualmente para evaluar el caudal de crecidas que pueden ser extraordinariamente fuertes como es el caso de las cuencas urbanas o de las regiones costaneras sometidas a la influencia del fenómeno El Niño.

El séptimo y último artículo hace una tentativa de definición y clasificación de los regímenes hidrológicos especialmente a partir de sus características hidrográficas y por supuesto hidrológicas. Es muy difícil expresar una preferencia entre el régimen pluvial tropical árido de la provincia meridional al cual los fenómenos episódicos de El Niño confieren una irregularidad interanual probablemente muy cercana a los récords a nivel

planetario, y el régimen glacio-nival de montaña de rico potencial en pesca...

El lector encontrará en esta colección de artículos un amplio panorama de la realidad tan diversificada de la hidrología ecuatoriana. Evidentemente, se debe felicitar a Pierre Pourrut primeramente por haber tenido la idea de realizar esta obra y luego por su perseverancia para llevarla a buen término animando así un equipo de redactores eméritos, aunque a menudo dispersos desde entonces en algunos países.

Esta obra, publicada inicialmente en francés, presenta entonces más de veinte años de estudios hidrológicos realizados en el Ecuador por varias entidades nacionales en colaboración con el ORSTOM, y constituirá un compendio y una referencia obligada. Así, a fin de marcar de manera sintética para nuestras contrapartes

nacionales la originalidad de nuestro aporte al conocimiento de su potencialidad hidrológica, tanto en sus insuficiencias como en sus excesos, hemos considerado importante que un compendio tan conciso y accesible sea traducido al español, lo que se concreta en la presente edición. Cumplido este segundo objetivo, ¿no sería tal vez igualmente importante, para dar a esta obra un público que supere el de la comunidad científica de idiomas latinos, editar una versión en inglés que sería ampliamente difundida?

Bernard Pouyaud
ex-Director del Departamento
Aguas Continentales
del ORSTOM

ARTÍCULO I

**ESTUDIOS HIDROCLIMATOLÓGICOS;
MARCO, CRÓNICA Y
ASPECTOS METODOLÓGICOS SUCINTOS**

*Éric Cadier, Pierre Pourrut, Michel-Alain Roche,
Roberto Cruz, Gustavo Gómez, Alejandro Bermeo, Galo Toscano†*

Este artículo se limita a exponer el contexto y luego a explicar el camino lógico que guió la definición de las diversas fases de estudio con miras a la obtención de los resultados esperados. Como se puede suponer por la amplitud del tema y la extensión del período considerado, se trata más de la presentación de un catálogo de los trabajos realizados que del análisis de la consistencia de los resultados obtenidos.

I. Lugar del hidrólogo en el contexto de los estudios realizados por el ORSTOM en cooperación con el Ecuador

Originalmente, fue en el marco general de la óptima utilización de los recursos naturales renovables, objetivo hoy en día prioritario para numerosos países, en donde se inscribían los estudios emprendidos en 1974 por el ORSTOM en cooperación con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) del Ecuador. Así, varias decenas de investigadores franceses y de especialistas ecuatorianos del Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG), se dedicaron a la vasta tarea de inventario y evaluación de los potenciales nacionales, con miras al establecimiento de una planificación de su óptima utilización, orientada hacia una programación integrada del desarrollo agro-económico del país.

Obligados a adaptar sus metodologías particulares a las limitaciones de una acción pluridisciplinaria, los científicos debieron igualmente plegarse a una situación dada y abandonar la aplicación de métodos óptimos convenientes, a menudo demasiado largos, a fin de alcanzar los objetivos fijados dentro de los plazos impartidos. Así, las metodologías disciplinarias aplicadas presentan más

de un aspecto original: debían a la vez garantizar la necesaria coherencia de los diversos parámetros propuestos y permitir considerar elementos cifrados escogidos para cada especialidad a fin de realizar la síntesis común, fundamento de la regionalización.

Finalmente, la metodología hidrológica elaborada se singularizó por los siguientes aspectos:

- 1** - un inventario de los datos existentes y luego un análisis crítico de los mismos por « muestreo aleatorio », fase acompañada de salidas al campo lo más completas posibles para orientar las muestras de control y la interpretación de las etapas subsiguientes;
- 2** - una generación espacial de la información apoyándose en la noción representada cartográficamente de « zona hidrológica homogénea » con base en criterios físico-geo-climáticos escogidos minuciosamente;
- 3** - una descripción de los recursos hídricos mediante algunos parámetros de fácil acceso y generalmente representables cartográficamente (módulos, caudales característicos de estiaje, irregularidad...), índices por cierto destinados a caracterizar el agua disponible en sus aspectos fundamentales, con miras a integrarlos en la síntesis de los factores bio-físicos del desarrollo agro-económico regional.

II. Estudios específicos

Es evidente que la metodología resumida en el capítulo anterior, aunque suficiente a nivel de la planificación, comprendía una importante parte cualitativa, y que los expedientes de factibilidad de los proyectos de desarrollo requerían necesariamente medidas cuantitativas locales (bombeos de prueba, aforos...) a fin de desarrollar el estudio monográfico regional o local.

Es así como, después del primer convenio de tres años de duración destinado a proporcionar las bases teóricas y las grandes orientaciones de una estrategia de intervención regional, se firmó con el PRONAREG un nuevo acuerdo de 5 años de duración. El objetivo general era afinar los conocimientos con miras a constituir un inventario de las *zonas aptas para un ordenamiento del territorio*, evaluar los problemas a afrontarse (distorsión del binomio potencialidades/uso actual) y atribuir un *orden de prioridad* a los acondicionamientos necesarios. El producto científico resultante debía poder ser incorporado fácilmente al Plan Nacional de Desarrollo que, en función de imperativos estratégicos nacionales y regionales, establece la programación de las intervenciones juzgadas oportunas y prevé el financiamiento de las obras correspondientes.

En lo que respecta a los estudios hidrológicos, los términos de referencia del nuevo convenio ponían énfasis en la *cuantificación y el inventario del uso actual y potencial del agua* así como en la determinación de soluciones alternativas que permitan satisfacer la demanda de agua en las regiones en donde la valorización agrícola se consideraba prioritaria.

Rápidamente, se reveló que los estudios hidrológicos requeridos para llevar a buen término tales proyectos no podían emprenderse en el marco del PRONAREG, puesto que, por una parte, esa estructura administrativa del MAG no disponía de recursos financieros suficientes para ello, y por otra, la legislación ecuatoriana atribuye el monopolio de adquisición de datos hidrometeorológicos a una entidad especializada, el Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI). Existen sólo dos excepciones para tal exclusividad, aquella relativa a los organismos regionales de desarrollo que están autorizados a manejar ciertas redes de observación provisional y la correspondiente a las grandes entidades estatales encargadas del manejo de los recursos hídricos tales como el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INERHI), especializado sobre todo en la construcción de obras hidro-agrícolas y la instalación de sistemas de riego, o el Instituto Nacional de Electrificación (INECEL). Así, se tuvo que recurrir a esas entidades y, una vez definidos temas de interés común, se suscribieron acuerdos internos entre el PRONAREG y varios organismos, asumiendo los investigadores del ORSTOM la responsabilidad de los estudios en el plano técnico. Entre los más importantes, se deben citar:

- PRONAREG/INAMHI/INERHI, en el cual los dos institutos pusieron a disposición del grupo de trabajo cierta cantidad de técnicos especializados, refuerzo indispensable para hacer frente a la multiplicación de las labores de oficina y de campo; este convenio permitió también acceder a la totalidad de datos recogidos;
- PRONAREG/INERHI, relativo al estudio de las cuencas

vertientes representativas del río Tinto, en la zona árida de la península de Santa Elena;

- PRONAREG/INERHI/Municipio de Quito, destinado a establecer los balances hídricos, a evaluar los flujos y estimar los parámetros necesarios para la recarga de las napas acuíferas de la cubeta de Quito; el *Bureau d'Études de Géologie Appliquée* (BURGEAP — Oficina de estudios de geología aplicada) y la *École Nationale Supérieure des Mines* (Escuela Nacional Superior de Minas) de París estaban asociados a este estudio que debía desembocar en una modelización acoplada de los flujos de superficie y de subsuperficie;
- PRONAREG/Centro de Rehabilitación de Manabí (CRM), con miras al estudio de las cuencas vertientes representativas del río Banchal, situadas en una zona seca de la provincia de Manabí, y a la planificación de un programa de perforaciones para evaluar lo mejor posible los recursos subterráneos de la provincia;
- PRONAREG/Instituto Nacional Galápagos (INGALA), con el apoyo de la Fundación Charles Darwin, para establecer el inventario exhaustivo y definir la problemática de los recursos hídricos de las cuatro islas habitadas del archipiélago.

Paralelamente, los estudios específicos desarrollados dentro del PRONAREG bajo la dirección de los investigadores del ORSTOM, estaban dedicados prioritariamente a:

- la *planificación del riego* a nivel nacional, trabajos que iban a servir de base, años más tarde, a un programa mucho más ambicioso emprendido desde 1988 por el INERHI y el ORSTOM;
- el *análisis fino de las series pluviométricas* para tratar de definir las correspondientes leyes y elaborar una zonificación nacional;
- la revisión crítica y el *análisis de los flujos* observados en las pequeñas cuencas hidrográficas de la red nacional, con miras a estimar parte de los parámetros hidrológicos tradicionales, en particular las relaciones lluvias-caudales.

III. Breves referencias metodológicas relativas al inventario inicial de los recursos hídricos

Aunque la metodología utilizada para llevar a buen término los primeros estudios hidrológicos en el Ecuador ya fue descrita en uno de los *Cahiers d'Hydrologie* (Cuadernos de Hidrología) del ORSTOM — al que se hace referencia muy a menudo para presentar lo que sigue — y no es sino el residuo de un trabajo mucho más importante, constituye una *« ganancia » exportable* porque puede ser utilizada en otras condiciones geográficas. Por ello, parece útil presentar aquí algunas indicaciones relativas a los diferentes principios de base y

procesos lógicos que prevalecieron en la definición de las etapas de trabajo y la presentación de los resultados.

La secuencia de dos fases sucesivas adoptada para los estudios se deriva directamente de la calidad de la información disponible: hidrometeorológica en el INAMHI, geológica en la Dirección General de Geología y Minas (DGGM) y en la Dirección General de Hidrocarburos (DGH) y finalmente cartográfica y topográfica en el Instituto Geográfico Militar (IGM). La colaboración de estos organismos fue muy valiosa pero el INAMHI merece nuestro especial reconocimiento puesto que puso a nuestra disposición, sin reticencia alguna, todas las observaciones existentes y buscó permanentemente mejorar la calidad de la obtención de los datos de las redes de observación (en la época existían alrededor de 100 estaciones meteorológicas, 200 puestos pluviométricos y 150 estaciones hidrométricas) y de su posterior procesamiento.

Probablemente, lo ideal habría sido disponer de bancos de datos analizados críticamente y exhaustivos relativos a las principales informaciones hidrometeorológicas e hidrogeológicas, así como de estudios monográficos de esos datos por cuenca hidrográfica o por sistema acuífero. Estos habrían proporcionado entonces una información crítica, corregida, e incluso completada y homogeneizada, permitiendo los análisis estadísticos y las síntesis regionales de los diversos recursos hídricos, a partir de los cuales habría sido fácil extraer los parámetros característicos de tales recursos con miras a la planificación de su utilización.

Evidentemente, la realidad era muy diferente. Existían efectivamente series pluviométricas de una duración superior a los 30 años y alrededor de 10 años de observaciones hidrometeorológicas bastante densas en la parte no amazónica del país, pero se trataba de informaciones no reunidas en un banco de datos criticados y que prácticamente no habían dado lugar, con una o dos excepciones, a la elaboración de monografías regionales. Además, como se puede constatar a menudo, el conocimiento de las aguas subterráneas era, fuera de ciertos puntos localizados, muy vago por no decir inexistente.

Dados los plazos impartidos, fue necesario quemar ciertas etapas.

Para ello, se partió del siguiente *postulado*: el planificador no necesita conocer de parámetros hidrológicos sofisticados calculados con gran precisión para estaciones puntuales; lo que le interesa, para confrontar los elementos propicios al desarrollo o los factores limitantes más diversos, es la estimación de los recursos utilizables (sean estos meteóricos, superficiales o subterráneos) en todo punto de la región estudiada, incluso si no se trata sino de valores aproximados.

Este gran principio permitía poner énfasis en la caracterización de los recursos hídricos bajo aspectos simplificados pero fundamentales: abundancia anual, repartición estacional, irregularidad interanual, intensidad de

los extremos (crecidas y estiajes), existencia o inexistencia de acuíferos, etc. Implicaba también una *presentación de resultados fácilmente accesibles* a los agrónomos y economistas encargados generalmente de la planificación de los recursos naturales renovables. Esta intención se concretó de la siguiente manera:

1 - delimitación del período de observación de referencia 1964-1973, que permitía proceder al análisis estadístico y a la homogeneización de los datos (función directa de la densidad de las observaciones) y que podía ser considerado como representativo de los regímenes (problemas planteados por la gran diversidad de condiciones climáticas del país);

2 - selección de los parámetros que, calculados con base en un procesamiento de los datos de observaciones hidroclimatológicas, habitualmente practicado por los hidrólogos, podían integrarse a la síntesis PRONAREG-ORSTOM sobre la zonificación regional de las potencialidades agrícolas, siendo al tiempo fácilmente utilizables por parte de los planificadores:

- *lluvias anuales y distribución mensual* de las precipitaciones;

- *evapotranspiración potencial anual* según la fórmula de Thornthwaite (aproximación escogida ya que no se disponía sino de los valores de temperatura);

- *módulos específicos anuales* (la noción de caudal específico permitía proceder a estudios comparativos);

- *caudales característicos de estiaje* de treinta días consecutivos DCC 30 (criterio importante para el cálculo de las dosis mínimas de riego);

- *coeficiente de irregularidad interanual* K3;

- *coeficiente de regularidad estacional* KE;

- *déficit hídrico promedio anual*, número anual de meses secos y análisis de una delimitación climática de las necesidades de riego;

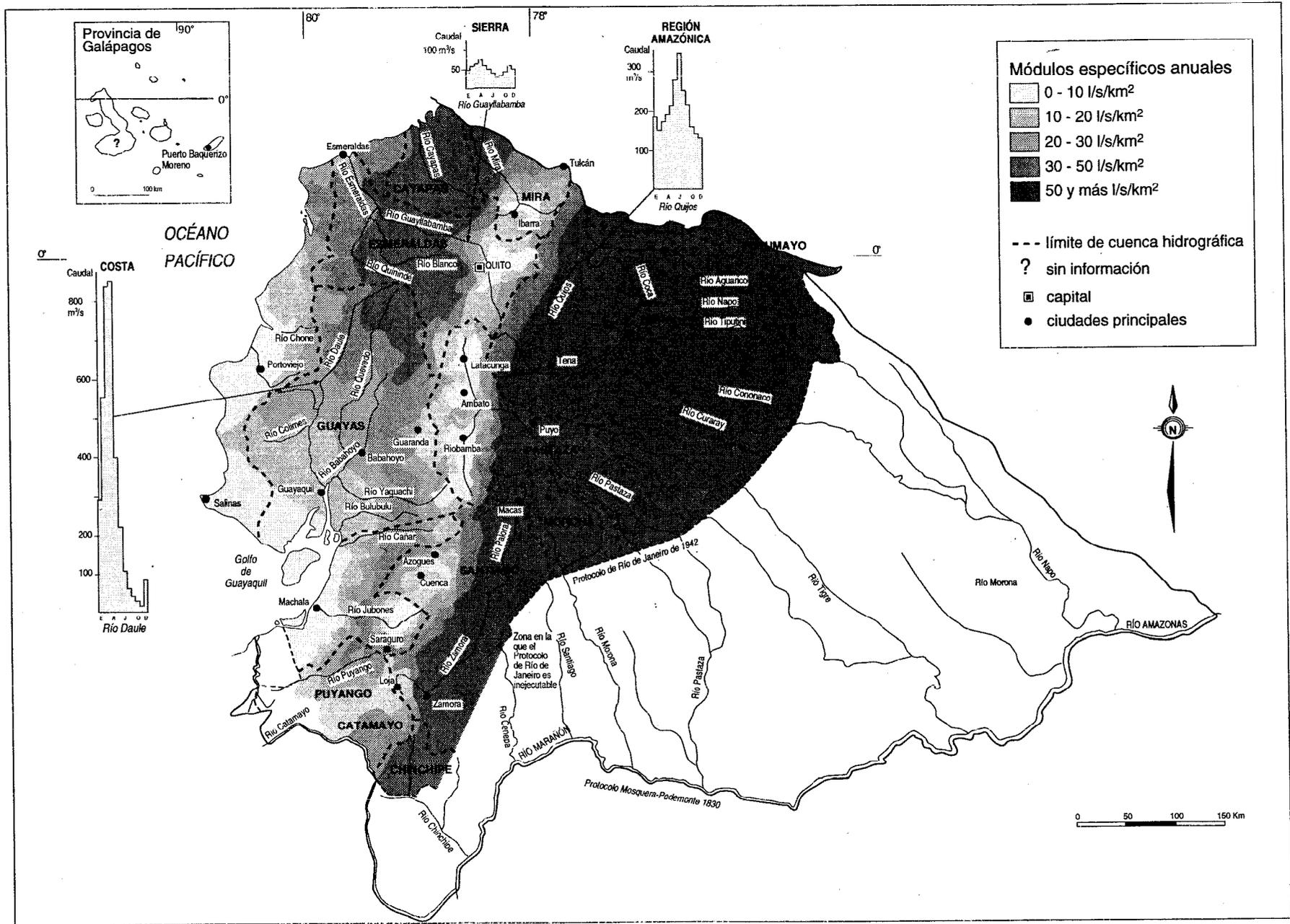
- *potencial hidrogeológico* y situación de las zonas propicias a la explotación de las aguas subterráneas;

3 - resolución de representar los resultados cartográficamente:

- bajo la forma de isolinéas (cada vez que era posible);

- cuantificando los parámetros (valor promedio) en una superficie lo suficientemente reducida como para poder suponer que sean relativamente homogéneos. Es así como el espacio que comprende las regiones costanera y andina (la región amazónica forma una entidad aparte y, además, no se disponía de una cartografía exacta) fue dividido en *1.245 pequeñas cuencas hidrográficas « unitarias »* de una superficie generalmente inferior a 200 Km², dimensión considerada como un límite superior para respetar el criterio de homogeneidad;

4 - decisión de realizar el trabajo en dos etapas, una de análisis regional y otra de síntesis nacional, ambas resumidas a continuación.



MÓDULOS ESPECÍFICOS ANUALES

La **etapa de análisis regional** se inició con una fase de análisis crítico y de evaluación de la confiabilidad de los datos, seguida del cálculo del valor de los principales parámetros hidrológicos y de los elementos del balance en espacios regionales (grupo de grandes cuencas hidrográficas) que supuestamente tenían una problemática de conjunto similar, ya sea debida a las condiciones físico-climáticas o bien derivada de aspectos más técnicos como la densidad de la red de observación o las dificultades de acceso. Así, se individualizaron *cinco regiones*, teniendo los estudios emprendidos en la primera de ellas, en los alrededores de la base de trabajo de Quito (cuencas de los ríos Pastaza, Chimbo y Chanchán), un valor de test metodológico.

Es evidente que la red respondía de manera imperfecta a la gran diversidad de condiciones hidroclimáticas del Ecuador y que por lo tanto era utópico pensar en caracterizar cada una de las cuencas hidrográficas, y menos aún las 1.245 pequeñas cuencas unitarias, mediante valores realmente observados o medidos. Se recurrió entonces al método elaborado por P. Dubreuil y J. Guiscafré, que consiste en una división en zonas *hidrológicas teóricamente homogéneas*. Aliado a un buen conocimiento del terreno, ese método iba a permitir rellenar las lagunas de información gracias a extrapolaciones en el espacio. Recuérdese que el método, basado en un principio de reproductibilidad y de conservación de la relación causa/efecto (conjunto de factores condicionantes cuidadosamente escogidos/valor de los parámetros hidrológicos resultantes), posibilita el traslado a una zona no estudiada de los resultados obtenidos en otra zona que presenta características físico-geo-climáticas similares. En el Ecuador, tales características fueron individualizadas para las 1.245 cuencas unitarias tomando un número reducido de factores condicionantes cuyas elección y consistencia estaban relacionadas directamente con la información disponible, y que son los siguientes:

- *totales pluviométricos anuales*, con indicación del período de aparición de la estación lluviosa (6 clases);
- *tipo de aporte subterráneo*, determinado en función de la permeabilidad del suelo y del subsuelo (5 clases);
- *8 clases de relieve*, calculadas de manera tradicional con base en desniveles específicos;
- *altitud promedio* (8 clases), reemplazada por la *cobertura vegetal* (5 clases) por debajo de los 500 m.

Como evidentemente no se disponía de la gama completa de las zonas teóricamente homogéneas necesarias, la transferencia de los resultados a otras zonas fue sometida a ciertos ajustes efectuados en los factores considerados secundarios (por ejemplo la altitud) o de trazado menos rígido (la pluviometría).

En definitiva, esta fase condujo a algunos resultados interesantes, presentados en 5 informes en español que totalizan más de 1.200 páginas, acompañados de 40

mapas a escala 1:200.000:

- en los cinco conjuntos regionales que dieron lugar al análisis, *determinación de 236 zonas hidrológicas teóricamente homogéneas* que corresponden adecuadamente a las grandes variaciones de los factores condicionantes, lo cual por cierto se verificó *a posteriori*;
- puesta en evidencia de las principales lagunas en el conocimiento de los factores condicionantes y definición de los estudios a emprenderse prioritariamente para remediarlas;
- propuesta de *planificación de la red hidrométrica mínima*, mediante comparación entre red en servicio y red teórica óptima;
- homogeneización y mejoramiento del conocimiento de los principales parámetros físico-climáticos que eran indispensables para la realización de la fase de síntesis.

La etapa de **síntesis nacional** elaborada en la óptica de la planificación agrícola de las aguas, se dedicó a identificar ciertos parámetros simples que permitan conocer las características de los regímenes hidrológicos necesarios para el planificador, tratando de evitar la redundancia de tales parámetros. Su objetivo era presentar documentos claros con miras a establecer sin retraso un primer diagnóstico, no sólo de las disponibilidades hídricas existentes, es decir de *la oferta*, sino también de las necesidades de agua resultantes de las realidades físico-climáticas, es decir la demanda, y finalmente de las posibilidades teóricas de satisfacer esta última con base en los recursos locales.

En 1979, los resultados se agruparon en una nota de síntesis en español que comprendía 34 páginas y 9 figuras, acompañada de 10 mapas (o grupo de mapas) nacionales a escala 1:1.000.000, 1:2.000.000 y 1:4.000.000, 2 mapas de las regiones litoral y andina a escala 1:500.000 y dos mapas regionales a escala 1:200.000. Un extenso cuadro resumía las características principales de las 1.245 cuencas hidrográficas unitarias. Así, para cada una de ellas se puede conocer instantáneamente: el código, la gran cuenca de pertenencia, el nombre local, la superficie en Km², el módulo específico en l/s/Km², la irregularidad interanual K3, la regularidad estacional KE, los DCC 30 en l/s/Km² y finalmente los límites superior e inferior del volumen escurrido anual en millones de m³.

Un breve comentario de los diferentes mapas bastará para apreciar en su justo valor los trabajos realizados durante cinco años:

- isoyetas interanuales e histogramas de las pluviometrías mensuales — escala: 1:1.000.000. Corresponde a los recursos meteorológicos directos. Se acompaña en el texto de comentarios y gráficos que indican, por zona, la tendencia de los valores del coeficiente de variación de los totales anuales así como de una estimación de los órdenes de magnitud de los totales diarios y de las intensidades según las regiones naturales del país;

- evapotranspiración potencial Thornthwaite — escala: 1:1.000.000. La fórmula considerada era la única que permitía calcular un número suficiente de valores para trazar isolinéas. Su interés radica sobre todo en el hecho de que sirve de base a la evaluación de los déficits hídricos;

- referencia de las cuencas hidrográficas unitarias — escala: 1:500.000. Permite situar a las cuencas, ya sea para la utilización del cuadro de las características o para precisar su posición en los mapas a escala 1:1.000.000;

- módulos específicos anuales — escala: 1:1.000.000. Las grandes clases escogidas (0-10, 10-20, 20-30, 30-50 y más de 50 l/s/Km²) y los colores permiten identificar con una simple mirada las disponibilidades consideradas bajo el ángulo de un almacenamiento;

- caudales específicos de estiaje DCC 30 — escala: 1:1.000.000. Las clases escogidas (0-2, 2-5, 5-10, 10-25 y más de 25 l/s/Km²) permiten evaluar los recursos disponibles en caso de obras de toma directa. Proporcionan también valiosas indicaciones sobre la intensidad de la recarga subterránea;

- hidrogeología — escala: 1:1.000.000. Basado en la litología y el tipo de permeabilidad de las formaciones geológicas pero elaborada voluntariamente bajo una forma simplificada para ser accesible, este mapa individualiza claramente las zonas que presentan diversos potenciales de aguas subterráneas;

- zonas prioritarias para la búsqueda y la explotación de las aguas subterráneas — escala: 1:1.000.000. Este mapa no es una simple interpretación del anterior. En él se realiza el cruce de varios parámetros: existencia del recurso, necesidades identificadas, aumento previsible de la demanda en función de la dinámica regional;

- calidad de la información pluviométrica e hidrológica — 2 mapas a escala 1:2.000.000. Identifica claramente las carencias de las redes de observaciones;

- déficit hídrico anual, necesidades del riego — escala: 1:1.000.000. Los valores de déficit se obtuvieron sumando los déficits mensuales ETP - P cuando ETP era superior a P. Los valores límite escogidos para definir una igual necesidad climática del riego son evidentemente dependientes de la fórmula utilizada para calcular la ETP y por lo tanto, en el presente caso, de los valores de temperatura. Son claramente más elevados en la Costa que en el callejón interandino: por ejemplo, las necesidades del riego considerado respectivamente como complementario, necesario e indispensable se sitúan en las gamas 100-150 mm, 150-500 mm y > 500 mm en los Andes mientras que en la región litoral llegan a 500-700 mm, 700-1.000 mm y > 1.000 mm;

- déficits hídricos mensuales — 12 mapas a escala 1:4.000.000. Precisa el anterior proporcionando indicaciones sobre los períodos más críticos;

- número anual de meses secos — escala: 1:1.000.000. Complemento indispensable de los dos mapas anteriores, indica la extensión previsible del período en el que hay que regar;

- zonas regables y evaluación del modo de utilización del agua disponible localmente — 2 mapas a escala 1:200.000. Se trata de una prueba metodológica realizada en la región árida de Salinas en donde ningún río tiene un flujo permanente. Las zonas llamadas regables fueron delimitadas utilizando criterios geomorfológicos y edafológicos superpuestos a los factores climáticos. Su selección con miras a un eventual desarrollo agropecuario tenía también en cuenta las posibilidades de almacenar los flujos durante las estaciones lluviosas.

IV. Conclusión

A manera de conclusión, se puede decir que a inicios de los años ochenta, el utilizador potencial disponía de mapas y de una lista directamente utilizable de todas las cuencas unitarias del país, de su superficie y de la clase (u orden de magnitud) de las principales características hidrológicas que determinan el origen, la cantidad y la repartición en el tiempo del agua utilizable.

La separación jerárquica de esas características en clases era compatible con la presentación normalizada prevista para la síntesis general de los datos físicos y socio-económicos, para la cual se había contemplado la utilización de un procesamiento mediante matriz Bertin (el uso del computador no se había generalizado aún). Hoy en día se sabe que esta fase de la regionalización agraria PRONAREG/ORSTOM fue un éxito. El análisis factorial de los parámetros tomados en cuenta, por una parte, y la superposición cartográfica de las potencialidades y de la división administrativa cantonal (necesaria para que el Estado realice sus intervenciones), por otra, permitieron individualizar ciertas zonas homogéneas que presentaban problemáticas agrícolas diversas, las ZAPI (Zonas Agrícolas para una Programación Integral).

A otro nivel, el de la planificación nacional, el trabajo realizado fue productivo y sigue siendo de actualidad en algunos campos. Los mapas hidrológicos de la síntesis, publicados por el IGM, fueron difundidos ampliamente y recientemente tuvimos la oportunidad de constatar que eran expuestos sistemáticamente en las oficinas de los responsables del Plan Nacional de Desarrollo para quienes constituyen aún, en ocasiones, una referencia.

ARTÍCULO II

FACTORES CONDICIONANTES DE LOS REGÍMENES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS

Pierre Pourrut, Gustavo Gómez, Alejandro Bermeo, Angel Segovia

El Ecuador, país andino, amazónico y ribereño del Pacífico, puede definirse como una tierra de contrastes: contrastes humanos y choque de civilizaciones, aunque también contrastes físicos, geológicos, climáticos y evidentemente hidrológicos. En efecto, en él se encuentran yuxtapuestos a cortas distancias, terrenos accidentados y llanuras, zonas cálidas y zonas frías, regiones húmedas y secas, en donde el agua se manifiesta bajo formas sumamente variables y constituye a menudo un factor limitante para el desarrollo agrícola por su escasez sobre todo, pero a veces también por su abundancia.

I. Consideraciones generales

Aunque no se debe despreciar la influencia de agentes como la geología (en particular las características litológicas tales como el grado de dureza o de impermeabilidad de las rocas, al igual que los grandes sistemas de fallas o de fracturas) o la vegetación (papel que desempeña la cobertura vegetal en la protección de las pendientes y el establecimiento de los términos del balance hídrico, principalmente la evapotranspiración y el escurrimiento superficial), no cabe duda de que los dos factores que pueden considerarse como los más directamente responsables del trazado y de la densidad de la red hidrográfica, así como de las variaciones y la diversidad de los regímenes hidrológicos, son el relieve y la pluviosidad. Sin embargo, desde ya se debe plantear el siguiente postulado: ríos, orografía y lluvias no son agentes independientes sino, por el contrario, estrechamente correlacionados por interacciones complejas en donde se mezclan causas y efectos.

Es así como el relieve determina las características físicas y morfométricas de la red hidrográfica que realiza el drenaje de las cuencas: el libre desarrollo de la escorrentía producida por las lluvias se asocia a él para definir la dirección de los flujos, la forma y la densidad

de los drenes así como la pendiente longitudinal del lecho. Los valores de esta última condicionan a su vez la dinámica erosiva, lo que permite identificar *una primera interdependencia*: buscando constantemente su perfil de equilibrio, los ríos, agentes principales del deterioro de las tierras, y accesoriamente del transporte y depósito de las mismas, constituyen uno de los elementos fundamentales de la morfogénesis y de la formación de los paisajes. Esto es particularmente cierto en el Ecuador dados:

- su historia geodinámica extremadamente compleja, de lo que da testimonio la gran diversidad de formaciones geológicas, sobre todo de origen volcánico cuya dureza es muy variable según se trate de volcanismo de fisuras (coladas de lava muy dura de tipo basáltico o andesítico) o explosivo (acumulación por vía eólica de cenizas y polvos que forman tobas relativamente suaves, de tipo cangahua);

- la intensidad de la orogénesis y el carácter reciente de algunos de sus paroxismos, lo que se refleja en una repetida reactivación erosiva y en la existencia de una red hidrográfica joven, aún en plena evolución.

Además de la estrecha relación existente entre los caudales y las características físicas y morfométricas de la cuenca de alimentación, los caudales que transitan por los cursos de agua, al igual que sus variaciones a lo largo del año, están por supuesto subordinadas directamente a los totales pluviométricos y a la distribución de las lluvias. Estas últimas, que dependen de factores planetarios que rigen las condiciones climáticas, tales como la circulación atmosférica general o incluso la existencia de corrientes oceánicas, son también condicionadas por el contexto físico local. Esto permite identificar *una segunda interdependencia*: a las condiciones pluviométricas de conjunto que, en el Ecuador, están regidas por las reglas climáticas propias de las zonas de baja latitud (desplazamiento periódico del Frente Intertropical, FIT — llamado también

Zona de Convergencia Intertropical, CZIT —, regímenes de los alisios, etc.) y sometidas a la influencia de corrientes oceánicas (desplazamientos de la corriente fría de Humboldt, alteración climática ocasionada por el fenómeno « El Niño ») se suma el efecto de la cordillera andina que desempeña un papel preponderante en la génesis, el aislamiento y la repartición de masas de aire cuyas características influyen en la formación de las precipitaciones. Responsable de toda una secuencia altitudinal de topoclimas así como de los elevados gradientes pluviométricos observados en las vertientes expuestas a los vientos húmedos dominantes, pero pudiendo también hacer de pantalla frente a las influencias oceánicas y amazónicas y crear así zonas abrigadas muy secas, la formidable barrera de orientación meridiana que constituyen los Andes origina la individualización de tres grandes regiones naturales que representan otros tantos conjuntos climáticos: la región litoral, la región andina y la región amazónica, que poseen regímenes de lluvia muy variados en los que los totales pluviométricos anuales fluctúan entre menos de 100 mm y más de 6.000 mm.

Las diversas consideraciones de orden general que acaban de exponerse llevaron a presentar en un solo y mismo capítulo los agentes responsables a la vez de los climas (y por lo tanto de la pluviosidad), del trazado de las redes hidrográficas y de las particularidades de los regímenes hidrológicos. Se insistirá especialmente en los mecanismos ligados a las precipitaciones, sabiendo que el clima, las lluvias y los regímenes hidrológicos dan lugar a un análisis por separado en los artículos III, IV, V, VI y VII.

II. Descripción de los agentes responsables de los regímenes hidroclimáticos

Entre los diferentes factores astronómicos, geográficos y meteorológicos que influyen en los regímenes hidroclimáticos del Ecuador, aquellos cuyo papel es determinante son los siguientes:

- la latitud, que define las condiciones generales de la circulación atmosférica a nivel planetario, entre la línea ecuatorial y los polos, y la longitud que regula un sistema de circulación atmosférica Este-Oeste;
- el relieve, la altitud y el papel de pantalla desempeñado por la cordillera de los Andes, factores que condicionan la existencia de regiones naturales muy autónomas;
- el océano Pacífico, generador de masas de aire cuyas características habituales se ven a veces perturbadas por la influencia de corrientes oceánicas.

1. LA LATITUD Y LA LONGITUD

El Ecuador está situado sobre el ecuador geográfico y los mecanismos que rigen los climas y las precipitaciones se sujetan por lo tanto a las reglas de la circulación atmosférica propia de las regiones de baja latitud.

Se conoce de sobra que, alrededor del globo terrestre,

la atmósfera está sometida a dos tipos de circulación, la una meridiana y la otra zonal, siendo los fenómenos observados la resultante de estas dos tendencias perpendiculares.

Entre la línea ecuatorial y los trópicos, la circulación meridiana se caracteriza por la existencia de dos núcleos individualizados separados por una zona de baja presión en donde se sitúa el FIT, estando al igual que el núcleo septentrional — o núcleo de Hadley — ligeramente desplazado hacia el Norte. Hay que recordar que el sistema sigue el movimiento aparente del sol y se desplaza periódicamente hacia el hemisferio de verano, de abril a julio hacia el hemisferio norte y de octubre a enero hacia el hemisferio sur, lo que permite la penetración de masas de aire con características diferentes, templado y poco húmedo en el primer caso, cálido y húmedo en el segundo. Por otro lado, para las regiones tropicales en su conjunto, G. Walker puso en evidencia un sistema de circulación zonal transversal: en los continentes, que se calientan más rápidamente que las masas oceánicas, al aire asciende para luego volver a descender hacia los océanos, más fríos. El sistema transversal más importante está situado en el océano Pacífico y es así como los alisios se cargan de humedad y convergen al Oeste hacia las bajas presiones de Australia-Indonesia, zona de inestabilidad atmosférica que da lugar a precipitaciones elevadas. En altura, el aire retorna hacia el Este y vuelve a descender a la zona fría y seca de las altas presiones del Pacífico sudeste centradas en la isla de Pascua.

2. EL RELIEVE Y LAS CONDICIONES GEOGRÁFICAS

La formidable barrera NNE-SSO de la cordillera de los Andes desempeña un papel fundamental en la formación, el desplazamiento y el aislamiento de las masas de aire local o regional. Su altura, que alcanza más de 6.000 m.s.n.m., produce masas de aire frío, modifica el régimen de precipitaciones, delimita las hoyas más secas haciendo de pantalla ante la entrada de aire húmedo, y finalmente, impide todo contacto entre las masas de aire provenientes del Pacífico y aquellas procedentes de la región amazónica. A continuación se describen brevemente las condiciones geográficas generales.

El Ecuador continental está dividido de Oeste a Este en tres grandes regiones naturales:

a) la región costanera: está constituida de una franja litoral de aproximadamente 100 Km de ancho, siendo los valores extremos del orden de los 180 y 40 Km. Se pueden distinguir dos unidades:

- en la parte occidental y noroccidental se extiende una cordillera costanera cuya altura máxima no supera los 800 m.s.n.m. y que, a nivel de Puerto Cayo, curva hacia el Este en dirección a Guayaquil en donde desaparece. Más al Sur, colinas aisladas y bajas llanuras forman la península de Santa Elena;
- al pie de los Andes se sitúa la fosa de hundimiento del Guayas, cuyo ancho es de alrededor de 80 Km;

está limitada al Norte por relieves levantados y se prolonga hacia el Sur, hasta el Perú, mediante una estrecha franja litoral.

b) la región andina: la cordillera de los Andes, cuyo ancho varía entre 100 y 140 Km, presenta vertientes externas muy abruptas. De Norte a Sur, comprende tres unidades:

- desde la frontera colombiana hasta aproximadamente 2° 30' S, existen dos cordilleras bien individualizadas, de dirección general NNE-SSO: la cordillera Real y la cordillera Occidental, ambas coronadas por volcanes cuya altura varía entre 4.300 y 6.300 m.s.n.m. Enmarcado por las dos cordilleras, el callejón interandino, cuyo ancho es inferior a 40 Km, está constituido de una serie de hoyas separadas por relieves transversales conocidos localmente como « nudos »;

- de 2° 30' S a 3° 40' S, los volcanes son reemplazados progresivamente por vastos relieves tabulares que se extienden entre 3.000 y 4.300 m.s.n.m.;

- al Sur de 3° 40' S, las dos cordilleras pierden definitivamente su individualidad y la altura no supera los 3.500 m.s.n.m.

c) la región amazónica: está formada de dos partes muy distintas:

- la zona subandina, paralela a los Andes, está constituida por una cordillera de alrededor de 50 Km de ancho. De una altura comprendida entre 500 y 3.900 m.s.n.m. (Sumaco, Cutucú y Cóndor), está dividida en la zona central por el relieve tabular profundamente erosionado constituido por el importante cono de deyección del Pastaza;

- hacia el Este, a una altura inferior a los 350 m.s.n.m., se extienden la vasta llanura amazónica, sus bajas colinas y sus grandes valles a menudo pantanosos.

La región insular (archipiélago de Colón o islas Galápagos), está formada de 19 islas y 40 islotes volcánicos situados de un lado y otro de la línea equinoccial, 1.000 Km al Oeste del continente. Su superficie es cercana a los 8.000 Km², de los cuales 4.588 Km² están ocupados por la mayor de las islas, Isabela, formada de seis volcanes que coronan a 1.707 m.s.n.m.

3. EL OCÉANO PACÍFICO Y LAS CORRIENTES OCEÁNICAS

El régimen normal de las masas de aire tropical oceánico se ve modificado por la influencia de las corrientes marinas. El desequilibrio del balance entre la evaporación y las precipitaciones del océano Pacífico (que corresponden, respectivamente, al 50 % y al 40 % del balance global del planeta) se compensa gracias a los aportes de las aguas profundas provenientes principalmente de los océanos Índico y Antártico. Esas aguas, naturalmente frías dado su origen, ascienden a la superficie a lo largo de las costas peruanas y sur-ecuatorianas gracias al *upwelling* que resulta del desplazamiento de las aguas de superficie hacia el Noreste y el Este debido

a la acción de los alisios del Sureste. Haciéndose más calientes y menos densas, al ser empujadas por los vientos y desviadas por la fuerza de Coriolis, forman la *corriente Ecuatorial Sur* que se dirige hacia el Oeste, lo que explica el nivel más elevado del océano (alrededor de 40 cm) y la mayor profundidad de la termoclina (- 200 m en lugar de - 50 m) observados en el Pacífico occidental.

Para compensar el déficit producido de esa manera en el Pacífico occidental, se forman las *contracorrientes Ecuatorial Norte* y *Ecuatorial Sur*, mientras que en latitudes mayores la circulación se organiza en torbellinos subtropicales, dextrógira en el hemisferio norte y levógira en el hemisferio sur. A lo largo de las costas peruanas y sur-ecuatorianas, la corriente fría de Humboldt (temperatura entre 15 y 19° C y salinidad cercana al 35 ‰) se desplaza proviniendo del Sur y toma luego una dirección Noroeste para calentarse finalmente y mezclarse progresivamente con la corriente Ecuatorial Sur (temperatura superior a 25° C y salinidad inferior a 35 ‰). Esa mezcla de aguas poco saladas ricas en oxígeno con aguas frías cargadas de elementos nutritivos (fosfatos, nitratos) desempeña un papel muy importante en el desarrollo de la fauna de las aguas costeras peruanas y ecuatorianas. La zona de transición entre esas dos corrientes, llamada Frente Ecuatorial FE, está situada en general entre la costa norte del Perú y las islas Galápagos. Se desplaza habitualmente hacia el Norte en julio-agosto-septiembre y hacia el Sur en enero-febrero-marzo. La aparición de un fenómeno de El Niño concuerda con un importante desplazamiento anómalo del FE hacia el Sur.

III. Modo de acción de los factores que condicionan los regímenes hidroclimáticos

En una región dada, los regímenes climáticos o hidroluviométricos dependen estrechamente de las características de las masas de aire que en ella se encuentran, las que a su vez están condicionadas o son producidas por los grandes factores descritos en el capítulo anterior.

1. PAPEL DE LA LATITUD Y DE LA LONGITUD

Los dos grandes sistemas de circulación atmosférica ponen en juego importantes masas de aire regional, ya sea siguiendo procesos habituales, o mediante la intervención, menos frecuente, de ciertas anomalías. El desplazamiento periódico del FIT hacia el hemisferio norte o sur determina la penetración de aire con diferentes características de temperatura y de humedad, siendo estas las responsables de las condiciones térmicas y de las lluvias. Cuando el FIT atraviesa el Ecuador geográfico, prosigue su camino hacia el Sur y comienza luego a regresar hacia el Ecuador geográfico, el país se encuentra bajo la influencia de masas de aire caliente y húmedo

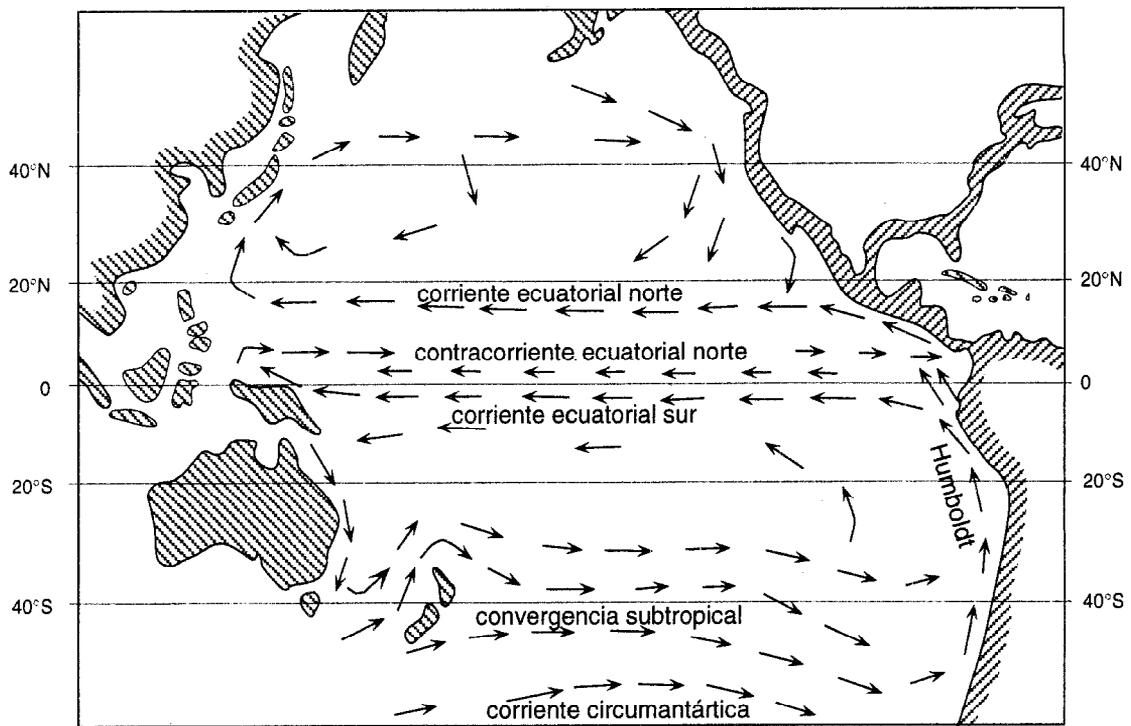


Fig. 1 - Esquema de las principales corrientes marinas del océano Pacífico

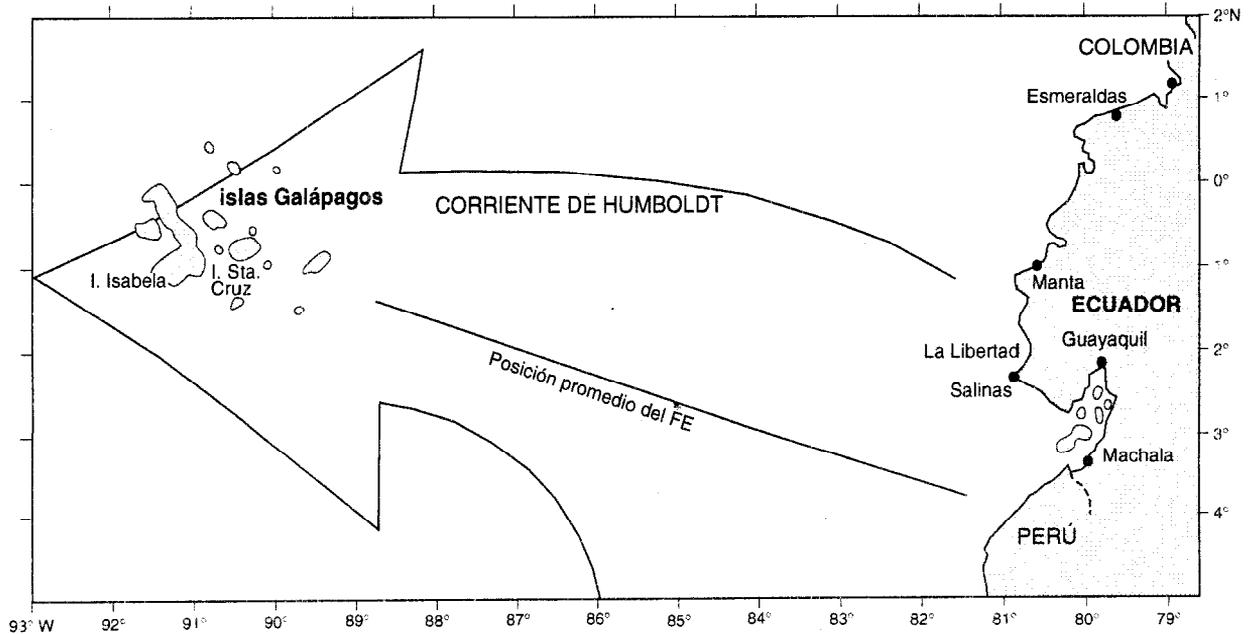


Fig. 2 - Posición habitual de la corriente de Humboldt y del Frente Ecuatorial

de carácter oceánico, las mismas que generan lluvias notables y un aumento de la temperatura del aire. Por el contrario, el desplazamiento septentrional del FIT determina la penetración de masas de aire continental poco caliente y poco húmedo, proveniente del Sudeste, lo que se traduce en un descenso de las temperaturas y en lluvias débiles. Además, cuando el FIT pasa o se establece en un lugar, aumenta la actividad convectiva produciéndose entonces lluvias de tormenta, generalmente cortas pero intensas.

Así, es posible deducir esquemáticamente la acción del factor latitud:

- de diciembre a abril: temperaturas elevadas y estación lluviosa cuyos inicio y fin se caracterizan por una gran inestabilidad de las capas inferiores de la atmósfera;
- de enero a octubre: temperaturas bajas y estación seca.

El papel esencial que juega el factor latitud es a veces modificado considerablemente por la acción del factor longitud, en particular cuando la circulación zonal de Walker experimenta cambios anormales que provocan la aparición del fenómeno de El Niño. En tal caso, el FIT ocupa durante un período más largo una posición más meridional que la acostumbrada, lo que acarrea un fuerte incremento de las precipitaciones. A la inversa, toda permanencia prolongada del FIT en situación septentrional se traduce generalmente en sequías.

2. PAPEL DEL RELIEVE

El relieve tiene una influencia permanente en los elementos climáticos. Cuando la altitud aumenta, baja la presión atmosférica, se incrementa la radiación solar, disminuye la temperatura del aire, cambia la trayectoria de los vientos y se modifican las alturas pluviométricas. El aire, forzado a elevarse, sufre una expansión de carácter adiabático que provoca su enfriamiento, la condensación del vapor de agua, la formación de gotas y la precipitación de las mismas. Por otro lado, la orografía tan particular del Ecuador define regiones naturales bien individualizadas que dan origen a masas de aire con características muy diferentes. Se pueden citar:

- masas de aire tropical continental, en la llanura amazónica y la depresión litoral del Guayas, con una temperatura elevada y una humedad importante debida a la evaporación de los pantanos y a la evapotranspiración de la selva. Esas masas de aire pueden estar sometidas a procesos de enfriamiento adiabático y producir importantes precipitaciones a lo largo de las estribaciones externas de las dos cordilleras;
- masas de aire frío continental, alrededor de la cima de los principales volcanes, con una humedad relativa importante, incluso si ella no se traduce en fuertes precipitaciones a causa del frío reinante;
- masas de aire templado continental, en las regiones situadas entre 2.000 y 3.000 m.s.n.m. aproximadamente,

con un contenido de agua variable, generalmente bastante bajo cuando se sitúan en las cuencas interandinas;

En términos generales, el papel del factor relieve puede resumirse de la siguiente manera:

- aumento de las precipitaciones en las vertientes externas de las cordilleras. Cuando el régimen de los vientos es favorable, parte de las precipitaciones pueden penetrar en el callejón interandino, en octubre y noviembre en el caso de las lluvias provocadas por las masas de aire amazónico, y entre febrero y mayo cuando se trata de las masas de aire provenientes de la llanura litoral. Cuando la descarga en las vertientes externas es completa, el aire que se ha secado desciende a lo largo de la vertiente opuesta, se calienta por compresión adiabática formándose un viento de tipo «foehn» que invade parte del callejón interandino;
- en altura, por encima de los 3.200 m.s.n.m., precipitaciones menos abundantes y de bajas intensidades, nieve o granizo cuando la temperatura es cercana a 0° C;
- en los valles interandinos, acumulación de aire denso, bastante frío y seco, lo que contribuye a mantener un clima estable y poco lluvioso.

3. PAPEL DEL OCÉANO PACÍFICO Y DE LAS CORRIENTES OCEÁNICAS

Sobre el océano Pacífico se forman, por regla general, masas de aire tropical oceánico con una temperatura elevada y una alta tasa de humedad, condiciones propicias para provocar precipitaciones cuando el viento sopla hacia el continente, en donde pueden mezclarse con el aire tropical continental de la llanura litoral y ser objeto de un proceso ya descrito de ascenso y de expansión adiabática (de allí su enfriamiento), provocando así importantes precipitaciones en las estribaciones externas e incluso al interior del callejón interandino.

Sin embargo, como ya se señaló, el Ecuador en general y muy particularmente la zona litoral centro-meridional están sometidos a la influencia permanente de la corriente fría de Humboldt o corriente Ecuatorial sur y expuestos a la acción esporádica de un flujo de aguas calientes provenientes del golfo de Panamá, conocido habitualmente con el nombre de corriente de El Niño que, en condiciones particulares, puede amplificarse extraordinariamente (fenómeno El Niño). Esas condiciones dan origen a:

- masas de aire marítimo relativamente frío, en toda el área de influencia de la corriente de Humboldt cuya temperatura, frente a las costas ecuatorianas varía entre 14 y 18° C. La evaporación es muy inferior a la de las otras regiones del océano, lo que da lugar a masas de aire húmedo de baja temperatura que, al penetrar en el continente (península de Santa Elena y lado Sur de Manabí), no pueden precipitarse pues el enfriamiento es insuficiente. No pueden sino provocar niebla o lluvias

muy finas llamadas localmente « garúa ». Tienen una importancia particular en las islas Galápagos;

- masas de aire marítimo caliente que se desplazan a lo largo de las costas con el fenómeno El Niño. Se caracterizan por temperaturas y una tasa de humedad muy elevadas, lo que provoca lluvias muy fuertes en las regiones sometidas habitualmente a la influencia de la corriente de Humboldt, y por lo tanto áridas o semi-áridas.

El papel que desempeña el océano Pacífico y las corrientes oceánicas puede resumirse de la siguiente manera:

- penetración en el continente de masas de aire caliente y húmedo, ligadas al desplazamiento del FIT hacia el Sur y reforzamiento de las masas de aire continental litoral, lo que se traduce en totales pluviométricos apreciables;

- implantación de un clima muy seco en las regiones litorales central y meridional;

- a pesar de una gran variabilidad, existencia en las islas Galápagos de un clima de tipo ecuatorial que presenta dos máximos pluviométricos por año;

- producción de lluvias excepcionales ligadas a la aparición del fenómeno El Niño.

IV. Conclusión: acción de conjunto de los diferentes factores

No se trata de entrar aquí en los detalles de la distribución de las lluvias y la escurrentía a lo largo del año, tema tratado en los artículos III, IV y VI. Sin embargo, se puede dar, en unas pocas líneas, una buena idea de la situación global.

Los tres factores descritos anteriormente se conjugan para formar un escenario complejo pero, cuando todas las condiciones son normales, es decir cuando uno u otro factor no ha experimentado ningún cambio anormal importante, su influencia individual o colectiva

explica más o menos bien los diferentes regímenes pluviométricos e hidrológicos que se observan habitualmente en el país:

- en el litoral y en la fachada pacífica de la cordillera Occidental, un régimen de tipo tropical con *una sola estación lluviosa* entre diciembre y abril (desplazamiento del FIT); los totales pluviométricos, bajos en la franja costera centro-meridional (papel de la corriente de Humboldt), aumentan hacia el interior (papel de la cordillera Occidental);

- en las estribaciones orientales de la cordillera Real y en la Amazonía, un régimen persistente con *lluvias abundantes bien distribuidas a lo largo de todo el año* (situación del FIT, permanencia de las masas de aire tropical húmedo amazónico);

- en el callejón interandino, un régimen de tipo ecuatorial con *dos estaciones lluviosas* que corresponden a la penetración mayoritaria de masas respectivamente de aire amazónico en octubre y noviembre, o pacífico de enero a mayo (desplazamiento del FIT, régimen de los vientos), siendo los totales pluviométricos variables según la altura, la exposición de las vertientes o la existencia de relieves transversales que definen cuencas más abrigadas y por lo tanto más secas (altura y relieve de las dos cordilleras); dada la presencia de glaciares y de nieves perpetuas en la cima de algunos volcanes elevados, los ríos alimentados por aguas fundidas constituyen un caso particular;

- en la región insular, un régimen de tipo ecuatorial con *dos estaciones lluviosas* (desplazamientos del FIT y del FE), aumentando considerablemente las precipitaciones con la altura (papel del relieve) y siendo las mismas más abundantes en las vertientes expuestas al Sur (papel de la corriente de Humboldt).

ARTÍCULO III CLIMA DEL ECUADOR

Pierre Pourrut, Oscar Róvere, Iván Romo, Homero Villacrés

I. Introducción

«Si hay algún elemento del entorno geográfico que poco o nada el hombre puede manejar o modificar conscientemente, ese es el clima. Si hay algún clima en extremo difícil de comprender, de pronosticar y de manejar, ese es el que resulta de la concurrencia de tan complejos condicionantes como son la posición equinoccial, la constitución andina y la vecindad oceánica. Ese es el clima o los climas del Ecuador».

No cabe ninguna duda de que Nelson Gómez, gran geógrafo ecuatoriano, expresa en pocas palabras el rasgo más característico de la realidad climática ecuatoriana: el papel sutil y complejo que juegan factores particulares cuya convergencia crea una gama sumamente rica de climas, a menudo yuxtapuestos a cortas distancias, y paisajes extremadamente variados.

Los factores que condicionan el clima fueron objeto justamente del artículo II en donde su descripción y el análisis de su modo de acción, individual o colectiva, da un panorama global de los mecanismos que rigen las condiciones climáticas y por lo tanto indirectamente los regímenes hidrológicos. Así, no se trata aquí de retomarlo, pero probablemente no es inútil remitirse a ello para comprender mejor las diferencias regionales o locales que justifican la gran diversidad de valores observados para la mayoría de los elementos climáticos medidos.

El texto presentado a continuación no es un catálogo de datos (que pueden obtenerse, de ser necesario, directamente de fuentes de información tales como el INAMHI o la DAC — Dirección de Aviación Civil —). No se debe esperar tampoco encontrar un análisis estadístico fino fundamentado en una información actualizada. Tal trabajo no pudo realizarse por dos razones: por una parte, debido a un retraso de cuatro o cinco años en el análisis crítico de la información original, y, por otra, por una insuficiente confiabilidad de los datos recogidos durante el último decenio, dificultades que se revelaron al

realizar una tentativa de homogeneización del período 1964-1988. Un próximo acuerdo de cooperación entre el INAMHI y el ORSTOM, cuyo inicio está previsto para 1992, debería resolver este problema a corto plazo.

El presente estudio no tiene otra ambición que la de proporcionar la mejor visión posible de las realidades climáticas basadas en series observadas homogeneizadas para un período de 15 años (1964-1978) o, lo que es más raro, para 20 años (1964-1983). Si presenta solo los valores de un mínimo de elementos climáticos principales, es porque debió, contra su voluntad, descartar aquellos en donde las series o la calidad de la información era insuficiente, incluso si se trataba de parámetros del balance hídrico de interés particular para los hidrólogos, como la evaporación en tanque. Cabe interrogarse también sobre las fechas extremas de las homogeneizaciones. El año 1964 marca verdaderamente el inicio de una observación generalizada de la red hidroclimatológica cuya instalación (aparte de algunas estaciones meteorológicas que existían ya en las grandes ciudades) comenzó en 1962. En cuanto a 1983, se sabe que se trata de un año climático absolutamente excepcional; su consideración en el análisis estadístico de ciertos elementos induce un gran riesgo de distorsión de los resultados.

Por otra parte, la sola presentación de valores numéricos daría solamente una idea aproximada de la realidad y tales valores deben ser ordenados de modo que desemboquen en la separación de grandes conjuntos climáticos. Son numerosos quienes se han aventurado en establecer una clasificación de los climas del Ecuador: de Misael Acosta Solís a Luis Cañadas Cruz, pasando por Carlos Blandín Landívar y Plutarco Naranjo, el número de clases propuesto, basado en criterios físicos o biológicos, varía de 7 a 32. Demasiado simple o demasiado compleja, ninguna es realmente satisfactoria. Esto condujo a proponer una clasificación de los climas ecuatorianos, la misma que es presentada en el capítulo 3.

II. Valores de algunos de los principales elementos climáticos

Los elementos que responden a los criterios de confiabilidad señalados anteriormente son la insolación, las temperaturas y las precipitaciones. A continuación se presentan los valores observados en algunas de las estaciones más representativas de las grandes regiones naturales del Ecuador: Costa, Andes, Oriente e islas Galápagos.

1. DURACIÓN ANUAL DE LA INSOLACIÓN

En toda la llanura litoral, hasta una altura de 500 m.s.n.m. en el flanco de la cordillera Occidental, la duración anual de la insolación varía generalmente de 500 a 1.300 horas, siendo las zonas secas las más favorecidas.

En los Andes y el callejón interandino, la insolación anual es casi siempre superior a 1.000 horas, salvo en los lugares más lluviosos (flancos externos de las cordilleras). Se puede estimar que varía de 600 a 1.400 horas entre los 500 y los 1.500 m.s.n.m., que está comprendida entre 1.000 y 2.000 horas en el intervalo 1.500 a 3.000 m.s.n.m. y que puede superar esos valores en los lugares más elevados.

Existen pocos datos relativos a la región amazónica. Es probable que la duración anual de la insolación

no supere sino rara vez las 1.200 horas.

En el archipiélago de las Galápagos, el número anual de horas de insolación debe ser siempre igual o superior a 2.000 horas en las franjas litorales. Tal duración es probablemente más cercana a las 1.500 horas en las partes elevadas que alcanzan a las nubes bajas.

2. LAS TEMPERATURAS

La gama de temperaturas es muy extensa puesto que desde la cima de los volcanes hasta el litoral y la llanura amazónica, las medias van de 0 a más de 26°C.

En la región andina, la temperatura está por lo general estrechamente ligada a la altura. Entre los 1.500 y los 3.000 m.s.n.m., los valores promedio varían entre 20 y 8 °C, lo que corresponde a valores máximos absolutos de 30 y 22 °C y valores mínimos absolutos de 5 a -4°C.

En los flancos externos de las dos cordilleras, se pudo establecer el gradiente altitudinal de la temperatura promedio. Aunque la vertiente oriental presenta valores un tanto más elevados en la zona de piedemonte y muy ligeramente inferiores en altura, las siguientes ecuaciones, válidas entre 500-2.670 m.s.n.m. y 2.670-4.200 m.s.n.m., dan una buena imagen del gradiente térmico observado en las dos vertientes.

$$500 < A < 2.670 \text{ m} \quad T = 25,7 - 0,0047 A$$

lo que corresponde a un descenso de 4,7°C cada 1.000 m de altura

$$2.670 < A < 4.200 \text{ m} \quad T = 30,5 - 0,0065 A$$

es decir un descenso de 6,5°C cada 1.000 m de altura

En la región oriental, la zona litoral y las islas Galápagos, la media anual se establece hacia los 24 a 25°C con extremos que apenas superan los 38°C y que rara vez descienden a menos de 13°C; los valores mínimos observados en Zamora (6°C en diciembre de 1973) y en Puyo (8,3°C en mayo de 1966) son verdaderamente excepcionales.

3. LAS PRECIPITACIONES

Tal como se indicó, este acápite no abordará sino los aspectos que contribuyen a hacer de las precipitaciones un componente esencial del clima. Los aspectos más específicos (estadísticas, zonificación o anomalías, por ejemplo) son objeto de un análisis por separado a lo largo de toda esta obra.

Como en el caso de las temperaturas, la gama de las alturas anuales de lluvia es extensa, puesto que varía de menos de 100 mm a más de 6.000 mm.

La región amazónica y el Noroeste de la provincia de Esmeraldas son las zonas más regadas. Los totales anuales superan los 3.000 mm y los valores mensuales, generalmente superiores a 200 mm, pueden llegar a más de 500 mm. Las lluvias se reparten uniformemente a todo lo largo del año, salvo una ligera disminución de diciembre a febrero.

Desde el margen litoral hasta el lado externo de la cordillera Occidental, las precipitaciones aumentan del

Región	Estación	Insolación en horas
Litoral	Guayaquil	1.580
	Portoviejo	1.310
	San Lorenzo	1.080
	Isabel María	960
	Pichilingue	930
	Pasaje	790
	Santo Domingo	770
	Ing. San Carlos	760
	Puerto Ila	670
	Bucay	470
Andina	Quito	2.040
	Ambato	1.780
	Loja	1.650
	Riobamba	1.600
	Cuenca	1.560
	Baños	1.400
	Tulcán	1.350
	Pisayambo	1.170
Amazónica	Tiputini	1.420
	Puyo	970
Insular	San Cristóbal (puerto)	2.350

Cuadro 1 - Insolación

Región	Estación	Media anual en °C	Mínimo absoluto en °C	Máximo absoluto en °C
Litoral	San Lorenzo	25,4	12,4	39,9
	Esmeraldas	25,7	18,3	35
	Milagro	24,6	14,5	35,2
	Guayaquil	25,2	14	36,6
	Portoviejo	26,5	11,7	37,8
Andina	Otavalo	14,4	- 0,5	28,2
	Quito	13,4	1,5	29,9
	Cotopaxi	8,1	- 1,5	18,7
	Ambato	12,8	- 0,6	25,6
	Riobamba	13,5	- 3,6	28,3
	Cuenca	14,8	- 0,2	28
Amazónica	Tiputini	25,4	14	38
	Pastaza	20,1	10,6	30,4
	Puyo	20,3	8,6	31
	Zamora	21,2	6	35
Insular	Charles Darwin	23,7	13,8	35,3
	San Cristóbal	23,7	13,2	33,6

Cuadro 2 - Temperatura del aire

Oeste hacia el Este con una cierta irregularidad debida a los relieves locales. Los menores valores, inferiores a 200 mm, se observan en la punta de la península de Santa Elena (Salinas) y en el cabo San Lorenzo (Sudoeste de Manta); los valores máximos, superiores a 3.000 mm, corresponden a una altura del orden de 1.000 a 1.200 m.s.n.m. La distribución de las lluvias es idéntica en todo lugar: un período lluvioso único entre diciembre y abril y una estación seca muy marcada todo el resto del año.

Como lo explica su posición, la región andina recibe la influencia alternada de masas de aire oceánico y amazónico. De allí se deriva un régimen pluviométrico con dos estaciones lluviosas, de febrero a mayo y en octubre-noviembre. La primera estación seca, situada entre junio y septiembre, es muy marcada, mientras que la segunda, cuya posición varía pero que generalmente tiene lugar en diciembre (razón por la cual es llamada localmente « veranillo del Niño ») es mucho menos acentuada. Siendo las lluvias provocadas por nubes que ya han descargado en parte su humedad sobre las vertientes exteriores de las cordilleras, los totales pluviométricos nunca son muy elevados. Generalmente comprendidos entre 800 y 1.500 mm, los valores anuales pueden sin embargo ser muy inferiores en las cuencas interandinas bien abrigadas, como en el valle del Chota (300 mm en Salinas de Imbabura) y en el valle del Jubones (400 mm en Santa Isabel) por ejemplo. En altura,

en las zonas situadas por encima de los 3.500 m.s.n.m., se observan frecuentes neblinas y las lluvias son de larga duración aunque de baja intensidad.

En la provincia insular, la insuficiencia de la red de observación no permite adelantar conclusiones definitivas. Sin embargo, se puede diferenciar el régimen pluviométrico de las zonas litorales bajas de aquel de las zonas altas. En las primeras reina un clima muy seco en el que se observan dos estaciones relativamente más regadas de alrededor de tres meses cada una, la primera centrada en febrero y la segunda de junio a septiembre. No sucede lo mismo en altura en donde la pluviometría es más elevada y el período más húmedo se sitúa probablemente entre noviembre y febrero. Es en efecto en ese período cuando el régimen de vientos empuja hacia las islas nubes bajas que, a pesar de su reducida temperatura, se suspenden alrededor de las cimas elevadas en donde el enfriamiento resultante de la expansión adiabática provoca en parte su condensación bajo la forma de lluvia de muy poca intensidad (« garúa ») o de neblina.

Un aspecto muy particular de las precipitaciones es la gran irregularidad interanual observada en la zona seca costanera, fenómeno que se analiza más detalladamente en el artículo V. Es así como el coeficiente de irregularidad interanual K3, cociente de los valores decenales húmedos y secos, es extremadamente elevado en la franja litoral en donde siempre es superior a 2 y sobrepasa a veces 4 (4,67 en Machala, 2,85 en Guayaquil, 2,77 en Portoviejo). Disminuye luego progresivamente hacia el interior. Comprendido entre 2 y 1,5 en la zona andina (1,76 en Tulcán; 1,59 en Quito; 1,55 en Loja; 1,91 en Ambato en donde reina un microclima seco), alcanza su mínimo valor en la cuenca amazónica en donde los regímenes pluviométricos dan testimonio de una gran regularidad (1,30 en Puyo y 1,29 en Limoncocha).

También es posible hacerse una idea aproximada, examinando, en la siguiente página, para diferentes períodos de retorno, los valores de la pluviometría anual de ciertas estaciones representativas, calculados a partir del mejor ajuste resultante de la utilización de las principales leyes de distribución. Las lluvias son objeto de un análisis más detallado en el artículo IV.

Se debe señalar finalmente que la probabilidad de la existencia simultánea y generalizada de años excepcionalmente secos (o húmedos) es importante al interior de una misma región geográfica, en especial en la Costa;

<i>Quito-Observatorio:</i>	media (valor anual) = 1.204 mm		
100 años secos =	570 mm	100 años húmedos =	1.780 mm
10 años secos =	947 mm	10 años húmedos =	1.504 mm
<i>Guayaquil:</i>	media = 1.015 mm		
100 años secos =	390 mm	100 años húmedos =	2.600 mm
10 años secos =	600 mm	10 años húmedos =	1.710 mm
<i>Ibarra:</i>	media = 616 mm		
100 años secos =	380 mm	100 años húmedos =	1.050 mm
10 años secos =	466 mm	10 años húmedos =	825 mm
<i>Loja:</i>	media = 815 mm		
100 años secos =	530 mm	100 años húmedos =	1.170 mm
10 años secos =	645 mm	10 años húmedos =	1.000 mm
<i>Machala:</i>	media = 465 mm		
100 años secos =	145 mm	100 años húmedos =	2.000 mm
10 años secos =	225 mm	10 años húmedos =	1.050 mm
<i>Santo Domingo:</i>	media = 3.135 mm		
100 años secos =	1.970 mm	100 años húmedos =	5.400 mm
10 años secos =	2.370 mm	10 años húmedos =	4.230 mm
<i>Puyo:</i>	media = 4.540 mm		
10 años secos =	4.010 mm	10 años húmedos =	5.210 mm
<i>Limoncocha:</i>	media = 3.240 mm		
10 años secos =	2.830 mm	10 años húmedos =	3.660 mm
<i>Esmeraldas:</i>	media = 730 mm		
100 años secos =	365 mm	100 años húmedos =	1.490 mm
10 años secos =	500 mm	10 años húmedos =	1.083 mm
<i>Portoviejo:</i>	media = 477 mm		
100 años secos =	185 mm	100 años húmedos =	1.180 mm
10 años secos =	285 mm	10 años húmedos =	790 mm
<i>Tulcán:</i>	media = 865 mm		
100 años secos =	500 mm	100 años húmedos =	1.450 mm
10 años secos =	646 mm	10 años húmedos =	1.140 mm
<i>Ambato:</i>	media = 475 mm		
100 años secos =	260 mm	100 años húmedos =	800 mm
10 años secos =	341 mm	10 años húmedos =	650 mm

Total de precipitaciones anuales para diversas frecuencias

esa probabilidad es por el contrario mucho menor cuando se trata de dos regiones diferentes. Por ejemplo, el año 1958 fue extraordinariamente seco en la región litoral, medianamente seco en la Sierra y casi normal en el Oriente, mientras que el año 1966 fue seco en toda la Sierra, normal en la Costa y un tanto excedentario en la Amazonía.

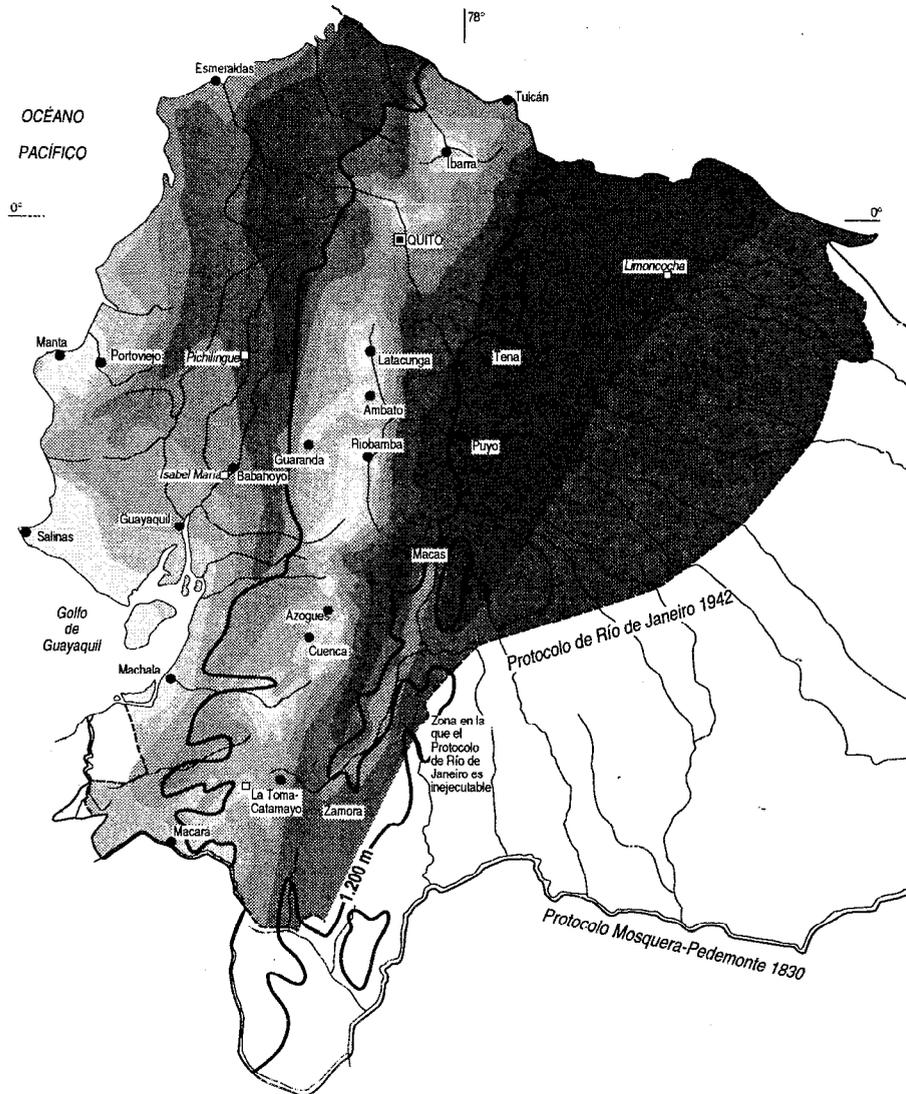
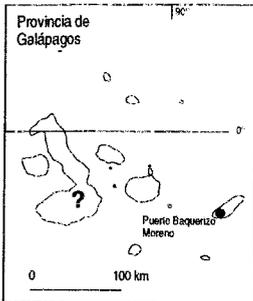
El cuadro 3 (página 20) indica los valores de las lluvias mensuales recogidos en las principales estaciones de las grandes regiones naturales. Su distribución aparece en los histogramas que acompañan al mapa de isoyetas interanuales.

En lo que respecta a las lluvias diarias, los valores registrados en la zona costanera y en la región amazónica

son claramente más elevados que los observados en la región andina (como se observa en los valores presentados a continuación).

En cuanto a las intensidades, las observadas en el callejón interandino y las zonas de altura son mucho menores que en cualquier otro punto. Allí, los valores decenales alcanzan a duras penas 110 mm/h en 5 minutos y 70 mm/h en 15 minutos (los más elevados se registran en Quito con 127 mm/h y 84 mm/h) mientras que son del orden de 160 mm/h en 5 minutos y de 110 mm/h en 15 minutos en el litoral, valores superados en el Oriente en donde, para intervalos idénticos, alcanzan 200 mm/h y 130 mm/h respectivamente.

		valor anual (mm)	frecuencia 100 años (mm)	frecuencia 10 años (mm)
SIERRA:	<i>Quito-Observatorio</i>	39	68	52
	<i>Ibarra</i>	34	63	47
	<i>Loja</i>	36	64	51
	<i>Cotopaxi</i>	30	55	44
COSTA:	<i>Machala</i>	43		84
	<i>Guayaquil</i>	83	220	143
AMAZONÍA:	<i>Puyo</i>	109		144

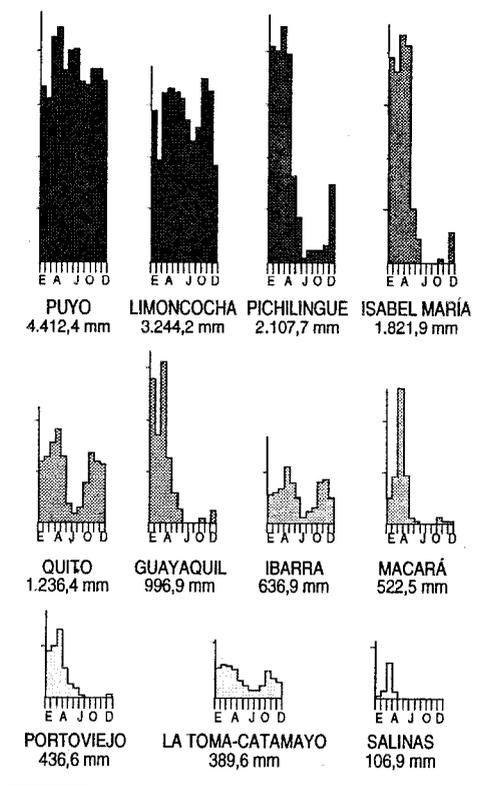


PLUVIOMETRÍA

- superior a 3.000 mm
- de 2.000 a 3.000 mm
- de 1.300 a 2.000 mm
- de 800 a 1.300 mm
- de 500 a 800 mm
- inferior a 500 mm
- ? sin información



PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL (mm)



- curva de nivel 1.200 m
- estación hidrométrica
- ciudades principales
- capital

PLUVIOMETRÍA ANUAL (período 1965 -1978)

Región litoral	Esmeraldas	Manta	Portoviejo	Guayaquil	Salinas	Machala	Santo Domingo
enero	136,2	39,5	94,8	252,3	19,7	75,3	481,1
febrero	144,2	55,3	113,3	219,1	28,3	105,8	528,3
marzo	125,8	84,7	119,7	305,6	58,2	105,2	575,2
abril	78	34,3	57,6	128,7	15,9	59,6	612,6
mayo	64,1	3,1	23,2	57,3	0,7	21,8	321,4
junio	55,2	2,9	16,7	21,3	0,7	16,2	248,2
julio	26,4	0,1	4,7	0,2	0,3	11,7	68,2
agosto	17,7	0,9	1,5	0,4	0,2	12,9	67,3
septiembre	23,5	2,3	3,4	2,2	0,2	10,8	83
octubre	13,7	0,3	2,3	3,7	0,7	18,7	87,7
noviembre	11	0,7	1,6	0,9	0,3	18,9	84,3
diciembre	27,5	1,7	9,2	24	0,3	14,1	217,5
AÑO	723,3	225,8	448	1.015,7	125,5	471	3.374,8
Región andina	Tulcán	Ibarra	Salinas- Imbabura	Quito- Observatorio	Ambato	Cuenca	Loja
enero	73,6	27,7	19,7	89,4	20,5	53,4	80,7
febrero	81,2	50,1	40,4	130,8	36,9	89,6	106,1
marzo	86	68,6	32,2	130,6	51,5	90,8	113,6
abril	107,6	90	39,9	170,6	56,4	125	87,1
mayo	62	61,1	17,8	111,9	38,4	77,9	47,6
junio	63,9	43,2	25,5	53,9	46,4	56,7	69,4
julio	44,6	22,2	4,3	26,5	24,3	43,2	66,7
agosto	37,2	14	4,1	30,3	25,3	35,8	62,9
septiembre	62,4	33,8	18,1	86,4	36,2	63,8	54,1
octubre	120,4	90,1	23,6	141,2	45,7	79,9	57,8
noviembre	128,6	74	53	114,3	42	120,8	58,7
diciembre	111	50,5	29,8	89,3	28,7	78,3	67,1
AÑO	978,5	625,3	308,4	1.175,2	452,3	915,2	871,8
Región amazónica	Tiputini	Puyo	Reventador (1974-1978)	Región insular		Charles Darwin (Sur)	Seymour (Norte)
enero	137,5	289,8	426,1			71	23,2
febrero	140,6	313,9	461			66,4	15
marzo	245	446,3	593,4			51,1	29
abril	253,9	471,2	578,7			59,3	12,8
mayo	288,3	389,6	583,2			23,8	1,2
junio	302,5	462,1	635,5			16,7	0,2
julio	262,4	403,4	593,1			11,5	0,1
agosto	238,9	344,7	434,5			11,1	0,7
septiembre	222,1	354,5	460,4			11,9	0,4
octubre	227,5	395,5	458,5			12,1	0,5
noviembre	185,2	356,6	593,4			10,5	0,1
diciembre	142,1	320,8	542,8			21,6	0,5
AÑO	2.646	4.548,4	6.360,6			367	83,7

Cuadro 3 - Totales pluviométricos mensuales (mm) — 1964-1978

III. Las grandes clases de climas del Ecuador

Según R. Arlery, « *el problema de la clasificación de los climas es insoluble y no puede recibir sino soluciones arbitrarias y artificiales... Para tener una utilidad práctica, una clasificación no puede en efecto sino partir de datos simples o al menos fácilmente accesibles, a fin de definir un marco a la vez suficientemente general (que permita comparar climas con numerosos rasgos comunes), por un lado, y sin embargo lo suficientemente detallado como para diferenciar en él climas separados únicamente por características más o menos importantes, por otro* ». Como ninguna de las clasificaciones propuestas daba cuenta de manera satisfactoria de las realidades climáticas del país, se hizo una nueva tentativa tratando de poner en práctica esos valiosos consejos y grandes principios. La clasificación presentada a continuación privilegia probablemente el aspecto relativo a las precipitaciones al haber sido concebida por un hidrólogo; está entonces basada en parámetros escogidos por su simplicidad y cuyos valores están subdivididos en un número limitado de categorías; por supuesto, está lejos de pretender ser exclusiva. Los parámetros tomados en cuenta son las precipitaciones (totales anuales y regímenes) y las temperaturas (medias anuales).

Para caracterizar al régimen de lluvias, se recurre a una noción que no puede ser más tradicional, la del número anual de máximos pluviométricos. Se lo llama:

- « *ecuatorial* » cuando se observan dos picos pluviométricos más o menos ligados al movimiento aparente del sol. Es el régimen general del planeta en la proximidad del ecuador geográfico: dos estaciones lluviosas coinciden con los equinoccios, una estación relativamente seca corresponde al solsticio de verano y una corta estación poco lluviosa se sitúa en la época del solsticio de invierno;

- « *tropical* » cuando se registra únicamente un máximo lluvioso y una sola estación seca muy marcada;

- « *uniforme* » cuando las lluvias se distribuyen relativamente bien a todo lo largo del año.

Para caracterizar la altura anual de las precipitaciones, se escogieron los siguientes límites y definiciones:

- « *árido a semi-árido* » para totales inferiores a 500 mm;

- « *seco a semi-húmedo* », entre 500 y 1.000 mm;

- « *húmedo* », entre 1.000 y 2.000 mm;

- « *muy húmedo* » para totales superiores a 2.000 mm.

Para distinguir las temperaturas anuales, se escogieron tres clases:

- « *megatérmico* » para temperaturas medias superiores a 22 °C;

- « *mesotérmico* » para temperaturas entre 12 y 22 °C;

- « *frío* » para temperaturas inferiores a 12 °C.

El cruce de estos criterios permitió localizar nueve

grandes clases de clima. En cada una de las regiones naturales reina una o varias clases cuyas características principales se describen a continuación.

1. REGIÓN COSTANERA

Del Oeste hacia el Este, se pueden distinguir tres tipos de climas:

- el *clima tropical megatérmico árido a semi-árido* reina en la península de Santa Elena, el cabo San Lorenzo y la franja litoral meridional. Las temperaturas medias anuales son de aproximadamente 24°C, las máximas rara vez superan 32°C y las mínimas son del orden de 16°C. Las precipitaciones anuales son inferiores a 500 mm y están concentradas en una sola estación lluviosa, de enero a abril. Dado el papel preponderante de la corriente fría de Humboldt, es en el cabo de Salinas en donde se observan los valores mínimos anuales de lluvia (125,5 mm) y de temperatura (23,4 °C). Entre julio y octubre, el tiempo se caracteriza por un cielo muy nublado, neblinas y garúas sin impacto notable en la vegetación. Principal consecuencia de las abundantes lluvias provocadas por los fenómenos El Niño que sobrevienen episódicamente y que constituyen por cierto la única ocasión en que reverdece el paisaje, la irregularidad interanual de las precipitaciones es excepcionalmente elevada, superior a 4;

- el *clima tropical megatérmico seco a semi-húmedo* está situado al Este del clima anterior y su influencia se extiende en una franja de alrededor de 60 Km de ancho. El total pluviométrico anual está comprendido entre 500 y 1.000 mm recogidos de diciembre a mayo. La estación seca es muy marcada y las temperaturas medias elevadas, superiores a 24°C. La vegetación está constituida principalmente de un bosque seco en donde predominan los ceibos;

- el *clima tropical megatérmico húmedo*, presente en una franja cuyo ancho máximo es ligeramente inferior a 110 Km, se inicia cerca de Esmeraldas para desaparecer a nivel del golfo de Guayaquil. La lluvia total anual varía generalmente entre 1.000 y 2.000 mm, pero puede alcanzar localmente valores superiores en las bajas estrabaciones de la cordillera. Como en el caso anterior, las lluvias se concentran en un período único, de diciembre a mayo, siendo el clima seco el resto del año. Las temperaturas medias fluctúan alrededor de los 24°C y la humedad relativa varía entre 70 y 90 % según la época. La vegetación es una selva densa de árboles de hojas caducas.

2. REGIÓN ANDINA

Si nos abstraemos de una gran cantidad de microclimas y topoclimas resultantes de la exposición y la altura, se pueden describir cuatro grandes tipos de clima:

- el *clima tropical megatérmico muy húmedo* es un clima de transición entre los de la región andina y los

Tipo de clima Variables anuales	Tropical megatérmico semi-árido	Tropical megatérmico seco a semi-húmedo	Tropical megatérmico húmedo	Tropical megatérmico muy húmedo	Uniforme megatérmico muy húmedo	Ecuatorial mesotérmico semi-húmedo a húmedo	Ecuatorial mesotérmico seco	Ecuatorial frio de alta montaña	Ecuatorial insular*
Regimen de lluvias (número de estaciones)	1 húmeda 1 seca	1 húmeda 1 seca	1 húmeda 1 seca	1 húmeda 1 seca	1 húmeda	2 húmedas 2 secas	2 húmedas 2 secas	2 húmedas 2 secas	2 húmedas 2 secas
Altura de las lluvias	$P \leq 500$	$500 < P \leq 1.000$	$1.000 < P \leq 2.000$	$2.000 < P$	$2.000 < P$	$600 < P \leq 2.000$	$P \leq 600$	$800 \leq P < 2.000$	$200 \leq P \leq 2.000$
Temperatura media (°C)	$22 \leq T$	$22 \leq T$	$22 \leq T$	$22 \leq T$	$22 \leq T$	$12 \leq T < 22$	$12 \leq T < 22$	$T < 12$	$22 \leq T$
Duración de la insolación (número de horas)	$1.000 \leq I \leq 1.500$	$800 \leq I \leq 1.300$	$600 \leq I \leq 1.000$	$400 \leq I \leq 800$	$800 \leq I \leq 1.500$	$1.000 \leq I \leq 2.000$	$1.800 \leq I \leq 2.500$	$1.000 \leq I \leq 2.200$	$1.800 \leq I$
Humedad relativa (%)	$50 < h < 70$	$60 < h < 85$	$70 < h < 90$	$90 < h$	$90 < h$	$65 < h < 85$	$50 < h < 80$	$80 < h$	$50 < h < 80$
Meses secos** (número)	12	$8 < N \leq 11$	$6 < N \leq 8$	$2 < N \leq 6$	$N \leq 2$	$2 < N \leq 8$	$8 < N \leq 12$	$N \leq 4$	$4 < N \leq 12$
Déficit hídrico** (mm)	$900 < D$	$700 < D \leq 900$	$250 < D < 700$	$D < 500$	$D < 100$	$D < 150$	$150 < D < 600$	$D < 100$	$500 < D < 1.400$
*: Clima muy heterogéneo **: Calculado a partir de la fórmula de Thornthwaite									

Cuadro 4 - Principales características generales de los climas del Ecuador

de las zonas litoral y amazónica. Está presente en las vertientes exteriores de las dos cordilleras, entre los 500 y los 1.500 m.s.n.m. aproximadamente. Según la altura, las temperaturas medias anuales varían considerablemente manteniéndose elevadas, mientras que la humedad relativa se establece en todo punto alrededor del 90 %. Como las vertientes reciben el impacto directo de las masas de aire tropical cargado de humedad, las precipitaciones anuales son superiores a 2.000 mm y pueden a veces alcanzar 4.000 mm; caen durante una sola estación lluviosa. La vegetación es esencialmente selvática, pero una explotación descontrolada asociada a una intensa deforestación para la implantación de pastizales la ponen seriamente en peligro;

- el *clima ecuatorial mesotérmico semi-húmedo a húmedo* es el clima más característico de la zona interandina pues, salvo en los valles abrigados y las zonas situadas por encima de los 3.200 m.s.n.m., ocupa la mayor extensión. Las temperaturas medias anuales están comprendidas generalmente entre 12 y 20° C pero pueden en ocasiones ser inferiores en las vertientes menos expuestas al sol; las temperaturas mínimas descienden rara vez a menos de 0° C y las máximas no superan los 30° C. Variando en función de la altura y de la exposición, la humedad relativa tiene valores comprendidos entre el 65 y el 85 % y la duración de la insolación puede ir de 1.000 a 2.000 horas anuales. Las precipitaciones anuales fluctúan entre 500 y 2.000 mm y están repartidas en dos estaciones lluviosas, de febrero a mayo y en octubre-noviembre. La estación seca principal, de junio a septiembre, es generalmente muy marcada; en cuanto a la segunda, su duración y localización en el tiempo son mucho más aleatorias, aunque se puede adelantar que es por lo general inferior a tres semanas y se sitúa a fines de diciembre, razón por la que se la llama « veranillo del Niño ». La vegetación natural de esta zona ha sido ampliamente sustituida por pastizales y cultivos (principalmente cereales, maíz y papa).

- el *clima ecuatorial mesotérmico seco* está asociado a los valles interandinos abrigados y de menor altura. Las temperaturas medias anuales fluctúan entre 12 y 20° C con muy poca diferencia entre los meses de verano e invierno. Las lluvias anuales son inferiores a 500 mm y, en las mismas épocas que el clima descrito anteriormente, presentan dos picos pluviométricos separados por dos estaciones secas. En estas cubetas bajas, la acumulación de aire relativamente frío y consecuentemente más denso contribuye a crear condiciones climáticas bastante estables: el cielo es generalmente poco nuboso, la humedad relativa está comprendida entre el 50 y el 80 % y la insolación siempre supera las 1.500 horas por año;

- el *clima ecuatorial frío de alta montaña* se sitúa siempre por encima de los 3.000 m.s.n.m. La altura y la

exposición son los factores que condicionan los valores de las temperaturas y las lluvias. Las temperaturas máximas rara vez sobrepasan los 20° C, las mínimas tienen sin excepción valores inferiores a 0° C y las medias anuales, aunque muy variables, fluctúan casi siempre entre 4 y 8° C. La gama de los totales pluviométricos anuales va de 800 a 2.000 mm y la mayoría de los aguaceros son de larga duración pero de baja intensidad. La humedad relativa es siempre superior al 80 %. La vegetación natural, llamada « matorral » en el piso más bajo, es reemplazada en el piso inmediatamente superior por un espeso tapiz herbáceo frecuentemente saturado de agua, el « páramo ».

3. REGIÓN AMAZÓNICA

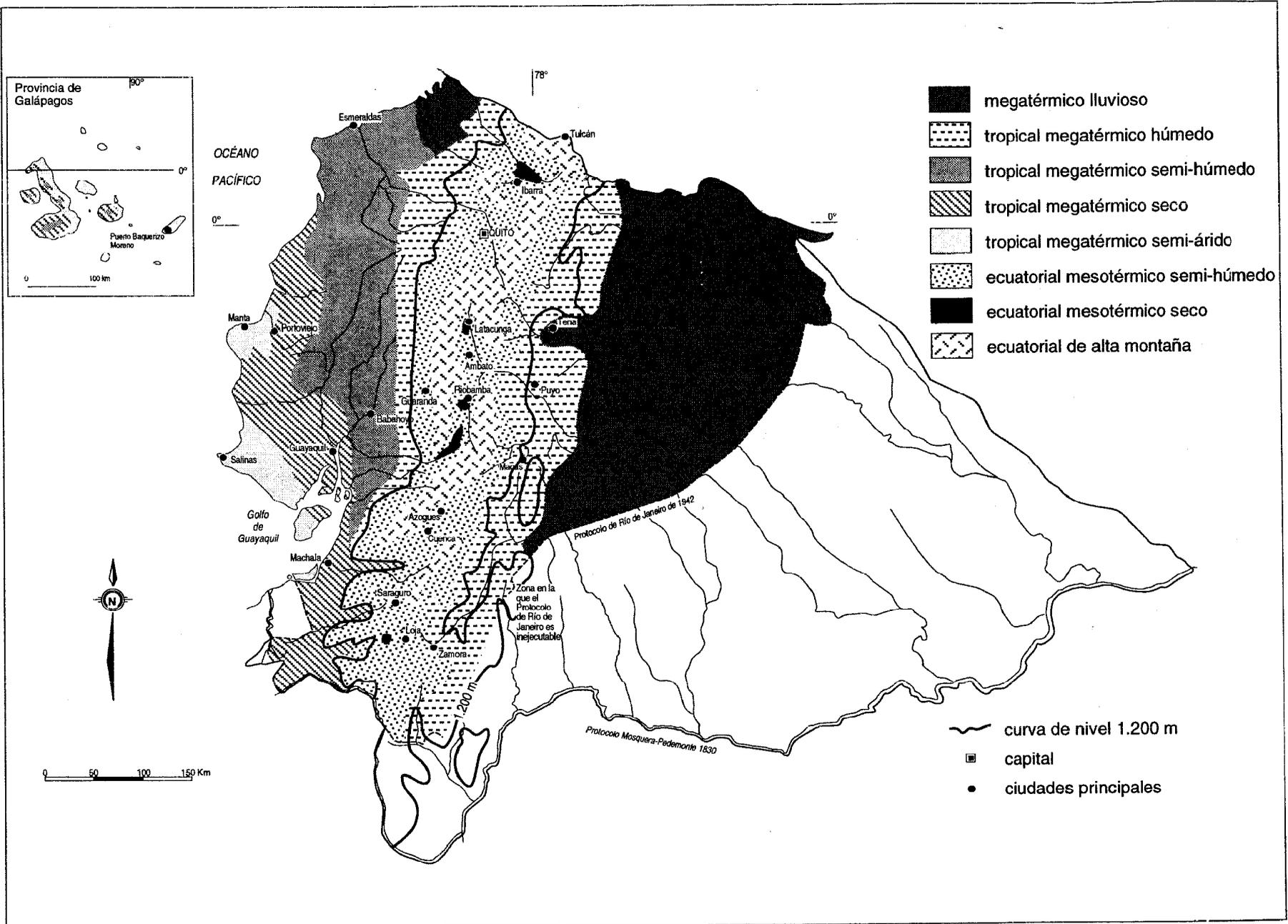
El clima descrito a continuación, que es la norma en la cuenca amazónica, abarca igualmente parte de la región septentrional de la provincia costanera de Esmeraldas.

El *clima uniforme megatérmico muy húmedo* se caracteriza por una temperatura media elevada, cercana a los 25° C, y por totales pluviométricos muy importantes, casi siempre superiores a 3.000 mm, que localmente pueden superar los 6.000 mm (volcán Reventador, por ejemplo). A pesar de la existencia de un máximo lluvioso en julio-agosto y de una baja relativa entre diciembre y febrero, la distribución de las lluvias es notablemente regular a todo lo largo del año. La humedad relativa es evidentemente muy elevada, superior al 90 % y el cielo está a menudo cubierto de nubes lo que se traduce en una insolación baja, del orden de las 1.000 horas por año. Dado que no existe reposo del ciclo vegetativo, la vegetación es una selva semper virens.

4. REGIÓN INSULAR

En las islas Galápagos reinan diferentes topoclimas que se traducen en una división de la vegetación por pisos, entre el nivel del mar y la cima de los volcanes. Si se describe en esta región un solo clima es porque el número limitado de estaciones climatológicas existentes y la mediocre calidad de las observaciones en ellas realizadas, no permiten por el momento cuantificar con suficiente precisión los elementos responsables de las diferencias climáticas.

El clima insular es de tipo ecuatorial, pero se caracteriza por una gran diversidad que depende de la altura y de la exposición de las vertientes con relación a los vientos dominantes. En los bordes litorales, hasta los 100 m.s.n.m., las temperaturas medias fluctúan alrededor de los 23° C y el clima varía de árido a muy seco; pasa poco a poco a semi-húmedo y luego a húmedo a medida que aumenta la altura. En lo que respecta al régimen de las lluvias, en el acápite II.3 se indicó ya que había que diferenciar el de las zonas bajas del de las altas. En el primer caso, se observan dos estaciones relativamente más



REPARTICIÓN DE LOS PRINCIPALES CLIMAS

húmedas de alrededor de 3 meses de duración cada una, centradas en el mes de febrero y en el período junio-septiembre, siendo la primera claramente más marcada que la segunda; en el segundo caso, el enfriamiento adiabático provoca la condensación de la humedad del aire formándose neblinas o garúas entre noviembre y febrero. Se debe subrayar sin embargo el carácter provisional de esta descripción de los regímenes, basada en datos a menudo discutibles. Estos valores muestran la influencia de la exposición a los vientos, siendo las zonas situadas al Sur de las islas, más húmedas. Es así como, en la isla Santa Cruz, a igual altitud, se observan 92,3 mm en la estación Seymour (al Norte) y 350 mm en la estación Charles Darwin (al Sur). Por otro lado, se pudo poner en evidencia *un importante gradiente pluviométrico que crece con la altura*; tal es el caso en la isla San Cristóbal: en un período de 10 años, se observaron 288,9 mm a 30 m.s.n.m., 1.383,7 mm a 300 m.s.n.m. y 1.706,6 mm a 400 m.s.n.m. Evidentemente, el gradiente térmico es inverso y las temperaturas bajan en algunos grados con la altura.

Otra característica del clima insular es la importante irregularidad interanual de las pluviometrías. Se indicó ya

que el régimen pluviométrico general estaba sometido a la influencia de dos factores principales: los desplazamientos del FIT que siguen el movimiento aparente del sol y los del Frente Ecuatorial FE que marca la zona de transición entre las aguas frías de la corriente de Humboldt y las aguas calientes de la corriente Ecuatorial Sur. Todo cambio anómalo de uno de estos factores puede provocar importantes diferencias en las alturas pluviométricas observadas habitualmente. Es así como posiciones muy meridionales del FIT y del FE producen condiciones favorables a un incremento de las precipitaciones puesto que permiten la incursión de masas de aire oceánico caliente y húmedo. A la inversa, los años que presentan una pluviometría deficitaria corresponden a un modelo opuesto en el que el FIT y el FE se localizan en una situación septentrional anormal y permanecen por más tiempo que de costumbre, estando entonces la región expuesta al aire relativamente frío proveniente de las zonas que soportan la influencia de la corriente de Humboldt. Respondiendo al la división en pisos de los topoclimas, la vegetación está muy zonificada en función de la altura y de la exposición de las vertientes a los vientos; en las partes bajas, está compuesta esencialmente de plantas espinosas.

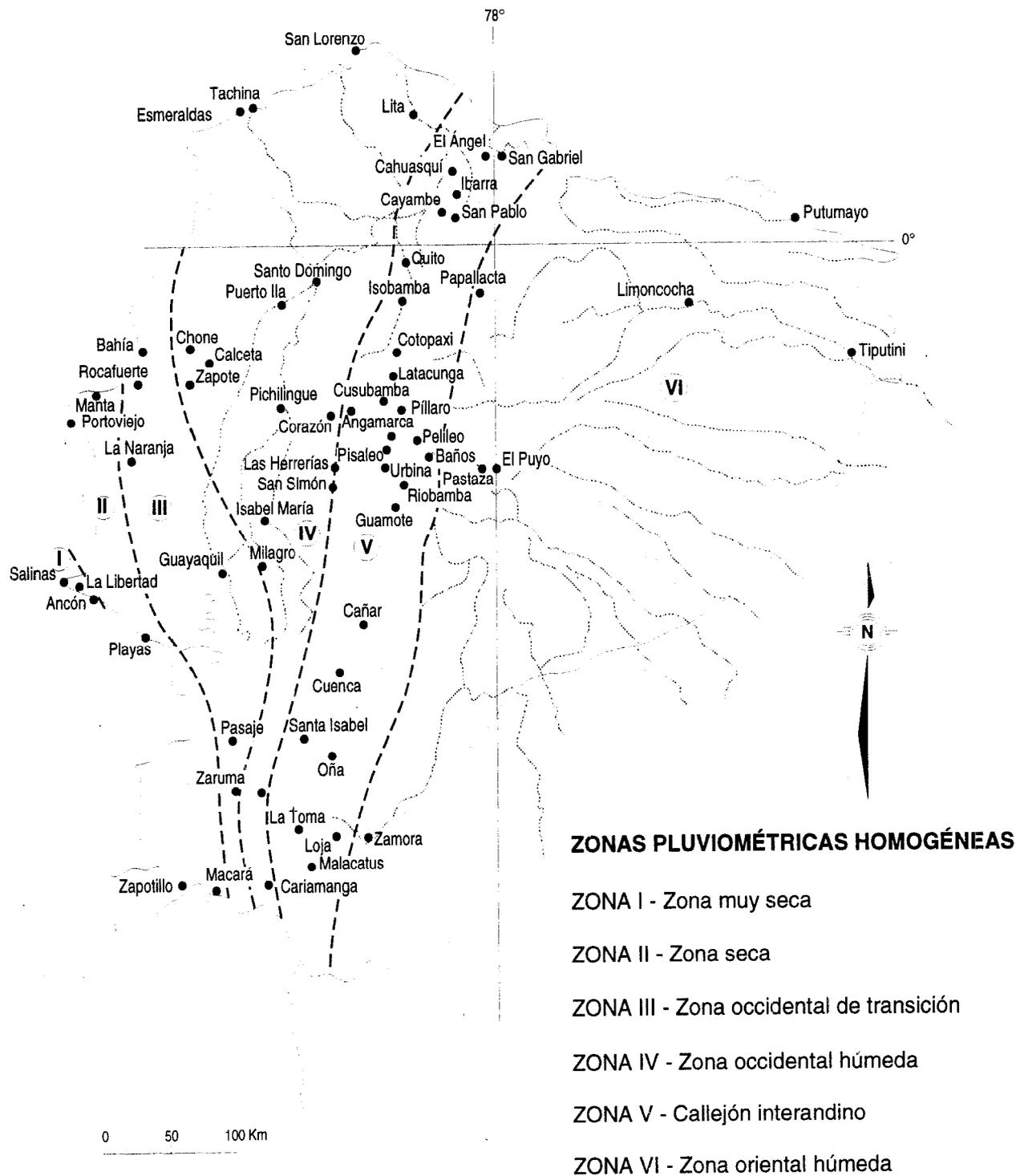


Fig. 3 - Red de referencia y zonificación pluviométrica

ARTÍCULO IV

ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y REGIONALIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN EL ECUADOR

Jean-François Nouvelot, Patrick Le Goulven, Miguel Alemán, Pierre Pourrut

Aunque la lluvia no es sino uno de los componentes del balance hídrico, es evidente que constituye el principal factor condicionante de los regímenes hidrológicos. Especialmente en la zona intertropical, en donde la escasez al igual que el exceso de agua limitan en gran parte el desarrollo de los países, la elaboración de una estrategia de utilización racional de los recursos hídricos no es posible si no se dispone de una información pluviométrica suficiente.

En el capítulo 1 del artículo III se señalaron ya los diversos problemas que afectan a las observaciones pluviométricas en el Ecuador. Raras son las series de larga duración y la calidad de la información es mediocre, sobre todo la de los últimos años que por cierto no siempre está disponible. Así, por el momento, es impensable realizar un análisis estadístico exhaustivo de todas las estaciones de la red pluviométrica para un período homogéneo actualizado.

A falta de ello, el tratamiento aplicado a las lluvias observadas, que por lo señalado es incompleto y está limitado ya sea espacialmente o en el tiempo, se centró en considerar un imperativo derivado directamente de las necesidades más urgentes de los países en vías de desarrollo, el de responder a la demanda de los actores del ordenamiento del territorio, planificadores e ingenieros que reclaman instrumentos que permitan rellenar las lagunas de información pluviométrica incluso si se trata solo de valores estimados. Elaborados con ópticas distintas, dos métodos arrojan ciertos resultados y proponen algunas técnicas que permiten lograrlo.

El más antiguo de ellos (normas pluviométricas aplicables en el Ecuador) fue elaborado en el marco de la regionalización agro-pastoral del país utilizando las estaciones representativas que disponían de registros suficientemente extensos; proporciona una información estadística sintética a nivel nacional y propone una

división zonal que, gracias a cálculos simples y rápidos, permite estimar el valor de los datos faltantes en las series incompletas, con una precisión aceptable.

El más reciente de los métodos (regionalización de las pluviometrías en el Norte del Ecuador), limitado geográficamente a una gran cuenca hidrológica, fue elaborado en el contexto de los trabajos destinados a proporcionar ciertos elementos de planificación del riego; apoyándose en la utilización de un vector regional, establece una zonificación pluviométrica más exacta que la anterior.

I. Normas pluviométricas aplicables en el Ecuador

1. OBJETIVO Y METODOLOGÍA

A nivel nacional, la información a la que se puede acceder más fácilmente es aquella relativa a los totales anuales, representada de manera global en los mapas de isoyetas que permiten evaluar rápidamente los aportes de origen meteórico. Sin embargo, la noción de media anual, suficiente en el marco de una planificación general de los recursos naturales renovables, siempre debe completarse (por ejemplo, con la información relativa a las frecuencias raras, a la irregularidad interanual o a los totales recogidos durante períodos más cortos) cuando se abordan los estudios de factibilidad de los proyectos de manejo hidráulico o de equipamiento de infraestructuras. Es la razón por la cual, en zonas en donde la información es deficiente, es indispensable disponer de un método de estimación de los parámetros de cálculo de las obras. El establecimiento de normas pluviométricas es una forma de responder a esa necesidad.

Como la gran diversidad de las regiones climáticas existentes (ver artículo III) no permite establecer fórmulas válidas para todo el territorio, se debió proceder a una

zonificación y a la división del país en zonas pluviométricas homogéneas. Estas, cuya cantidad se buscó limitar al máximo, son seis. Tal zonificación, al igual que las relaciones que unen a las diversas variables pluviométricas entre sí, se fundamentó en los resultados del análisis estadístico de los datos, para el cual se utilizaron los tipos de correlaciones simples o múltiples o las leyes de ajuste más comunes en hidroclimatología: Gauss (normal), Galton (gaussologarítmica), Gumbel (doble exponencial), Fréchet (gumbel-logarítmica), Pearson III (gamma incompleta) y Goodrich (caso particular de la ley exponencial generalizada).

Las estaciones de referencia escogidas para llevar a buen término este estudio fueron 65 (24 equipadas con un pluviógrafo) y el número de años de observaciones varía entre 10 y 85. La mayoría de las series tienen una duración superior a los 15 años, pero sólo 14 de ellas superan los 30 años y 6 tienen más de 50 años de observaciones. Los datos de cada una de las estaciones fueron procesados sistemáticamente de la siguiente manera:

- para los totales anuales, las lluvias máximas diarias y las intensidades entre 5 minutos y 24 horas, búsqueda de la ley estadística que ofrecía el mejor ajuste;

- para las lluvias anuales y diarias, búsqueda de las relaciones que unen a los valores de las frecuencias medianas y decenales, y luego de las frecuencias decenales y centenales, y establecimiento de las relaciones que permitan calcular una altura pluviométrica de una frecuencia cualquiera:

- cálculo de los intervalos de confianza;
- búsqueda de las relaciones que permitan determinar las intensidades en intervalos de tiempo que van de 5 minutos a 24 horas, a partir de las lluvias diarias de igual frecuencia.

Incluso si las sucesivas aproximaciones y ciertas simplificaciones se traducen en resultados que no siempre tienen un rigor científico extremo, el método de evaluación propuesto es sumamente fácil de utilizar. Una vez situado la región o el lugar a estudiarse en una de las grandes zonas pluviométricas homogéneas, el procedimiento a seguirse dependerá de los datos disponibles y de la diversidad de las informaciones buscadas:

- determinación de la altura pluviométrica promedio anual \bar{P} , ya sea utilizando una estación de referencia o por interpolación en el mapa de isoyetas. En ciertos casos, \bar{P} puede constituir el único dato de entrada;

- estimación de las alturas anuales para diversas frecuencias, ya sea a partir de ecuaciones generales derivadas de las leyes estadísticas (a menudo las de Galton y Pearson) o mediante las relaciones de tipo:

$$P_{0.5} = f_1(\bar{P}); \quad P_{0.1} = f_2(P_{0.5}); \quad P_{0.01} = f_3(P_{0.1})$$

- determinación de la precisión de los resultados en función del número de años de observaciones disponible o, a la inversa, definición del número de años necesario para obtener una precisión dada;

- estimación de las alturas pluviométricas diarias H para diversos períodos de retorno, a partir de las leyes estadísticas o mediante las relaciones:

$$H_{0.5} = f_1(H); \quad H_{0.1} = f_2(H_{0.5}); \quad H_{0.01} = f_3(H_{0.1})$$

- estimación de diversas frecuencias de las intensidades I (o de las láminas precipitadas h) correspondientes a diferentes intervalos de tiempo t , a partir de las lluvias diarias de igual frecuencia F :

$$I_F = \Phi(t, H_F)$$

2. ALTURAS PLUVIOMÉTRICAS ANUALES

El cuadro 5 presenta los valores característicos de los totales pluviométricos anuales en las principales estaciones consideradas en cada una de las seis zonas homogéneas escogidas.

Los valores de las frecuencias raras de ser o no superadas (secas, $F = 0,90$ y $0,99$; húmedas, $F = 0,10$ y $0,01$) se calculan con base en la ley que da el mejor ajuste o mediante interpolación entre los valores obtenidos cuando dos leyes son de calidad equivalente. Salvo el caso de las estaciones de la cuenca amazónica en su conjunto o el de algunos raros puestos situados en la vertiente occidental de la cordillera andina, que presentan distribuciones estadísticas simétricas, todas las demás series siguen leyes cuya función de densidad presenta una disimetría positiva más o menos pronunciada según su pertenencia a una u otra de las zonas homogéneas. Como las leyes que dan el mejor ajuste son las de Pearson III y sobre todo de Galton, el valor de los intervalos de confianza se calcula suponiendo que las distribuciones empíricas corresponden a una ley gaussologarítmica. Se debe agregar que, aparte de la ley normal, sólo la ley de Galton permite calcular la precisión de los resultados de manera relativamente simple y sin mayor riesgo de error (cuando no se dispone de una computadora, lo que era el caso en el Ecuador en esa época). Se juzgó efectivamente útil indicar esa precisión dada la gran diversidad de regímenes pluviométricos al igual que la disparidad en la duración de las series observadas.

2.1. Zonificación de las pluviometrías

Después de haber retomado todos los parámetros estadísticos característicos de las leyes de Gauss, Galton, Pearson (diversas frecuencias calculadas con un parámetro de posición P_0 , ya sea nulo o diferente de cero; valores de la pendiente « a » y de la constante « b » de la recta de Galton; valores del parámetro de escala S o del parámetro de forma g de Pearson) y de haberlos comparado

ESTACIONES				VALORES CARACTERÍSTICOS										
nombre	altitud	latitud	longitud	N	P	σ	Cv	0,99	0,90	0,50	0,10	0,01		
SALINAS	6	2° 12' S	80° 59' W	21	140,4	136,7	0,97		24	100	200			
LIBERTAD	6	2° 12' S	80° 52' W	18	194,1	171,9	0,88		55	145	250			
ANCÓN	25	2° 20' S	80° 51' W	10	200,5	204,9	1,02		20	140	460			
MANTA	6	0° 57' S	80° 41' W	27	210,1	142,6	0,68		75	170	385			
PLAYAS	6	2° 38' S	80° 33' W	14	401,5	243,7	0,61		135	360	720			
MACHALA	6	3° 15' S	79° 58' W	24	576,7	388,9	0,67	(145)	225	465	1.050	(2.000)		
ZAPOTILLO	335	4° 23' S	80° 14' W	14	448,0	328,5	0,73		100	365	900			
MACARÁ	430	4° 23' S	79° 57' W	15	506,3	261,6	0,52		205	460	865			
BAHÍA	3	0° 36' S	80° 23' W	19	551,7	191,2	0,35		310	530	810			
ROCAFUERTE	10	0° 55' S	80° 27' W	15	392,9	156,4	0,40		210	375	600			
PORTOVIEJO	44	1° 04' S	80° 26' W	41	515,1	210,4	0,41	185	285	477	790	1.180		
LA NARANJA	520	1° 24' S	80° 27' W	14	1.193,3	422,0	0,35		655	1.130	1.735			
QUAYAQUIL	6	2° 09' S	79° 53' W	65	1.100,9	466,9	0,42	390	600	1.015	1.710	2.600		
PASAJE	15	3° 19' S	79° 48' W	16	768,2	304,0	0,40		438	715	1.165			
MARABELLI	680	3° 44' S	79° 48' W	11	1.351,5	529,9	0,39		745	1.280	2.090			
SAN LORENZO	5	1° 17' N	78° 51' W	27	2.680,6	758,8	0,28	1.290	1.790	2.595	3.685	4.850		
ESMERALDAS	6	0° 57' N	79° 37' W	33	769,6	237,4	0,31	365	500	730	1.083	1.490		
LITA	571	0° 51' N	78° 28' W	16	3.738,8	700,6	0,19		2.895	3.675	4.860			
STO. DOMINGO	660	0° 14' S	79° 11' W	31	3.237,5	747,9	0,23	1.970	2.370	3.135	4.230	5.400		
PUERTO ILA	260	0° 33' S	79° 23' W	14	2.767,2	571,8	0,21		2.040	2.765	3.500			
CHONE	20	0° 41' S	80° 05' W	16	1.224,4	322,1	0,26		815	1.220	1.640			
CALCETA	10	0° 50' S	80° 09' W	15	1.017,6	363,2	0,36		600	970	1.490			
ZAPOTE	50	0° 54' S	80° 04' W	12	1.579,1	509,8	0,32		930	1.580	2.235			
PICHILINGUE	73	1° 05' S	79° 27' W	32	2.160,8	501,4	0,23	1.230	1.565	2.105	2.820	3.550		
CORAZÓN	1.500	0° 18' S	79° 04' W	10	2.414,5	501,8	0,21		1.840	2.400	3.060			
ISABEL MARÍA	7	1° 49' S	79° 33' W	39	1.840,9	677,1	0,37	660	1.060	1.750	2.735	3.800		
MILAGRO	13	2° 09' S	79° 36' W	56	1.530,2	556,6	0,36	600	900	1.440	2.260	3.240		
PORTOVELO	920	3° 43' S	79° 37' W	78	1.566,9	365,6	0,23	900	1.135	1.525	2.050	2.600		
CARIAMANGA	1.950	4° 20' S	79° 34' W	20	1.197,9	217,1	0,18	(700)	920	1.195	1.480	(1.705)		
TULCÁN	2.950	0° 49' N	77° 42' W	44	882,4	199,7	0,23	500	646	865	1.140	1.450		
EL ÁNGEL	3.055	0° 37' N	77° 56' W	17	1.023,3	342,0	0,33		640	970	1.470			
SAN GABRIEL	2.860	0° 36' N	77° 50' W	22	943,7	222,3	0,24	490	660	925	1.250	1.575		
CAHUASQUÍ	2.340	0° 31' N	78° 13' W	14	805,3	174,8	0,22		600	785	1.036			
IBARRA	2.228	0° 21' N	78° 08' W	36	634,7	145,3	0,23	380	466	616	825	1.050		
OTAVALO	2.556	0° 14' N	78° 16' W	23	854,6	191,5	0,22	495	625	835	1.110	1.380		
SAN PABLO	2.680	0° 12' N	78° 11' W	13	1.071,4	212,8	0,20		816	1.052	1.352			
QUITO-Observ.	2.818	0° 12' S	78° 29' W	85	1.216,9	218,5	0,18	765	947	1.204	1.504	1.780		
ISOBAMBA	3.058	0° 22' S	78° 33' W	13	1.484,9	225,0	0,15		1.210	1.470	1.775			
COTOPAXI	3.560	0° 42' S	78° 33' W	30	1.136,7	357,2	0,31	570	745	1.075	1.605	2.250		
LATACUNGA	2.560	0° 54' S	78° 37' W	19	501,7	75,5	0,15		415	495	600			
CUSUBAMBA	3.205	1° 04' S	78° 42' W	14	589,5	211,4	0,36		355	555	865			
ANGAMARCA	2.970	1° 07' S	78° 56' W	14	667,1	204,0	0,31		430	645	835			
PÍLLARO	2.805	1° 10' S	78° 33' W	16	678,9	137,1	0,20		515	670	859			
AMBATO	2.523	1° 15' S	78° 37' W	57	488,7	120,6	0,25	260	341	475	650	800		
PATATE	2.360	1° 19' S	78° 30' W	22	623,9	150,0	0,24	325	440	610	825	1.035		
TISALEO	3.327	1° 21' S	78° 40' W	22	692,0	105,2	0,15	480	552	685	830	970		
BAÑOS	1.843	1° 24' S	78° 25' W	60	1.405,7	271,7	0,19	1.085	1.155	1.340	1.740	2.390		
URBINA	3.609	1° 29' S	78° 43' W	14	967,3	172,1	0,18		770	955	1.193			
L. HERRERÍAS	3.650	1° 36' S	78° 56' W	13	771,0	255,8	0,33		470	740	1.110			
SAN SIMÓN	2.800	1° 38' S	78° 59' W	14	762,1	149,8	0,20		580	750	960			
RIOBAMBA	2.796	1° 39' S	78° 39' W	27	413,8	96,3	0,23	235	300	405	540	685		
GUASLÁN	2.750	1° 44' S	78° 39' W	14	623,5	118,1	0,19		484	615	775			
CAÑAR	3.104	2° 34' S	78° 56' W	19	473,8	111,9	0,24	268	341	481	622	790		
CUENCA	2.527	2° 54' S	78° 59' W	25	858,6	149,0	0,17	515	670	855	1.050	1.205		
STA. ISABEL	1.598	3° 20' S	79° 20' W	15	501,8	131,6	0,26		340	485	675			
OÑA	2.430	3° 28' S	79° 09' W	14	534,0	172,6	0,32		335	510	760			
LA TOMA	2.238	3° 52' S	79° 23' W	16	404,7	120,0	0,30		260	390	565			
LOJA	2.135	4° 00' S	79° 12' W	35	819,0	138,2	0,17	530	645	815	1.000	1.170		
MALACATUS	1.600	4° 13' S	79° 16' W	14	671,0	140,8	0,21		500	660	855			
PUTUMAYO	230	0° 07' S	75° 52' W	8	3.308,3	761,8	0,23		2.410	3.225	4.315			
PAPALLACTA	3.160	0° 20' S	78° 05' W	12	1.360,0	234,5	0,17		1.085	1.330	1.670			
LIMONCOCHA	219	0° 25' S	76° 37' W	7	3.244,2	324,0	0,10		2.830	3.240	3.660			
TIPUTINI	220	0° 47' S	75° 31' W	16	2.521,4	514,9	0,20		1.870	2.480	3.200			
TENA	527	1° 00' S	77° 48' W	17	3.931,3	758,6	0,19		3.080	3.900	4.910			
PASTAZA	1.043	1° 10' S	78° 03' W	15	5.088,9	506,0	0,10		4.475	5.050	5.760			
PUYO	950	1° 30' S	77° 51' W	13	4.582,6	473,2	0,10		4.010	4.540	5.210			
ZAMORA	970	4° 05' S	78° 58' W			166,1	0,08		1.755	1.963	2.175			

Cuadro 5 - Alturas pluviométricas anuales (mm)

en todas las estaciones, la definición de la zonificación se efectuó escogiendo solo tres parámetros: el coeficiente de variación C_v , la pendiente « a » de la recta de Galton y el parámetro de forma γ de la ley de Pearson. Es interesante observar que, aunque los dos parámetros no sean matemáticamente comparables de una estación a otra sino cuando $P_0 = 0$, se constata que la simplificación utilizada nunca provoca un error significativo. Se perdonará entonces el hecho de haber sacrificado la precisión científica a la necesidad de obtener resultados homogéneos.

• **Zona 1, muy seca**

No cubre sino una reducida superficie, la de la punta de la Península de Santa Elena. Las estaciones más representativas son Salinas, La Libertad y Ancón. Los parámetros escogidos tienen los siguientes valores:

$$P_{0,5} < 170 \text{ mm}$$

$$0,8 < C_v < 1$$

$$2,7 < a < 3$$

$$\gamma \text{ cercano a } 1$$

• **Zona 2, seca**

Ocupa una franja de 30 a 50 Km de ancho, alargada del Norte al Sur de Manta hasta la frontera peruana. Las estaciones representativas de esta zona son Manta, Playas, Machala y Zapotillo. Se caracteriza por:

$$170 \text{ mm} < P_{0,5} < 500 \text{ mm}$$

$$0,5 < C_v < 0,8$$

$$3 < a < 4,5$$

$$1,5 < \gamma < 3,5$$

• **Zona 3, occidental de transición**

Situada al Este de la anterior, alcanza un ancho máximo de 100 Km en la latitud de Guayaquil. Aunque presenta totales pluviométricos bastante diferentes, se pueden citar como estaciones representativas Portoviejo, Guayaquil y Pasaje. Los valores de los parámetros característicos son:

$$500 \text{ mm} < P_{0,5} < 1.200 \text{ mm}$$

$$0,35 < C_v < 0,45$$

$$5 < a < 6$$

$$4 < \gamma < 6,5$$

• **Zona 4, occidental húmeda**

Situada de Norte a Sur a lo largo de la cordillera, cubre sobre todo la parte ubicada al Norte de 0°30' de latitud sur en donde ocupa todo el espacio de los Andes al litoral. La transición con la zona 3 es muy progresiva y el trazado cartográfico del límite que las separa no es sino la situación promedio de una franja más o menos ancha en donde por cierto están situadas las estaciones de Esmeraldas-Tachina, Calceta, Isabel María y Milagro. En esa franja de transición, los parámetros estadísticos tienen valores distintos a los del resto de la zona y se superponen parcialmente a los de la zona anterior:

$$1.000 \text{ mm} < P_{0,5} < 1.700 \text{ mm}$$

$$0,35 < C_v < 0,40$$

$$6,5 < a < 7$$

$$6,5 < \gamma < 12$$

La zona posee por otro lado cierta heterogeneidad debida esencialmente a la orografía, pero el reducido número y la repartición geográfica de las estaciones no permiten desgraciadamente establecer la relación entre la altitud y las lluvias. Solo se puede observar, del Oeste hacia el Este, la existencia de un gradiente pluviométrico que es positivo hasta aproximadamente los 1.000 a 1.500 m.s.n.m. y se vuelve luego negativo. Entre las estaciones representativas se pueden citar las de Pichilingue (120 m.s.n.m.), Puerto Ila (300 m.s.n.m.), Santo Domingo (600 m.s.n.m.), Lita (740 m.s.n.m.), Portovelo (900 m.s.n.m.) y El Corazón (1.560 m.s.n.m.). Los valores característicos resultado de las estadísticas son los siguientes:

$$1.500 \text{ mm} < P_{0,5} < 5.000 \text{ mm}$$

$$0,2 < C_v < 0,3$$

$$7,5 < a < 12,5$$

$$12,5 < \gamma < 30 \text{ (siendo el intervalo } 19\text{-}30 \text{ el más probable)}$$

• **Zona 5, callejón interandino**

Mientras que las cuatro zonas anteriores están todas sometidas a la influencia pacífica (una sola estación lluviosa de diciembre a mayo), aquí se reunieron las estaciones cuya característica común es estar situadas en el callejón interandino (dos estaciones lluviosas, de enero a mayo y en octubre-noviembre) sabiendo que el relieve y la exposición cuentan entre los factores más importantes de la pluviosidad de esta zona. Sin embargo, si se exceptúan los valles bien abrigados tales como el de Salinas-Imbabura, Palmira-Ambato, Santa Isabel o La Toma-Malacatus, o regiones situadas a una altura superior a los 3.000-3.200 m.s.n.m., la homogeneidad de las pluviometrías es relativamente satisfactoria. Las distribuciones son ligeramente hipernormales, a menudo cercanas a la distribución normal. Los parámetros característicos tienen los siguientes valores:

$$400 \text{ mm} < P_{0,5} < 1.500 \text{ mm (casi siempre } 500 - 1.000 \text{ mm)}$$

$$0,15 < C_v < 0,25$$

$$10 < a < 15$$

$$15 < \gamma < 50$$

De las estaciones representativas, la de Quito-Observatorio fue instalada en 1890.

En el caso de los valles abrigados:

$$300 \text{ mm} < P_{0,5} < 500 \text{ mm}$$

$$0,25 < C_v < 0,3$$

$$7 < a < 8$$

$$10 < \gamma < 15$$

Hasta los 4.000 m.s.n.m. (por sobre esa altura no existe información alguna), se observa una cierta irregularidad debida a la orografía, pero, al igual que en el caso de los valles secos, las distribuciones son generalmente más disimétricas. Esta región alta se caracteriza por:

$$P_{0,5} > 600 \text{ mm (casi siempre } > 1.000 \text{ mm)}$$

$$0,30 < C_v < 0,35$$

ESTACIONES	INTERVALO DE CONFIANZA															
	F = 0,99		F = 0,90				F = 0,50				F = 0,10		F = 0,010			
	0,95	0,80	0,95	0,80	0,95	0,80	0,95	0,80	0,95	0,80	0,95	0,80				
SALINAS			(3)	(34)	(6)	(25)	67	147	78	128	181	494	218	412		
LIBERTAD			33	92	40	76	99	212	114	184	233	654	282	540		
ANCÓN			(0)	(81)	(2)	(51)	70	261	93	206	200	1.021	278	752		
MANTA	122	191	129	170	49	110	57	96	131	218	144	199	280	526	314	470
PLAYAS			46	258	77	206	238	490	278	433	477	1.051	560	914		
MACHALA			180	295	194	266	370	594	401	543	729	1.534	831	1.335	1.557	2.570
ZAPOTILLO			25	221	49	169	237	542	280	468	538	1.468	656	1.223	1.697	2.860
MACARÁ			113	330	144	279	342	608	384	547	606	1.213	694	1.070		
BAHÍA			218	414	250	374	444	624	475	588	662	976	715	917		
ROCAFUERTE			144	294	167	260	299	463	325	428	454	784	505	710		
PORTOVIEJO	143	237	156	218	240	337	255	318	422	538	441	516	673	927	711	877
LA NARANJA			475	891	537	794	922	1.380	996	1.280	1.331	2.252	1.472	2.042	941	1.478
GUAYAQUIL	322	473	344	442	525	686	550	655	919	1.121	951	1.083	1.497	1.954	1.567	1.866
PASAJE			330	574	366	518	583	878	629	813	883	1.637	979	1.500	2.152	3.142
MARCABELLI			465	1.107	564	957	974	1.649	1.085	1.499	1.480	2.783	1.682	2.480	2.297	2.942
SAN LORENZO	1.033	1.612	1.119	1.498	1.541	2.080	1.626	1.971	2.376	2.895	2.419	1.783	3.180	4.271	3.353	4.050
ESMERALDAS	300	445	321	415	435	574	457	547	659	809	683	481	942	1.245	989	1.186
LITA			2.529	3.314	2.660	3.151	3.326	4.061	3.452	3.912	4.074	5.330	4.284	5.069	1.220	1.818
STO. DOMINGO	1.735	2.249	1.812	2.147	2.146	2.625	2.220	2.533	2.897	3.396	2.977	3.303	3.783	4.738	3.981	4.555
PUERTO ILA			1.697	2.430	1.822	2.277	2.448	3.112	2.565	2.977	3.001	4.065	3.182	3.843	4.591	6.369
CHONE			658	1.001	713	928	1.059	1.402	1.117	1.331	1.366	1.962	1.463	1.836	4.855	3.014
CALCETA			460	783	508	709	799	1.177	860	1.095	1.148	1.934	1.266	1.754		
ZAPOTE			692	1.249	775	1.116	1.291	1.934	1.394	1.790	1.707	2.925	1.892	2.640		
PICHILINGUE	1.055	1.434	1.112	1.360	1.405	1.749	1.430	1.713	1.944	2.279	1.999	2.217	2.534	3.138	2.630	3.024
CORAZÓN			1.549	2.212	1.653	2.057	2.081	2.783	2.198	2.677	2.504	3.771	2.793	3.475	3.054	4.127
ISABEL MARÍA	477	878	537	798	883	1.260	942	1.188	1.558	1.959	1.623	1.885	2.369	3.148	2.491	2.999
MILAGRO	490	730	526	683	788	1.026	805	1.005	1.312	1.680	1.355	1.630	1.999	2.553	2.086	2.449
PORTOVELO	811	997	841	963	1.050	1.219	1.083	1.190	1.448	1.605	1.474	1.577	1.917	2.192	1.962	2.142
CARIAMANGA	563	859	611	798	811	1.040	855	994	1.097	1.300	1.192	1.261	1.383	1.584	1.418	1.545
TULCÁN	438	570	459	545	591	706	609	685	791	903	809	882	1.044	1.245	1.076	1.208
EL ÁNGEL			509	804	554	739	819	1.148	872	1.078	1.172	1.843	1.275	1.695	1.277	1.647
SAN GABRIEL	390	601	425	559	556	774	593	731	831	1.025	885	988	1.093	1.423	1.149	1.358
CAHUASQUÍ			508	709	541	666	693	889	728	848	875	1.226	933	1.151	1.310	1.879
IBARRA	337	431	351	412	425	512	439	495	573	663	587	640	745	915	772	883
OTAVALO	411	596	440	552	549	712	575	679	759	919	786	888	973	1.264	1.022	1.206
SAN PABLO			694	960	738	907	838	1.186	977	1.133	1.151	1.588	1.224	1.494	1.051	1.655
QUITO-Observ.	705	829	725	907	897	999	914	981	1.159	1.251	1.174	1.234	1.429	1.582	1.455	1.555
ISOBAMBA			1.070	1.369	1.101	1.306	1.341	1.611	1.389	1.556	1.570	2.007	1.645	1.916	1.662	1.906
COTOPAXI	483	683	511	640	656	851	685	812	967	1.198	1.036	1.116	1.375	1.880	1.450	1.779
LATACUNGA			306	450	396	436	462	533	474	518	539	674	560	645	1.791	2.841
CUSUBAMBA			270	466	300	421	453	679	489	630	658	1.137	730	1.075	1.937	2.619
ANGAMARCA			332	550	367	501	540	767	578	718	742	1.172	810	1.077		
PÍLLARO			455	584	476	557	598	751	624	719	223	1.017	773	955		
AMBATO	220	295	239	283	312	372	322	362	446	506	456	495	597	708	615	687
PATATE	248	415	274	380	374	514	397	486	547	678	570	652	718	943	758	899
TISALEO	421	547	442	522	513	616	530	596	640	733	656	755	758	909	784	878
BAÑOS	1.064	1.114	1.070	1.103	1.141	1.171	1.146	1.165	1.292	1.397	1.307	1.376	1.501	1.911	1.646	1.848
URBINA			673	881	708	837	862	1.058	896	1.018	1.039	1.373	1.096	1.303	2.033	2.870
L. HERRERÍAS			357	618	396	557	608	801	655	836	851	1.447	941	1.309	2.143	2.607
SAN SIMÓN			497	677	527	638	670	840	699	805	824	1.119	973	1.056		
RIOBAMBA	197	280	210	263	266	339	277	324	370	443	382	429	478	610	499	584
GUASLÁN			416	561	440	531	552	685	575	658	672	891	710	846	576	815
CAÑAR	218	338	233	308	292	398	310	376	412	518	429	495	534			
CUENCA	438	605	465	571	607	739	629	713	796	918	817	895	955	1.155	980	1.116
STA. ISABEL			278	416	300	385	419	560	443	531	556	820	598	762	1.063	1.366
OÑA			272	422	293	386	428	612	457	571	588	992	647	896	1.112	1.306
LA TOMA			209	323	227	298	334	456	354	430	457	699	495	646		
LOJA	473	583	492	571	598	696	614	678	771	862	786	846	928	1.078	952	1.050
MALACATUS			424	589	451	554	585	745	612	712	727	1.006	773	946	1.055	1.297
PUTUMAYO			1.881	3.088	2.073	2.802	2.681	3.879	2.883	3.607	3.360	5.541	3.707	5.022		
PAPALLACTA			883	1.287	960	1.210	1.181	1.479	1.238	1.422	1.468	1.872	1.525	1.795		
LIMONCOCHA			2.444	3.216	2.597	3.063	2.954	3.526	3.068	3.412	3.274	4.046	3.427	3.893		
TIPUTINI			1.497	2.243	1.636	2.104	2.203	2.757	2.307	2.653	2.627	3.573	2.966	3.434		
TENA			2.468	3.531	2.667	3.333	3.507	4.293	3.653	4.147	4.379	5.441	4.577	5.243		
PASTAZA			4.094	4.856	4.236	4.713	4.768	5.332	4.874	5.226	5.379	6.141	5.522	5.990		
PUYO			3.622	4.398	3.768	4.250	4.252	4.828	4.362	4.719	4.822	5.598	4.698	5.451		
ZAMORA			1.605	1.905	1.662	1.848	1.854	2.076	1.896	2.034	2.025	2.325	2.082	2.260		

* Estaciones situadas en el límite de dos zonas

Cuadro 6 - Alturas pluviométricas anuales (mm)

$$6,5 < a < 8$$

$$9 < \gamma < 12$$

• **Zona 6, oriental húmeda**

Corresponde a la región amazónica que se mantiene permanentemente bajo la influencia de masas de aire húmedo continental. Aunque la información disponible no es suficiente como para poder sacar conclusiones definitivas, parece indiscutible que la cordillera andina juega un papel importante en la distribución de las lluvias: es así como, al igual que en la vertiente occidental, las alturas pluviométricas máximas anuales se observan entre los 1.000 y los 1.500 m de altura. Sus características generales son las siguientes:

$$1.500 \text{ mm} < P_{0,5} < 6.000 \text{ mm}$$

$$0,1 < C_v < 0,2$$

$$10 < a < 27$$

$$22 < \gamma < 150$$

Sin embargo, sin que se pueda por ahora adelantar una explicación satisfactoria del fenómeno, existe una cierta heterogeneidad y se pueden distinguir dos grupos de estaciones.

El primero está constituido por las estaciones de la parte septentrional: Tena, Tiputini y Putumayo:

$$C_v \text{ cercano a } 0,2$$

$$10 < a < 12$$

$$22 < \gamma < 27$$

El segundo, caracterizado por una reducida variabilidad de las observaciones, está formado por las estaciones de Pastaza, Limoncocha, Zamora y El Puyo:

$$C_v \text{ cercano a } 0,1$$

$$22 < a < 27$$

$$100 < \gamma < 150$$

Aunque esta zona presenta algunas similitudes con la zona húmeda occidental, ciertos rasgos característicos permiten diferenciarlas:

- todas las estaciones de la cuenca amazónica tienen distribuciones normales o muy cercanas a la normal, mientras que ello es totalmente excepcional en la vertiente occidental en donde las funciones de densidad tienen una marcada disimetría positiva, consecuencia de la influencia del fenómeno El Niño (artículo V);

- a pesar de algunas ligeras fluctuaciones mensuales, la región oriental es regada abundantemente a todo lo largo del año mientras que la zona húmeda occidental tiene un ciclo estacional caracterizado por una estación seca marcada, entre junio y octubre.

2.2. Relaciones entre alturas pluviométricas anuales medias y medianas

Se sabe que la media aritmética, utilizada a menudo por la simplicidad de su cálculo, tiene una probabilidad que depende de la distribución estadística de la muestra estudiada; solamente en el caso de la ley

normal la frecuencia de la media es 0,5 puesto que entonces media \bar{P} , mediana $P_{0,5}$ y modal P_m tienen el mismo valor.

Al describir las seis zonas pluviométricas homogéneas, se pudo observar que si bien los totales anuales de algunas estaciones siguen leyes simétricas normales o casi normales (región oriental), la gran mayoría presenta ajustes unimodales disimétricos. Como siempre se trata de disimetría positiva, se encontrará, en orden creciente, modal-mediana-media. Estos tres parámetros están vinculados por la relación aproximada:

$$\bar{P} - P_{0,5} = \frac{(\bar{P} - P_m)}{3}$$

En cambio, las relaciones entre media y mediana dependen del tipo de ley escogida y del valor de sus parámetros.

A continuación se presentan las relaciones empíricas que, para cada una de las regiones pluviométricas homogéneas, permiten estimar el valor de la mediana a partir de la media, en milímetros. Todas esas relaciones son altamente significativas en el intervalo de confianza de probabilidad 95 % (J.-F. Nouvelot, 1982).

Zona 1: $P_{0,5} = 0,725 \bar{P}$

Se observará que la diferencia relativa entre las dos variables supera el 25 % y que la frecuencia atribuible a la media es del orden de 0,35, es decir un período de retorno ($T = 1/F$) cercano a los 3 años.

Zona 2: $P_{0,5} = 0,85 \bar{P}$

La diferencia relativa entre las variables ya no es sino del 15 %, es decir $T = 2,4$ años.

Zona 3: $P_{0,5} = 0,93 \bar{P}$

La diferencia relativa entre $P_{0,5}$ y \bar{P} se sitúa entre el 6 y el 7 % y la frecuencia de la media es de 0,45, es decir $T = 2,2$ años.

Zona 4: $P_{0,5} = 0,98 \bar{P} + 8,8$

La diferencia relativa entre las dos variables es apenas superior al 2 %.

Zona 5: $P_{0,5} = 0,985 \bar{P} + 6,4$

La diferencia relativa entre media y mediana ya no es sino del 2 %.

Zona 6: $P_{0,5} = 0,994 \bar{P} + 15,1$

La diferencia relativa entre las dos variables es solamente de 0,5 a 1,5 %, pues la gran mayoría de las estaciones tiene una distribución normal.

2.3. Estimación de las alturas pluviométricas anuales de frecuencia rara

La estimación de los totales pluviométricos anuales correspondientes a diversas frecuencias se realiza a partir de los valores de la mediana. Tal como se hizo en el caso de la evaluación de esta última, se deben considerar como aceptables ciertas hipótesis difíciles de demostrar. Se admite entonces que la relación estocástica $P_{F_2} = f(P_{F_1})$ es lineal, que las dos variables tienen distribuciones marginales normales, que la variable independiente P_{F_1} está determinada con un error inferior al de la variable dependiente P_{F_2} , y que la auto-correlación de los valores de esta última es despreciable.

Se presentan a continuación, para cada una de las zonas pluviométricas homogéneas, las ecuaciones que permiten estimar las lluvias anuales decenales (a partir de la mediana), centenales (a partir de la decenal), así como las de las frecuencias intermedias. Se diferencian las frecuencias superadas (frecuencias secas, 0,9 y 0,99) de aquellas no superadas (húmedas, 0,1 y 0,01). Por otro lado, se verificó que todos estos vínculos eran fuertemente significativos en el intervalo de confianza de probabilidad 95 %. El lector que desee obtener muy rápidamente una evaluación de los valores de las frecuencias raras a nivel regional, encontrará al final de cada párrafo el cociente P_{F_2} / P_{F_1} ; tal método de estimación es evidentemente menos exacto.

a) Lluvias anuales de frecuencia decenal seca, en mm

Zonas 1 y 2: $P_{0,9} = 0,53 P_{0,5} - 35$

Zona 3: $P_{0,9} = 0,61 P_{0,5} - 14$

Zona 4: $P_{0,9} = 0,82 P_{0,5} - 169$

Zona 5: $P_{0,9} = 0,81 P_{0,5} - 47$

Zona 6: $P_{0,9} = 0,87 P_{0,5} - 121$

Valores del cociente $P_{0,9} / P_{0,5}$:

Zonas 1 y 2 = 0,40; Zona 3 = 0,60; Zona 4 = 0,75;

Zona 5 = 0,76; Zona 6 = 0,83.

b) Lluvias anuales de frecuencia decenal húmeda, en mm

Zona 1: $P_{0,1} = 2,20 P_{0,5} + 100$

Zona 2: $P_{0,1} = 1,97 P_{0,5} + 44$

Zona 3: $P_{0,1} = 1,74 P_{0,5} - 66$

En la franja de transición entre las zonas 3 y 4:

$R = 0,998$ con $N = 5$; $P_{0,1} = 1,60 P_{0,5} - 51$

Zona 4: $P_{0,1} = 1,26 P_{0,5} + 104$

Zona 5: $P_{0,1} = 1,23 P_{0,5} + 73$

Zona 6: $P_{0,1} = 1,13 P_{0,5} + 227$

Valores del cociente $P_{0,1} / P_{0,5}$:

Zona 1 = 3; Zona 2 = 2; Zona 3 = 1,71 (ó 1,59 en la franja de transición); Zona 4 = 1,30; Zona 5 = 1,25; Zona 6 = 1,17.

c) Lluvias anuales de frecuencia centenal seca, en mm

Dado que no existen sino pocas series lo suficientemente largas como para permitir la evaluación de los totales pluviométricos anuales correspondientes a esta frecuencia, fue necesario agrupar las tres zonas occidentales

más o menos secas.

Zonas 1, 2 y 3: $P_{0,99} = 0,65 P_{0,9}$

Zona 4: $P_{0,99} = 0,84 P_{0,9} - 90$

Zona 5: $P_{0,99} = 0,80 P_{0,9} - 5$

Zona 6: Para compensar la falta de datos, solo se puede proponer la siguiente relación: $P_{0,99} = 0,85 P_{0,9}$

Valores del cociente $P_{0,99} / P_{0,9}$:

Zonas 1, 2 y 3 = 0,65; Zona 4 = 0,77; Zona 5 = 0,80; Zona 6 = 0,85.

d) Lluvias anuales de frecuencia centenal húmeda, en mm

En este caso también, la falta de observaciones en la región seca litoral se traduce en ecuaciones aproximadas cuya precisión no está determinada.

Zona 1: $P_{0,01} = 2,20 P_{0,1}$

Zona 2: $P_{0,01} = 1,60 P_{0,1}$

Zona 3: $P_{0,01} = 1,54 P_{0,1} - 35$

Zona 4: $P_{0,01} = 1,35 P_{0,1} - 238$

Zona 5: $P_{0,01} = 1,38 P_{0,1} - 81$

Zona 6: $P_{0,01} = 1,15 P_{0,1}$

Valores del cociente $P_{0,01} / P_{0,1}$:

Zona 1 = 2,20; Zona 2 = 1,60; Zona 3 = 1,51; Zona 4 = 1,28; Zona 5 = 1,23; Zona 6 = 1,15.

Los ábacos 1 a 6 permiten, a partir de la media aritmética, estimar las alturas pluviométricas anuales de frecuencia mediana y de frecuencias decenales y centenales secas y húmedas.

2.4. Estimación de los totales pluviométricos anuales de una frecuencia cualquiera

Para realizar ciertos estudios, a veces es necesario estimar no solamente los valores de las lluvias de frecuencias decenales y centenales sino también los de frecuencias intermedias P_F . Su cálculo se posibilita gracias a ciertas propiedades de las leyes de Gauss, Galton y Pearson III. Sin desarrollar el fundamento de las mismas, se presentan a continuación las fórmulas utilizables:

- a partir de la ley normal, en las regiones en donde las pluviometrías siguen esa distribución (siendo u la variable reducida, ver una tabla de Gauss):

$$P_F = P_{0,5} (1 + u \cdot Cv)$$

- a partir de la ley gaussologarítmica, con $P_0 = 0$ (parámetro de posición):

$$P_F = 10 \left(\frac{u + a \log P_{0,5}}{a} \right)$$

Con una tabla de Gauss para conocer los valores de u , se dispone en los acápites 2.1 y 2.2 de los elementos necesarios para el cálculo, a y $P_{0,5}$.

- a partir de la ley Gamma incompleta, con la aproximación de Wilson:

$$P_F = P_{0,5} \left(1 - \frac{1}{9\gamma} + u \sqrt{\frac{1}{9\gamma}} \right)^3$$

Se estima γ (parámetro de forma) ya sea a partir de una estación de referencia, o a nivel regional (valores límite superior e inferior para cada zona homogénea, acápite 2.1).

2.5. Precisión de los resultados

La precisión de los resultados depende directamente del tamaño de las muestras a partir de los que han sido calculados. La amplitud de los errores puede definirse mediante el intervalo de confianza en donde existe la probabilidad α % de encontrar el verdadero valor de parámetros conocidos solamente mediante su estimación empírica. En el presente caso, los valores de los intervalos de confianza del cuadro 6 son calculados utilizando parámetros de la ley de Galton y, cada vez que es posible, los de la ley normal (región amazónica por ejemplo).

Es interesante anotar que las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los valores límite de los intervalos de confianza permiten también estimar el tamaño N de la muestra teórica necesaria para conocer, con la probabilidad α , el valor de una variable de precisión x %. Como ejemplo, tomando en cada zona pluviométrica un valor promedio de la pendiente a de la recta de Galton, se presentan a continuación los valores límite superiores e inferiores de N para obtener valores de la pluviometría anual de frecuencia decenal que tengan una precisión del 90 %, con una probabilidad del 95 %.

- Zona 1** ($a = 3$): $N_1 = 387$ años $N_2 = 473$ años
- Zona 2** ($a = 4$): $N_1 = 218$ años $N_2 = 266$ años
- Zona 3** ($a = 5,5$): $N_1 = 115$ años $N_2 = 141$ años
- Zona 4** ($a = 10$): $N_1 = 35$ años $N_2 = 43$ años
- Zona 5** ($a = 12$): $N_1 = 24$ años $N_2 = 30$ años
- Zona 6**: - primer grupo: muy cercano a la zona 5
- segundo grupo ($a = 25$): $N =$ del orden de 6 a 7 años.

Al examinar estos valores, se constata que a veces habría que moderar la confianza que se tiende a atribuir a ciertos resultados estadísticos con el pretexto de que se refieren a un período homogéneo, olvidando que su precisión está ligada igualmente a la forma de su distribución, y por lo tanto a su variabilidad. En todo caso, abogan por la perennidad y el refuerzo de la densidad de las redes de medidas.

3. ALTURAS PLUVIOMÉTRICAS DIARIAS

El estudio de las alturas pluviométricas diarias se basa en las relaciones que, a nivel regional (y solamente a ese nivel), las vinculan con las alturas pluviométricas anuales de igual frecuencia.

El análisis estadístico se realiza con base en una muestra de las alturas máximas observadas en 24 horas, a razón de un valor por año de observación. Esta manera de proceder conlleva sin duda alguna ciertas imprecisiones:

- la altura total registrada no siempre se debe a una sola lluvia relacionada con un evento meteorológico continuo. Puede corresponder al total de los diversos aguaceros y, a la inversa, una lluvia de larga duración puede haber sido truncada por un observador que se atenía estrictamente a las instrucciones de efectuar las medidas según un horario preestablecido. Sin embargo, en lo que respecta especialmente al Ecuador, se puede constatar que cuando se trata de fuertes lluvias, es excepcional observar más de un evento por día. Por otro lado, la probabilidad de que un aguacero sea truncado es muy reducida;

- la consideración de todos los totales diarios, y no solamente de los más elevados, habría proporcionado una muestra más extensa, es decir teóricamente más confiable. La falta de un banco de datos, el largo tiempo necesario para un eventual ingreso de la información (300.000 datos aproximadamente), así como la búsqueda siempre laboriosa de los límites de truncamiento que den el mejor ajuste al utilizarse las leyes truncadas (es ese el caso puesto que, por definición, la variable es nula los días sin lluvia), no permitieron trabajar sobre esa base. Nótese sin embargo que se realizaron pruebas comparativas entre muestras restringidas y completas en las estaciones pluviométricas de referencia de los tres grupos de cuencas vertientes representativas estudiadas en el Ecuador y que las diferencias constatadas nunca fueron significativas, lo que justifica el método utilizado.

Las principales características de las alturas pluviométricas diarias de cada una de las regiones homogéneas se presentan en el cuadro 7.

3.1. Zonificación de las lluvias diarias

So pena de quitar todo interés al presente estudio, se comprende que no se trata en absoluto de buscar una zonificación distinta a la propuesta en el acápite 2.1.

A continuación, se indican, para cada una de las zonas pluviométricas homogéneas, los límites superior e inferior de las alturas pluviométricas diarias de frecuencia media $H_{0,5}$ y aquellos de los parámetros estadísticos calculados: el coeficiente de variación C_v , la pendiente a de la recta de Galton y el coeficiente de forma γ de la ley de Pearson III.

- Zona 1:** $25 \text{ mm} < H_{0,5} < 30 \text{ mm}$
 $0,85 < C_v < 0,95$
a cercano a 3; γ cercano a 1
- Zona 2:** $35 \text{ mm} < H_{0,5} < 65 \text{ mm}$
 $0,55 < C_v < 0,65$
 $4 < a < 4,5$; $2,5 < \gamma < 3,5$
- Zona 3:** $50 \text{ mm} < H_{0,5} < 85 \text{ mm}$
 $0,40 < C_v < 0,50$
 $5 < a < 6$; $5 < \gamma < 6$
- Zona 4:** $65 \text{ mm} < H_{0,5} < 120 \text{ mm}$
 $0,20 < C_v < 0,30$
 $7,5 < a < 12$; $12 < \gamma < 30$

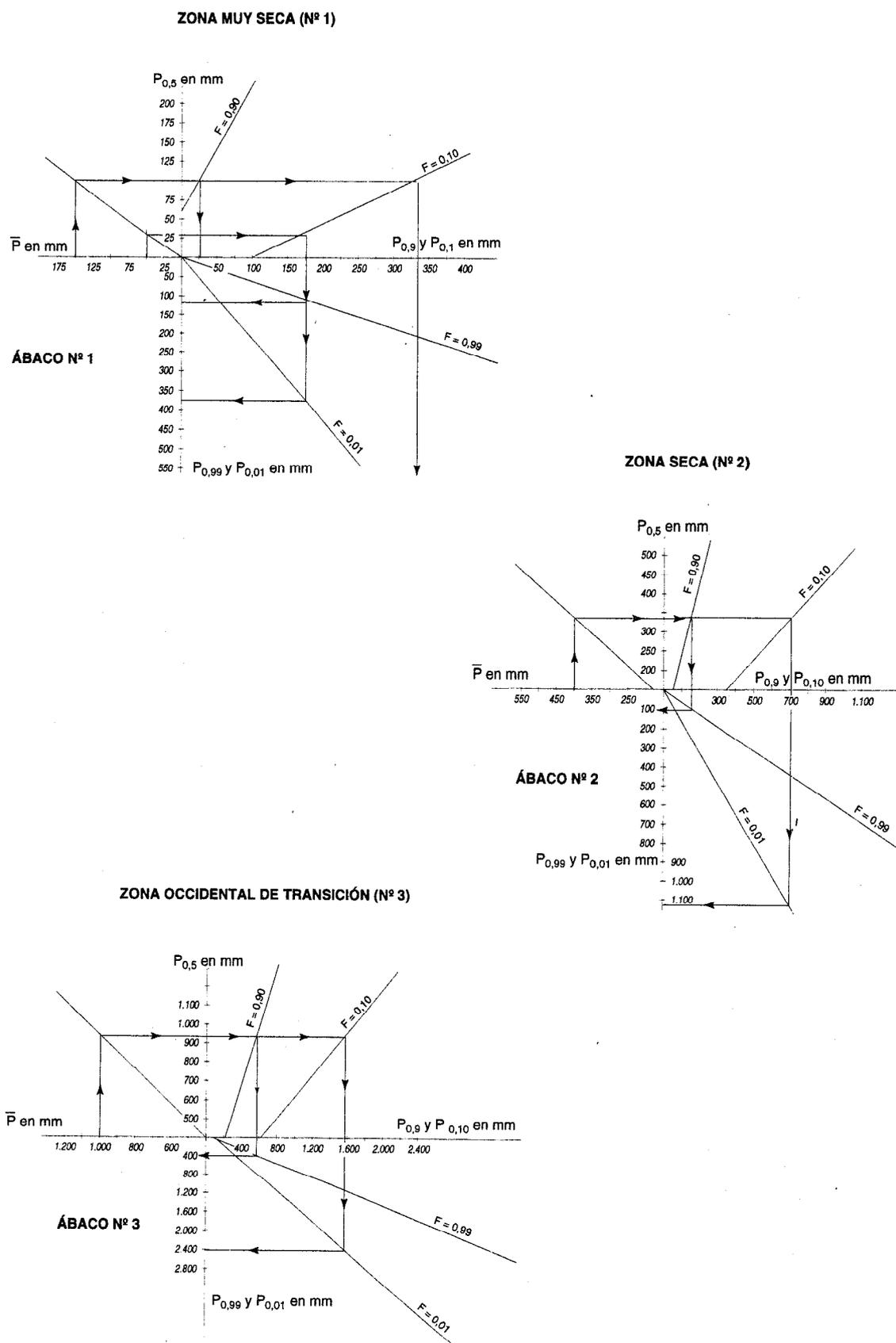


Fig. 4 - Alturas pluviométricas anuales (zonas nº 1, 2 y 3) — ábacos

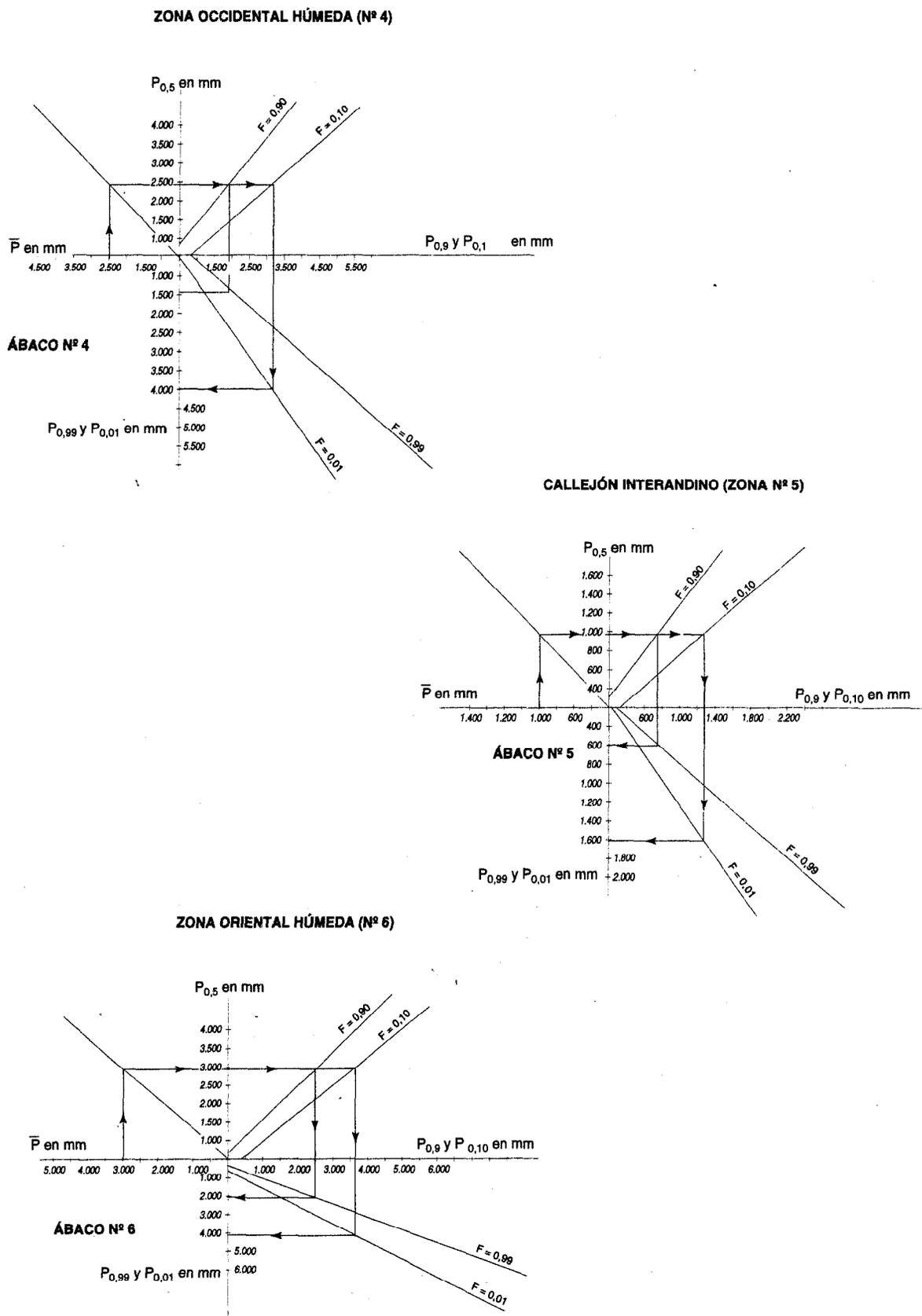


Fig. 5 - Alturas pluviométricas anuales (zonas nº 4, 5 y 6) — ábacos

En la zona de transición con la zona 3:

$$60 \text{ mm} < H_{0,5} < 110 \text{ mm}$$

$$0,30 < C_v < 0,35$$

$$6,5 < a < 7,5 ; 7 < \gamma < 35$$

Zona 5: $20 \text{ mm} < H_{0,5} < 40 \text{ mm}$

$$0,20 < C_v < 0,40$$

$$6 < a < 13; 7 < \gamma < 35$$

Al igual que en el caso de los totales pluviométricos anuales, los valores más bajos de a y de γ se relacionan con los valles secos abrigados y con las regiones cuya altura supera los 3.000 m.s.n.m.

Zona 6: $55 \text{ mm} < H_{0,5} < 130 \text{ mm}$

$$0,20 < C_v < 0,35$$

$$6 < a < 13; 10 < \gamma < 30$$

3.2. Relaciones entre alturas pluviométricas diarias y anuales de igual frecuencia

La búsqueda de estas relaciones es sumamente importante puesto que, según la lógica del estudio, van a permitir pasar de las lluvias anuales a las lluvias diarias, manteniéndose como documento de base el mapa de las isoyetas interanuales.

a) Análisis global

A continuación se presentan las relaciones que permiten calcular, en milímetros, cualquier altura diaria H de frecuencia F a partir de la altura anual P de igual frecuencia F . Se observará que las muestras utilizadas en cada zona reúnen todas las alturas pluviométricas sean estas de frecuencia mediana, decenal o centenal y es evidente que existe entonces una verdadera auto-correlación entre ciertos valores de la variables, la misma que va a traducirse en una sobreestimación del coeficiente de correlación. Por otro lado, aunque este último ya no sea lineal, el grado de dependencia de las variables fue evaluado en el intervalo de variación correspondiente a una probabilidad del 95 %. En todos los casos, el límite inferior de ese intervalo superó considerablemente el valor de 0,6.

La simplicidad y la facilidad de utilización de las relaciones propuestas justifican plenamente las aproximaciones realizadas.

Zonas 1 y 2: $H_F = 0,126 P_F + 14$

El agrupamiento de las dos zonas se debe al reducido tamaño de las muestras disponibles.

Zona 3: $H_F = 0,083 P_F + 13$

Zona 4: Como las tres zonas anteriores son bastante homogéneas en cuanto al relieve, no se consideró útil hacer intervenir la altitud para establecer la relación $H = f(P)$. El caso es distinto en las regiones que presentan fuertes desniveles en donde las relaciones no unívocas que unen respectivamente H y P a la altitud A no siguen las mismas variaciones. Es por esa razón que se

debió utilizar un sistema de correlaciones lineales múltiples.

$$H_F = 0,030 P_F - 0,018 A + 54$$

en donde H y P están expresadas en milímetros y A en metros.

De dos estaciones con alturas anuales idénticas para una misma frecuencia, aunque instaladas a altitudes diferentes, la más baja tiene una altura pluviométrica diaria máxima más elevada.

Zona 5: La altitud juega también un papel muy importante en esta zona.

$$H_F = 0,345 P_F - 0,115 A + 41$$

Zona 6: $H_F = 0,019 P_F - 0,0085 A + 54$

La linealidad de todas las relaciones propuestas no es totalmente fortuita. En efecto, al interior de cada zona homogénea, las formas de las distribuciones estadísticas de las alturas pluviométricas anuales y diarias son muy cercanas. Para convencerse de ello, basta con comparar los valores de los parámetros γ que caracterizan a cada una de esas zonas.

Si la igualdad de los parámetros de forma se verificara estrictamente, el coeficiente de paso de P_F a H_F estaría dado por la simple relación de las medias $\overline{P}/\overline{H}$.

Indiscutiblemente, esta similitud va en contra de las reglas conocidas, basadas en criterios estadísticos (teorema del límite central), que pueden enunciarse así: la ley de probabilidad ajustable a una muestra de alturas de lluvia es tanto más cercana a la normalidad cuanto que el régimen es abundante y la variable concierne una larga escala de tiempo. Se debe sin embargo señalar que esa « anomalía » se observa sobre todo al Oeste de la cordillera andina en donde la influencia de El Niño es más marcada (artículo V). Este fenómeno, de carácter a la vez oceánico y atmosférico, introduce en las muestras de los totales pluviométricos anuales valores excepcionalmente elevados (« outliers » de las estadísticas anglosajonas) que acentúan la asimetría de las distribuciones. Durante los mismos episodios, las alturas diarias máximas que intrínsecamente deberían presentar una asimetría mayor, no aumentan en las mismas proporciones, muy por el contrario, lo que explica una cierta convergencia en la forma de las distribuciones estadísticas.

b) Cálculo de las alturas pluviométricas diarias de una frecuencia cualquiera, a partir de las alturas anuales de frecuencia mediana, en mm

Las relaciones establecidas a partir de las alturas de frecuencia mediana permiten obtener una mejor precisión que aquella de las relaciones del acápite anterior (muestras sesgadas, auto-correlaciones), incluso cuando los valores de los coeficientes de correlación son inferiores. H y P están expresados en milímetros:

Zonas 1 y 2: $H_{0,5} = 0,092 P_{0,5} + 17$

Zona 3: $H_{0,5} = 0,062 P_{0,5} + 19$

ESTACIONES	VALORES CARACTERÍSTICOS				INTERVALOS DE CONFIANZA												
	N	H	σ	Cv	0,50	0,10	0,01	F = 0,50		F = 0,10		F = 0,01					
								0,95	0,8	0,95	0,8	0,95	0,8				
SALINAS	17	34,6	37,6	0,94	25	70		16,5	37,8	19,3	32,4	40,1	122,3	49,3	99,4		
MANTA	17	42,0	26,0	0,62	36	74		26,8	48,4	29,9	43,3	49,7	110,1	57,7	95,0		
PLAYAS	14	58,1	30,0	0,65	51	108		36,0	72,2	41,2	63,3	67,1	173,9	80,3	145,3		
MACHALA	6	43,5	34,6	0,80	34	84		17,3	66,8	22,7	51,0	33,6	209,7	48,6	145,3		
ZAPOTILLO	14	76,6	43,4	0,57	68	133		50,0	92,5	56,2	82,3	87,5	202,2	102,5	172,6		
MACARÁ	17	65,8	35,0	0,53	59	111		45,5	76,4	50,1	69,4	78,1	157,8	89,0	138,4		
BAHÍA	16	76,7	40,6	0,53	68	129		52,1	88,8	57,5	80,4	89,8	185,3	102,8	161,8		
ROCAFUERTE	15	53,4	30,3	0,57	48	93		35,7	64,5	39,9	57,7	62,1	139,3	72,3	119,7		
PORTOVIEJO	20	55,4	25,3	0,46	50	88	139	40,7	61,4	43,9	56,9	66,7	116,0	73,9	104,8	93,6	206,3
LA NARANJA	15	60,8	15,7	0,26	59	82		51,2	68,0	54,0	64,5	67,6	99,5	72,7	92,5		
GUAYAQUIL	38	90,7	40,3	0,44	83	143	220	72,5	95,0	76,0	90,6	119,1	171,7	126,9	161,1	169,9	284,4
PASAJE	14	63,8	26,5	0,42	59	98		46,8	74,4	51,1	68,2	71,7	133,9	80,7	191,1		
MARCABELLI	10	97,7	17,6	0,18	95	121		83,6	107,9	87,9	102,3	101,9	143,7	108,9	134,5		
SAN LORENZO	16	121,7	30,4	0,25	118	162	196	103,4	134,7	108,6	128,2	135,6	193,6	144,9	181,1	155,2	245,5
ESMERALDAS	30	70,2	30,3	0,43	65	110	165	56,1	75,4	59,0	71,6	90,0	134,4	96,5	125,4	124,7	218,3
LITA	16	90,3	28,1	0,27	90	121		77,1	102,1	81,9	98,1	103,5	138,5	110,1	132,0		
STO. DOMINGO	30	116,8	36,2	0,31	111	164	230	99,6	123,7	103,4	119,2	141,7	189,8	149,1	180,4	185,9	284,5
PUERTO ILA	16	105,9	25,0	0,22	105	135		92,6	117,4	97,3	112,7	118,3	151,7	124,6	145,5		
CHONE	16	86,6	29,6	0,34	80	124		66,9	95,7	71,5	89,5	97,8	157,3	106,8	143,9		
CALCETA	14	67,2	19,2	0,29	65	92		53,8	76,2	58,1	72,0	76,9	107,1	82,6	101,4		
ZAPOTE	12	98,1	32,5	0,33	93	141		75,9	114,3	81,9	105,6	106,9	186,1	118,8	167,4		
FICHILINGUE	20	119,4	24,4	0,20	119	151	180	107,5	130,5	111,7	126,3	135,5	166,5	141,2	160,8	157,9	202,2
CORAZÓN	12	99,4	31,1	0,31	99	140		79,2	118,8	86,7	111,3	113,3	166,8	123,5	156,6		
ISABEL MARÍA	37	115,0	39,0	0,34	109	166	237	98,0	121,2	101,7	116,9	143,8	191,6	151,2	182,3	192,8	291,4
MILAGRO	27	93,2	25,3	0,27	90	127	170	81,0	100,0	84,1	96,3	110,1	146,5	115,9	139,2	138,3	209,0
PORTOVELO	15	64,2	21,9	0,34	64	92		51,8	76,2	56,4	71,6	75,5	108,5	81,7	102,3		
CARIAMANGA	22	64,7	12,9	0,20	64	81		58,3	69,7	60,3	67,5	73,8	88,7	76,1	85,9	84,0	106,1
TULCÁN	45	42,4	14,5	0,34	40	61	89	36,3	44,1	37,5	42,6	53,6	69,5	56,0	66,4	73,5	107,8
EL ÁNGEL	19	44,2	12,4	0,42	41	68		33,8	49,8	36,3	46,3	52,4	88,3	57,7	80,2		
SAN GABRIEL	20	41,5	10,3	0,25	40	55	73	35,6	44,9	37,2	43,0	47,1	64,2	49,9	60,7	58,1	91,7
CAHUASQUÍ	16	39,1	11,8	0,30	37	54		31,6	43,4	33,5	40,9	43,1	66,8	47,3	61,7		
IBARRA	36	35,1	8,9	0,25	34	47	63	31,3	36,9	32,2	35,9	42,1	52,5	43,7	50,5	53,5	74,2
OTAVALO	12	36,1	13,0	0,36	34	53		27,2	42,5	29,6	39,0	39,3	71,5	44,1	63,8		
SAN PABLO	10	41,0	7,5	0,18	40	51		35,1	45,5	36,9	43,3	42,8	60,8	45,8	56,8		
QUITO-Observ.	85	39,6	9,2	0,23	39	52	68	37,1	41,0	37,8	40,3	48,7	55,6	49,8	54,3	6,6	75,0
ISOBAMBA	11	36,2	7,9	0,22	35	47		30,3	40,5	32,0	38,3	38,5	57,4	41,6	53,2		
COTOPAXI	32	30,9	9,8	0,32	30	44	55	26,9	33,4	28,0	32,2	38,0	50,9	40,0	48,4	45,6	66,3
LATACUNGA	21	29,2	7,1	0,24	28	38	51	25,1	31,2	26,1	30,0	32,9	43,9	34,7	41,7	40,9	63,5
CUSUBAMBA	16	24,7	5,6	0,23	24	32		21,3	27,1	22,3	25,9	27,2	37,6	28,9	35,4		
ANGAMARCA	16	30,3	11,8	0,39	28	46		22,9	34,3	24,7	31,8	34,9	60,6	38,7	54,6		
PÍLLARO	16	32,1	10,2	0,32	31	45		26,2	36,6	27,9	34,4	36,0	56,2	29,1	51,7		
AMBATO	53	27,8	7,8	0,28	27	38	47	25,1	29,1	25,7	28,3	34,4	42,0	35,6	40,6	4,2	53,6
PATATE	30	31,5	7,8	0,25	30	42	55	27,4	32,7	28,3	31,8	37,3	47,3	38,9	45,4	46,3	65,3
TISALEO	23	26,1	8,7	0,26	25	35	46	22,4	27,9	23,3	26,8	30,2	40,6	31,8	38,5	37,2	57,0
BAÑOS	54	53,4	14,7	0,27	51	73	97	47,5	54,8	48,7	53,5	66,2	80,5	68,5	77,8	84,3	111,6
URBINA	16	29,7	8,4	0,28	29	41		25,0	33,7	26,7	31,9	33,4	50,3	36,1	46,6		
L. HERRERÍAS	13	28,9	8,3	0,29	28	40		23,6	33,2	25,2	31,1	31,8	50,4	34,7	46,2		
SAN SIMÓN	14	40,0	16,5	0,41	37	62		29,4	46,6	32,1	42,7	45,3	84,8	51,0	75,3		
RIOBAMBA	30	23,3	4,9	0,21	23	30	37	21,3	24,8	21,9	24,2	27,1	33,2	28,1	32,1	32,1	42,7
GUASLÁN	14	28,2	7,9	0,28	27	38		23,0	31,7	24,4	29,8	30,8	47,0	33,3	43,7		
CAÑAR	16	21,5	5,3	0,25	21	28		18,4	23,9	19,4	22,8	23,6	33,2	25,2	31,2		
CUENCA	24	38,1	6,8	0,18	38	47	57	35,3	40,9	36,2	39,8	42,5	51,9	44,1	50,1	49,3	65,9
STA. ISABEL	15	28,7	6,9	0,24	28	38		24,5	31,9	25,8	30,4	31,8	45,4	34,0	42,5		
ÑÑA	15	29,2	10,0	0,34	28	42		23,3	33,7	24,9	31,4	32,8	53,9	36,0	49,1		
LA TOMA	18	39,1	14,7	0,38	37	58	77	30,8	44,4	33,0	41,5	45,4	74,1	49,7	67,7	55,9	106,1
LOJA	38	36,1	11,2	0,31	35	51	64	31,8	38,5	32,9	37,3	44,8	58,1	46,8	55,5	54,0	75,8
MALACATUS	15	40,8	10,8	0,26	39	55		33,7	45,1	35,6	42,7	45,2	66,9	48,7	62,1		
PUTUMAYO	9	118,3	45,7	0,39	111	178		83,7	147,2	93,4	131,8	121,6	260,6	141,0	224,6		
PAPALLACTA	15	55,6	22,5	0,41	52	85		41,8	64,6	45,4	59,6	63,4	114,0	70,8	102,1		
LIMONCOCHA	10	110,6	28,7	0,26	110	148		89,6	130,4	97,5	122,5	120,5	175,5	131,1	164,9		
TIPUTINI	17	100,4	33,5	0,33	95	144		80,3	112,4	85,4	105,6	114,9	180,5	125,0	165,9		
TENA	12	107,0	19,9	0,19	106	133		93,3	118,7	98,2	113,8	115,9	150,1	122,4	143,6		
PASTAZA	15	118,6	37,0	0,31	113	167		95,9	133,1	102,0	125,2	134,1	208,0	145,5	191,6		
PUYO	13	111,4	24,4	0,22	109	144		95,5	124,4	100,4	118,3	120,4	172,2	128,9	160,9		
ZAMORA	11	55,7	14,7	0,26	55	75		45,1	64,9	48,9	61,1	61,7	88,3	66,8	83,2		

* Estaciones situadas en el límite de dos zonas

Cuadro 7 - Alturas pluviométricas diarias (mm)

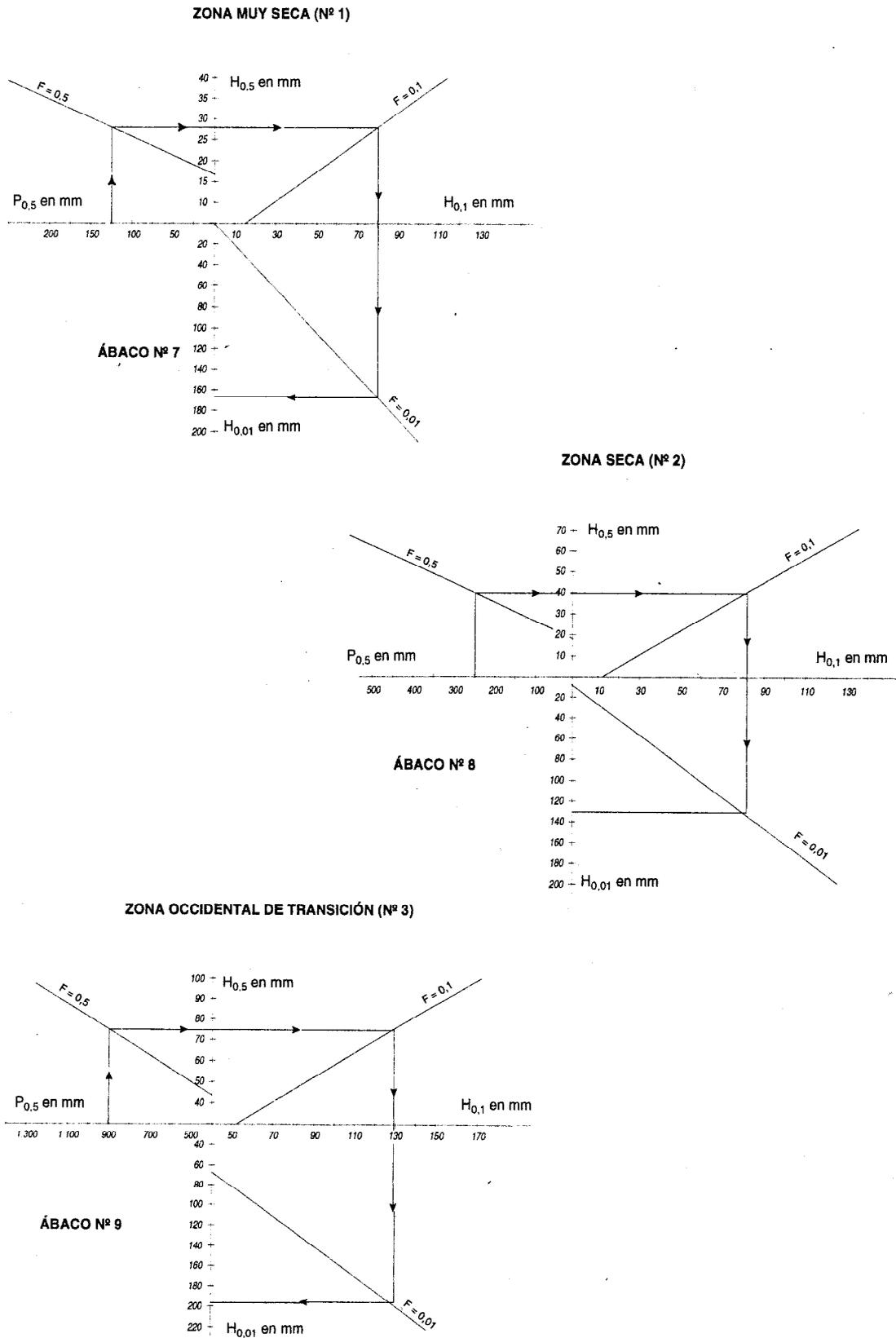


Fig. 6 - Alturas pluviométricas diarias (zonas nº 1, 2 y 3) — ábacos

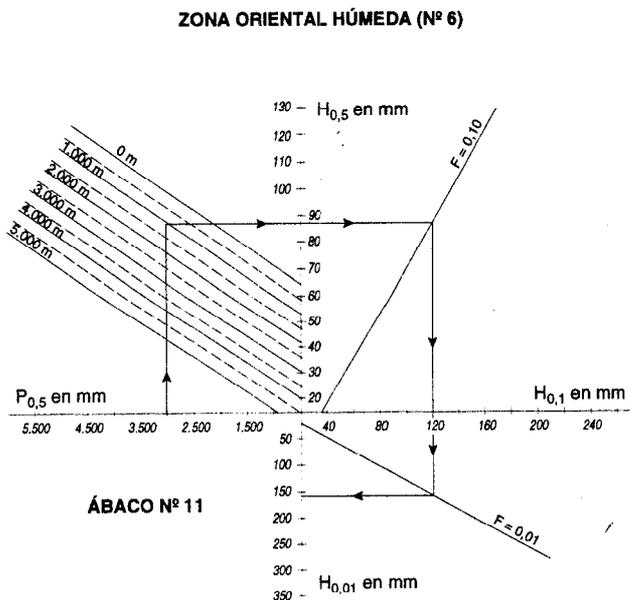
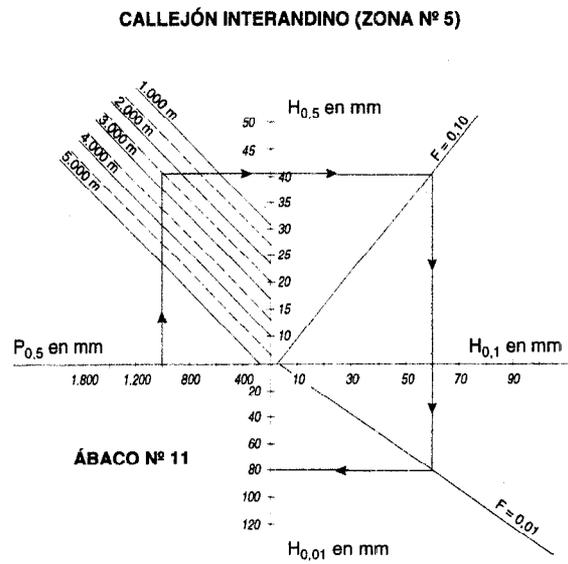
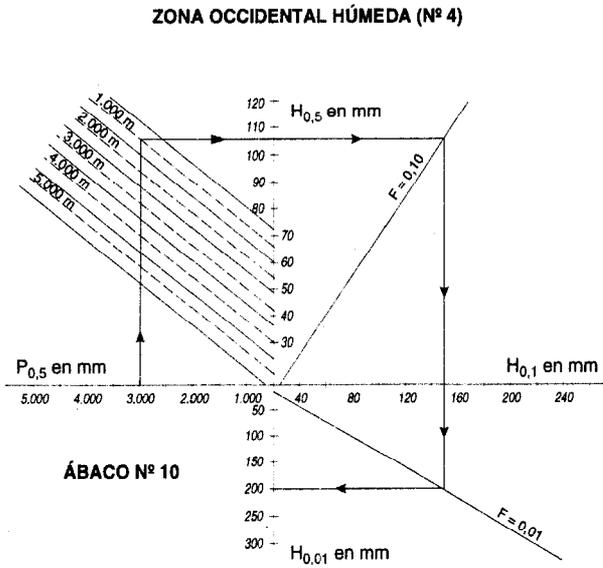


Fig. 7 - Alturas pluviométricas diarias (zonas nº 4, 5 y 6) — ábacos

Zona 4: $H_{0,5} = 0,016 P_{0,5} - 0,012 A + 64$

Zona 5: $H_{0,5} = 0,025 P_{0,5} - 0,007 A + 33$

Zona 6: $H_{0,5} = 0,014 P_{0,5} - 0,011 A + 57$

Se puede observar la similitud entre esta zona y la zona 4 húmeda occidental.

Una vez calculado $H_{0,5}$ utilizando las fórmulas anteriores y definido el parámetro de pendiente a (acápite 2.1), se pueden calcular fácilmente las alturas diarias máximas para cualquier frecuencia utilizando la fórmula extraída de la ley de Galton (ver igualmente el acápite 3.1):

$$H = 10 \left(\frac{u + a \log H_{0,5}}{a} \right)$$

Si se busca calcular únicamente las alturas relativas a las frecuencias decenales y centenales, se pueden aplicar también las relaciones presentadas a continuación, muy fáciles de utilizar:

Zona 1: $H_{0,1} = 2,80 H_{0,5}$

$H_{0,01} = 2,10 H_{0,1}$

Zona 2: $H_{0,1} = 1,745 H_{0,5} + 12$

$H_{0,01} = 1,49 H_{0,1} + 6$

Zona 3: $H_{0,1} = 1,71 H_{0,5}$

$H_{0,01} = 1,49 H_{0,1} + 6$

Zona 4: $H_{0,1} = 1,36 H_{0,5} + 4$

$H_{0,01} = 1,40 H_{0,1} - 10$

Zona 5: $H_{0,1} = 1,62 H_{0,5} - 6$

$H_{0,01} = 1,43 H_{0,1} - 3$

Zona 6: $H_{0,1} = 1,135 H_{0,5} + 20$

$H_{0,01} = 1,40 H_{0,1} - 10$

Los ábacos 7 a 12 permiten, a partir de la altura pluviométrica mediana anual a la que se agrega un factor correctivo de altitud para las zonas 4 a 6, estimar rápidamente, sin cálculo, las alturas pluviométricas diarias de frecuencia mediana, decenal o centenal.

Es particularmente interesante anotar que:

- se demuestra el papel de la altitud por las variaciones de las relaciones que vinculan las alturas pluviométricas anuales a los valores máximos diarios;
- los parámetros que caracterizan a la vez a las lluvias anuales y a las lluvias diarias siguen una misma tendencia cuando se pasa de una zona a otra.

3.3. Observaciones sobre la precisión de los resultados y la forma de las distribuciones

Todas las observaciones relativas a la precisión de los resultados presentadas en el acápite 2.5., son aplicables igualmente a las lluvias diarias.

Es raro obtener un buen ajuste con la ley normal y no se pueden utilizar sino fórmulas derivadas de la ley de Galton. En conjunto, todas las distribuciones son hipernormales y las zonas litorales se caracterizan por distorsiones más acusadas.

Ciertas estaciones parecen además presentar distribuciones plurimodales particularmente en las regiones secas en donde la variabilidad es importante. Se decidió sin embargo no tenerlas en cuenta pues esa característica no es sistemática en las estaciones de una misma zona; se la puede interpretar como proveniente de la existencia de dos categorías distintas de lluvia, correspondiendo las que son inferiores a un cierto umbral, a un tipo de aguacero diferente al de las lluvias superiores a ese umbral.

4. INTENSIDADES PLUVIOMÉTRICAS

En el Ecuador, en donde las pendientes del medio natural andino alcanzan valores elevados y la importante ocupación de los suelos está asociada a menudo a prácticas agrarias tradicionales particularmente inadaptadas, la erosión hídrica constituye una de las principales limitaciones a la valorización agrícola puesto que la degradación específica puede alcanzar 600 toneladas/ha/año en parcelas cultivadas con maíz, de 50 m² de superficie y de pendiente del 30 por ciento. Se comprende entonces el interés que reviste una estimación aceptable de las intensidades máximas cuyas implicaciones directas en los fenómenos erosivos son bien conocidas.

4.1. Método empleado

Se utilizaron 24 estaciones equipadas con registradores. Desgraciadamente, el puesto de Guayaquil debió excluirse pues la serie es de calidad extremadamente dudosa aunque de larga duración. Por otro lado, la falta de estaciones representativas con series de duración suficiente no permitió desarrollar el estudio en las zonas más secas, 1 y 2.

El estudio sigue la misma lógica metodológica utilizada para las lluvias anuales y diarias. En la gran mayoría de los casos, el mejor ajuste de las intensidades está dado por las leyes de Galton y Pearson III; dada la mayor facilidad de cálculo del parámetro de posición X_0 , se utilizó sistemáticamente la segunda.

El análisis estadístico trata de las intensidades máximas I , expresadas en mm/h, relativas a períodos de 5, 10, 15, 20, 30, 60 minutos y 24 horas. En los cuadros 8-1 a 8-8 se presentan, para las estaciones más representativas de las cuatro zonas homogéneas estudiadas, las intensidades I y las alturas de lluvia h de intervalos de tiempo t que varían de 5 minutos a 24 horas, para las frecuencias $F = 0,5, 0,1, 0,02$ y $0,01$ (es decir los períodos de retorno $T = 2, 10, 50$ y 100 años).

Para cada una de las estaciones, se trazaron luego dos gráficos en coordenadas logarítmicas:

- para cada intervalo de tiempo t , la intensidad I en función del período de retorno T ;
- para cada período de retorno T , la intensidad I en función del intervalo de tiempo t .

Se debe señalar que fue necesario verificar que los intervalos de tiempo escogidos dieran la precisión suficiente como para estudiar la relación $I = \Phi(t)$. Este trabajo se realizó en la estación de Quito-Observatorio (51 años de registros de buena calidad) para duraciones de 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 minutos y 1, 2, 6, 12 y 24 horas. En el gráfico 13 (figura 8), se puede constatar que, sea cual sea el intervalo, la relación $I = f(T)$ puede considerarse como lineal aunque con una discontinuidad para el período de retorno de 10 años. Las ecuaciones que corresponden a los dos grupos de rectas así definidas son de forma:

$$\log I = \log I_1 + \alpha \log T \text{ es decir } I = I_1 \cdot T^\alpha$$

en donde I_1 es el valor de I para $T = 1$ año.

Para cada valor de t escogido, con $T = 1$ año y $T = 10$ años:

$$\alpha = \log(I_{10}/I_1)$$

De la misma manera, las curvas de intensidad-duración en función de los períodos de retorno pueden asimilarse a haces de rectas (gráfico 14, figura 8). Allí también se observa una discontinuidad situada hacia $t = 1$ hora pero que puede variar entre 45 y 90 minutos. A veces, puede aparecer una segunda discontinuidad en las inmediaciones de $t = 15$ ó 20 minutos; es el caso en Puyo y Tiputini en la cuenca amazónica, Tulcán y Quito en la región andina y Milagro en la zona litoral. No se ha encontrado explicación satisfactoria alguna para este fenómeno.

Cada recta puede definirse mediante la siguiente ecuación:

$$\log I = \log I_2 + a \log t \text{ es decir } I = I_2 \cdot t^a$$

Tomando la intensidad I_0 que corresponde a $t = 1$ hora y $T = 1$ año (logaritmos nulos), se tiene:

$$I = I_0 \cdot t^a \cdot T^\alpha$$

Para el cálculo de los parámetros de las rectas, una vez definido $I = I(t, T)$, se siguió el método indicado por J. Guiscafré y F. Moniod (*Cahiers ORSTOM*, serie Hidrología, 1975):

$$I = I_0 \cdot t^a \cdot T^{b+c \log t} \quad (1)$$

Una estimación gráfica realizada a partir de las curvas $I = f(T)$ permite determinar los valores de las constantes de las porciones de recta (generalmente en número de dos salvo para las cinco estaciones ya citadas) para intervalos de tiempo superiores o inferiores a una hora y períodos de retorno superiores o inferiores a 10 años. Válidos para las fórmulas en donde t está expresado en horas y T en años, tales resultados están reunidos en el cuadro 9.

Se observará que en ciertos casos, como el de Quito, las rectas $I = \Phi(t)$ son paralelas sea cual sea el valor de T . Se tiene entonces la ecuación simplificada:

$$I = I_0 \cdot t^a \cdot T^b \quad (2)$$

Nótese también que el cambio de pendiente de la relación $I = \Phi(t)$ no es un fenómeno específico al Ecuador, que ya se ha observado en lugares en donde los regímenes climáticos son muy diferentes: Antillas, Africa del Norte, Brasil, e incluso en Europa.

Se debe anotar también que partiendo de las fórmulas (1) y (2), se pueden estimar las alturas pluviométricas h durante un intervalo t y un período de retorno T dado:

$$h = I_0 \cdot t^{(a+1)} \cdot T^{(b+c \log t)} \quad (3)$$

y cuando $c = 0$, $h = I_0 \cdot t^{(a+1)} \cdot T^b \quad (4)$

Todas las relaciones que unen a las intensidades máximas y las alturas pluviométricas diarias se establecen utilizando la fórmula general (1). Empleando el índice i para todos los parámetros de las fórmulas que permiten el cálculo de I para $t \geq 1$ horas y el índice j cuando $t < 1$ hora, y si H es la altura pluviométrica diaria correspondiente al período de retorno T , se tiene:

- si $t \geq 1$ hora: $I_{24} = I_{(0,i)} \cdot 24^{ai} \cdot T^{(bi+ci \log 24)}$
y $H = I_{(0,i)} \cdot 24^{(ai+1)} \cdot T^{(bi+ci \log 24)}$
es decir, cuando $c = 0$, $I = 24^{-(ai+1)} \cdot t^{ai} \cdot H$

- si $t < 1$ hora:
 $I = I_{(0,j)} \cdot t^{aj} [H / (I_{(0,i)} \cdot 24^{(ai+1)})]^{(bj+ci \log t) / (bi+ci)}$
es decir, cuando $c = 0$,
 $I_{(0,j)} \cdot t^{aj} [H / I_{(0,i)} \cdot 24^{(ai+1)}]^{(bj/bi)}$

En el caso general, cuando $c \neq 0$, la fórmula es compleja:

$$I = I_{(0,j)} \cdot t^a \cdot [H / I_{(0,i)}]^{(m+p \log t)} \cdot 24^{(q+r \log t)}$$

Para $t \geq 1$ hora: $I_{(0,j)} = I_{(0,i)}$
 $m = bi / (bi + ci \log 24)$
 $p = ci / (bi + ci \log 24)$
 $q = -m(a+1)$
 $r = -p(a+1)$

Para $t < 1$ hora: $I(0,j) \neq I(0,i)$
 $m = bj / (bi + ci \log 24)$
 $p = cj / (bi + ci \log 24)$
 $q = -m(a+1)$
 $r = -p(a+1)$

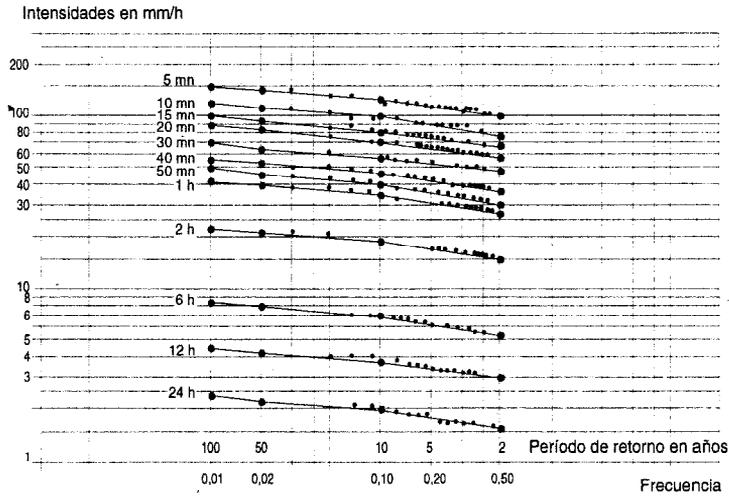
Sin embargo, la gran desproporción existente entre la complejidad del cálculo de las constantes, por una parte, y el reducido número de muestras observadas disponibles en cada una de las zonas pluviométricas, por otra, justifica la utilización de dos hipótesis simplificadoras. Estas consisten en considerar, primeramente que la relación $I = \Phi(t)$ no está formada sino de dos semi-rectas comunes al punto $t = 1$ hora, y en segundo término, que el parámetro c es nulo. Se llega entonces a fórmulas del tipo:

$$I = K \cdot t^a \cdot H^n \quad (5)$$

Para $t \geq 1$ hora: $a = ai$
 $n = 1$
 $K = 24^{-(ai+1)}$

Para $t < 1$ hora: $a = aj$
 $n = bj / bi$
 $K = I_{(0,j)} [I_{(0,i)} \cdot 24^{(ai+1)}]^{(bj/bi)}$

Todos estos parámetros pueden calcularse a partir de las constantes del cuadro 9.



QUITO OBSERVATORIO
CURVAS: ALTURA - FRECUENCIA
(51 años de observaciones)

Gráfico nº 13

QUITO OBSERVATORIO
ALTURA - DURACIÓN - FRECUENCIA
(51 años de observaciones)

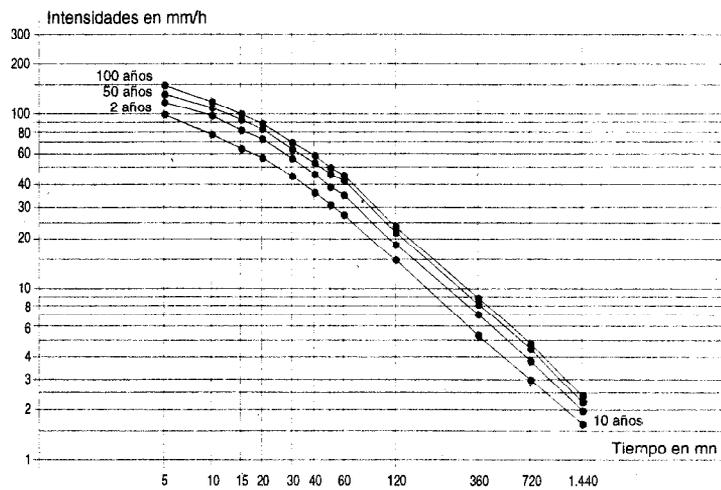
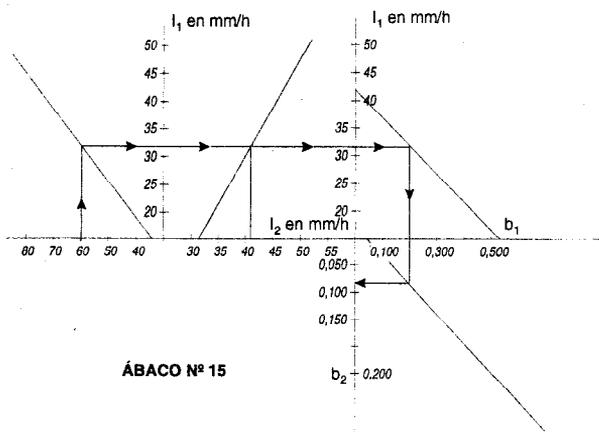


Gráfico nº 14



ÁBACO Nº 15

ZONA OCCIDENTAL DE TRANSICIÓN (Nº 3)
ESTIMACIÓN DE LAS CONSTANTES DE LAS
FÓRMULAS QUE PERMITEN EL CÁLCULO
DE LAS INTENSIDADES

- $a_1 = -0.410$
- $a_2 = -0.800$
- $i_3 = i_1$
- $i_4 = i_2$
- $b_3 = b_1$
- $b_4 = b_2$

Fig. 8

Estación pluviográfica San Lorenzo

años de observación: 12

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	127,8	10,7	184,2	15,4	231,2	19,3	250,5	20,9
10 min.	91,0	15,2	141,7	23,6	179,8	30,0	194,7	32,5
15 min.	79,6	19,9	127,1	31,8	163,1	40,8	177,3	44,3
20 min.	71,1	23,7	113,0	37,7	144,7	48,2	157,2	52,4
30 min.	58,8	29,4	94,1	47,1	120,9	60,5	131,5	65,8
60 min.	43,4	43,4	71,4	71,4	93,1	93,1	101,7	101,7
120 min.	30,0	60,0	57,1	114,2	80,1	160,2	89,5	179,0
24 horas	4,97	119,3	6,76	162,2	8,02	192,5	8,50	204,0

Estación pluviográfica Puerto Ila

años de observación: 14

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	113,1	9,4	151,4	12,6	178,2	14,9	188,4	15,7
10 min.	92,5	15,4	129,7	21,6	156,3	26,1	166,6	27,8
15 min.	81,6	20,4	118,0	29,5	144,4	36,1	154,6	38,7
20 min.	74,3	24,8	104,3	34,8	125,8	41,9	134,0	44,7
30 min.	64,2	32,1	88,6	44,3	106,0	53,0	112,7	56,4
60 min.	44,8	44,8	69,0	69,0	88,4	88,4	96,2	96,2
120 min.	34,0	68,0	51,8	103,6	65,2	130,4	70,4	140,8
24 horas	4,34	104,2	5,67	136,1	6,59	158,2	6,94	166,6

Estación pluviográfica Pichilingue

años de observación: 15

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	105,8	8,8	148,2	12,4	180,8	15,1	193,6	16,1
10 min.	90,4	15,1	123,5	20,6	146,9	24,5	155,8	26,0
15 min.	82,1	20,5	108,8	27,2	127,5	31,9	134,5	33,6
20 min.	77,0	25,7	103,8	34,6	122,7	40,9	129,8	43,3
30 min.	70,7	35,4	91,2	45,6	105,3	52,7	110,6	55,3
60 min.	55,5	55,5	73,6	73,6	86,1	86,1	90,9	90,9
120 min.	38,2	76,4	51,30	102,6	60,4	120,8	63,8	127,6
24 horas	4,90	117,6	6,35	152,4	7,35	176,5	7,73	185,5

Cuadro 8 - 1

Estación pluviográfica Portoviejo

años de observación: 18

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	94,6	7,9	149,7	12,5	191,5	16,0	207,9	17,3
10 min.	67,5	11,3	116,5	19,4	155,6	25,9	171,3	26,6
15 min.	58,9	14,7	100,3	25,1	132,7	33,2	145,6	36,4
20 min.	52,3	17,4	90,6	30,2	120,8	40,3	132,9	44,3
30 min.	42,1	21,1	73,2	36,6	97,7	48,9	107,6	53,8
60 min.	28,1	28,1	47,8	47,8	63,2	63,2	69,3	69,3
120 min.	18,2	36,4	32,4	64,8	43,7	87,4	48,3	96,6
24 horas	2,17	52,1	3,63	87,1	4,77	114,5	5,28	125,5

Estación pluviográfica Pasaje

años de observación: 14

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	92,6	7,7	121,2	10,1	141,0	11,8	148,4	12,4
10 min.	65,8	11,0	90,1	15,0	107,2	17,9	113,8	19,0
15 min.	55,0	13,8	81,0	20,3	100,0	25,0	107,4	26,9
20 min.	49,8	16,6	76,2	25,4	95,8	31,9	103,5	34,5
30 min.	41,7	20,9	68,0	34,0	88,4	44,2	96,3	48,2
60 min.	33,2	33,2	51,8	51,8	65,8	65,8	71,3	71,3
120 min.	20,3	40,6	29,1	58,2	35,4	70,8	37,8	75,6
24 horas	2,50	60,0	4,14	99,4	5,39	129,4	5,90	141,6

Estación pluviográfica La Naranja

años de observación: 14

FRECUCENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	119,8	10,0	163,1	13,6	193,7	16,1	205,3	17,1
10 min.	92,8	15,5	120,6	20,1	139,8	23,3	147,1	24,5
15 min.	81,9	20,5	101,5	25,4	114,6	28,7	119,5	29,9
20 min.	73,5	24,5	93,6	31,2	107,4	35,8	112,5	37,5
30 min.	63,8	31,9	82,2	41,1	94,8	47,4	99,5	49,8
60 min.	42,6	42,6	55,9	55,9	65,0	65,0	68,5	68,5
120 min.	25,2	50,4	33,2	66,4	38,9	77,8	41,1	82,2
24 horas	2,48	59,5	3,38	81,1	4,01	96,2	4,25	102,0

Cuadro 8 - 2

Estación pluviográfica Isabel María

años de observación: 17

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	123,2	10,3	168,2	14,0	200,0	16,7	212,1	17,7
10 min.	98,7	16,5	133,3	22,2	157,6	26,3	166,8	27,8
15 min.	89,1	22,3	121,3	30,3	144,0	36,0	152,5	38,1
20 min.	78,2	26,1	110,5	36,8	135,5	45,2	145,5	48,5
30 min.	65,3	32,7	96,4	48,2	120,8	60,4	130,6	65,3
60 min.	47,3	47,3	73,3	73,3	97,3	97,3	107,5	107,5
120 min.	30,9	61,8	50,9	101,8	66,4	132,8	72,5	145,0
24 horas	4,58	109,9	6,96	167,0	8,79	211,0	9,51	228,2

Estación pluviográfica Milagro

años de observación: 15

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	125,5	10,5	158,2	13,2	180,4	15,0	188,7	15,7
10 min.	100,5	16,8	139,9	23,3	168,2	28,0	179,0	29,8
15 min.	82,2	20,6	124,4	31,1	158,7	39,7	172,6	43,2
20 min.	75,3	25,1	107,6	35,9	131,0	43,7	140,0	46,7
30 min.	61,5	30,8	93,4	46,7	119,2	59,6	129,6	64,8
60 min.	44,5	44,5	61,9	61,9	74,6	74,6	79,5	79,5
120 min.	27,5	55,0	42,0	84,0	54,2	108,4	59,2	118,4
24 horas	3,77	90,5	5,29	127,0	6,41	153,8	6,85	164,4

Estación pluviográfica Santo Domingo de los Colorados

años de observación: 12

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	121,5	10,1	168,5	14,0	201,9	16,8	214,7	17,9
10 min.	98,7	16,5	140,2	23,4	170,0	28,3	181,4	30,2
15 min.	87,0	21,8	120,9	30,2	145,1	36,3	154,4	38,6
20 min.	85,2	28,4	119,5	39,8	144,0	48,0	153,4	51,1
30 min.	77,9	39,0	114,4	57,2	141,1	70,6	151,4	75,7
60 min.	57,8	57,8	86,4	86,4	107,5	107,5	115,7	115,7
120 min.	36,9	73,8	51,9	103,8	62,6	125,2	66,7	133,4
24 horas	4,74	113,8	6,66	159,8	8,04	193,0	8,56	205,4

Cuadro 8 - 3

Estación pluviográfica Tulcán

años de observación: 16

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	85,1	7,1	119,6	10,0	144,2	12,0	153,7	12,8
10 min.	66,4	11,1	102,0	17,0	128,6	21,4	139,0	23,2
15 min.	57,2	14,3	92,8	23,2	120,1	30,0	130,9	32,7
20 min.	50,2	16,7	81,0	27,0	103,9	34,6	112,8	37,6
30 min.	39,7	19,9	67,7	33,9	90,8	45,4	100,1	50,1
60 min.	25,1	25,1	41,0	41,0	53,2	53,2	58,0	58,0
120 min.	15,8	31,6	25,4	50,8	32,6	65,2	35,5	71,0
24 horas	1,71	41,0	2,52	60,5	3,12	74,9	3,35	80,4

Estación pluviográfica Ibarra

años de observación: 20

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	73,9	6,2	104,3	8,7	125,7	10,5	133,8	11,2
10 min.	48,1	8,0	67,3	11,2	80,9	13,5	86,2	14,4
15 min.	39,2	9,8	55,6	13,9	67,4	16,9	72,0	18,0
20 min.	33,0	11,0	47,4	15,8	57,9	19,3	61,9	20,6
30 min.	26,6	13,3	36,0	18,0	42,7	21,4	45,3	22,7
60 min.	16,8	16,8	22,3	22,3	26,1	26,1	27,5	27,5
120 min.	10,2	20,4	13,8	27,6	16,4	32,8	17,3	34,6
24 horas	1,40	33,6	1,95	46,8	2,42	58,1	2,60	62,4

Estación pluviográfica Lago San Pablo

años de observación: 10

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	80,4	6,7	110,0	9,2	130,5	10,9	138,3	11,5
10 min.	56,4	9,4	73,4	12,2	84,9	14,2	89,2	14,9
15 min.	45,9	11,5	62,4	15,6	73,9	18,5	78,3	19,6
20 min.	41,5	13,8	55,7	18,6	65,6	21,9	69,4	23,1
30 min.	32,6	16,3	44,4	22,2	52,6	26,3	55,8	27,9
60 min.	20,9	20,9	28,4	28,4	33,7	33,7	35,7	35,7
120 min.	13,0	26,0	19,5	39,0	23,9	47,8	25,6	51,2
24 horas	1,69	40,6	2,10	50,4	2,37	56,9	2,47	59,3

Cuadro 8 - 4

Estación pluviográfica Isobamba

años de observación: 16

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	105,5	8,8	122,6	10,2	133,7	11,1	137,8	11,5
10 min.	65,0	10,8	79,3	13,2	88,9	14,8	92,4	15,4
15 min.	54,4	13,6	68,8	17,2	78,6	19,7	82,3	20,6
20 min.	48,3	16,1	61,1	20,4	69,8	23,3	73,1	24,4
30 min.	39,9	20,0	51,4	25,7	59,3	29,7	62,3	31,2
60 min.	25,1	25,1	34,4	34,4	40,9	40,9	43,5	43,5
120 min.	14,7	29,4	20,2	40,4	24,0	48,0	25,5	51,0
24 horas	1,49	35,8	1,89	45,4	2,17	52,1	2,28	54,7

Estación pluviográfica Latacunga

años de observación: 20

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	71,8	6,0	110,5	9,2	139,4	11,6	150,7	12,6
10 min.	57,8	9,6	81,2	13,5	98,1	16,4	104,5	17,4
15 min.	49,3	12,3	70,8	17,7	86,3	21,6	92,3	23,1
20 min.	41,5	13,8	61,6	20,5	76,4	25,5	82,1	27,4
30 min.	32,0	16,0	49,2	24,6	61,5	30,8	66,3	33,2
60 min.	19,1	19,1	32,1	32,1	40,3	40,3	43,9	43,9
120 min.	10,5	21,0	16,4	32,8	20,8	41,6	22,5	45,0
24 horas	1,20	28,8	1,58	37,9	1,83	43,9	1,93	46,3

Estación pluviográfica Quito - Observatorio

años de observación: 51

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	100,0	8,3	126,9	10,6	143,9	12,0	150,1	12,5
10 min.	76,0	12,7	99,7	16,6	116,0	19,3	122,1	20,4
15 min.	65,0	16,3	83,7	20,9*	96,1	24,0	100,6	25,2
20 min.	57,6	19,2	74,9	25,0	86,6	28,9	91,0	30,3
30 min.	46,3	23,2	58,5	29,3	66,4	33,2	69,2	34,6
40 min.	37,4	24,9	47,4	31,6	54,1	36,1	56,5	37,7
50 min.	31,4	26,2	40,9	34,1	47,6	39,7	50,1	41,8
1 hora	27,4	27,4	35,1	35,1	40,3	40,3	42,3	42,3
2 horas	14,9	29,8	18,9	37,8	21,5	43,0	22,5	45,0
6 horas	5,48	32,9	6,96	41,8	8,03	48,2	8,45	50,7
12 horas	2,99	35,9	3,76	45,1	4,31	51,7	4,52	54,2
24 horas	1,55	37,2	1,98	47,5	2,29	55,0	2,41	57,8

Cuadro 8 - 5

Estación pluviográfica Ambato

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	35,1	2,9	70,1	5,8	101,9	8,5	115,4	9,6
10 min.	29,4	4,9	53,8	9,0	75,3	12,3	81,5	13,6
15 min.	23,9	6,0	42,4	10,6	57,0	14,3	63,0	15,8
20 min.	20,7	6,9	35,1	11,7	46,4	15,5	50,9	17,0
30 min.	15,7	7,9	26,2	13,1	34,4	17,2	37,6	18,8
60 min.	11,1	11,1	17,0	17,0	21,4	21,4	23,1	23,1
120 min.	7,1	14,2	10,3	26,0	12,7	25,4	13,6	27,2
24 horas	1,13	27,1	1,59	38,2	1,92	46,1	2,04	49,0

Estación pluviográfica Riobamba

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	60,0	5,0	96,6	80,1	125,1	10,4	136,4	11,4
10 min.	43,0	7,2	61,0	10,2	73,9	12,3	78,9	13,2
15 min.	33,4	8,4	50,4	12,6	63,9	16,0	69,3	17,3
20 min.	28,0	9,3	41,8	13,9	52,1	17,4	56,0	18,7
30 min.	21,0	10,5	30,7	15,4	37,9	19,0	40,8	20,4
60 min.	12,9	12,9	17,8	17,8	21,4	21,4	22,8	22,8
120 min.	7,9	15,8	10,2	20,4	11,9	23,8	12,6	25,2
24 horas	0,95	22,8	1,24	29,8	1,45	34,8	1,52	36,5

Estación pluviográfica Baños

años de observación: 16

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	35,4	3,0	49,6	4,1	59,8	5,0	63,7	5,3
10 min.	24,6	4,1	36,2	6,0	45,4	7,6	49,0	8,2
15 min.	21,1	5,3	30,4	7,6	37,8	9,5	40,7	10,2
20 min.	19,1	6,4	26,3	8,8	31,4	10,5	33,3	11,1
30 min.	15,4	7,7	20,9	10,5	24,7	12,4	26,2	13,1
60 min.	11,1	11,1	16,0	16,0	19,9	19,9	21,5	21,5
120 min.	8,5	17,0	12,4	24,8	15,4	30,8	16,6	33,2
24 horas	2,17	52,1	3,01	72,2	3,60	86,4	3,83	91,9

Cuadro 8 - 6

Estación pluviográfica Cañar

años de observación: 20

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	40,0	3,3	78,8	6,6	111,5	9,3	124,9	10,4
10 min.	29,3	4,9	58,3	9,7	83,7	14,0	94,3	15,7
15 min.	23,7	5,9	44,9	11,2	63,5	15,9	71,3	17,8
20 min.	20,7	6,9	38,3	12,8	53,5	17,8	59,8	19,9
30 min.	16,8	8,4	28,3	14,2	37,2	18,6	40,7	20,4
60 min.	10,0	10,0	16,7	16,7	22,4	22,4	24,7	24,7
120 min.	6,4	12,8	9,7	19,4	12,1	24,2	13,0	26,0
24 horas	0,88	21,1	1,18	28,3	1,39	33,4	1,47	35,3

Estación pluviográfica Cuenca

años de observación: 13

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	94,6	7,9	128,4	10,7	152,1	12,7	161,2	13,4
10 min.	69,6	11,6	97,8	16,3	118,0	19,7	125,8	21,0
15 min.	55,7	13,9	76,5	19,1	91,2	22,8	96,8	24,2
20 min.	47,6	15,9	66,7	22,2	80,3	26,8	85,5	28,5
30 min.	35,5	17,8	50,2	25,1	60,8	30,4	64,8	32,4
60 min.	22,4	22,4	31,9	31,9	38,9	38,9	41,6	41,6
120 min.	12,6	25,2	17,8	35,6	21,5	43,0	23,0	46,0
24 horas	1,57	37,7	1,96	47,0	2,24	53,8	2,34	56,2

Estación pluviográfica Santa Isabel

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	51,4	4,3	93,1	7,8	127,0	10,6	140,7	11,7
10 min.	36,9	6,2	62,5	10,4	82,6	13,8	90,5	15,1
15 min.	29,0	7,3	46,1	11,5	59,1	14,8	64,2	16,1
20 min.	24,6	8,2	37,0	12,3	46,2	15,4	49,8	16,6
30 min.	19,0	9,5	29,2	14,6	37,3	18,7	40,5	20,3
60 min.	12,0	12,0	18,5	18,5	23,4	23,4	25,3	25,3
120 min.	8,3	16,6	11,6	23,2	14,0	28,0	15,0	30,0
24 horas	1,16	27,8	1,58	37,9	1,90	45,6	2,02	48,5

Cuadro 8 - 7

Estación pluviográfica Loja en Argelia

años de observación: 10

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	75,5	6,3	106,8	8,9	129,2	10,8	137,8	11,5
10 min.	47,6	7,9	64,8	10,8	77,0	12,8	81,6	13,6
15 min.	37,8	9,5	51,0	12,8	60,3	15,1	63,8	16,0
20 min.	32,8	10,9	44,3	14,8	52,3	17,4	55,4	18,5
30 min.	26,3	13,2	34,8	17,4	41,1	20,6	43,5	21,8
60 min.	18,6	18,6	26,2	26,2	32,0	32,0	34,3	34,3
120 min.	11,5	23,0	15,6	31,2	18,5	37,0	19,7	39,4
24 horas	1,45	34,8	2,12	50,9	2,60	62,4	2,79	67,0

Estación pluviográfica Tiputini

años de observación: 14

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	146,0	12,2	188,3	15,7	217,0	18,1	227,7	19,0
10 min.	118,4	19,7	155,7	26,0	181,5	30,3	191,3	31,9
15 min.	106,1	26,5	136,0	34,0	155,6	38,9	162,8	40,7
20 min.	93,7	31,2	116,3	38,8	131,5	43,8	137,2	45,7
30 min.	77,1	38,6	100,5	50,3	116,3	58,2	122,2	61,1
60 min.	50,1	50,1	67,7	67,7	79,8	79,8	84,4	84,4
120 min.	29,7	59,4	41,0	82,0	49,0	98,0	52,1	104,2
24 horas	3,90	93,6	6,04	145,0	7,91	189,8	8,69	208,6

Estación pluviográfica Puyo

años de observación: 12

FRECUENCIA TIEMPO	0,50		0,10		0,02		0,01	
	I (mm/h)	H (mm)						
5 min.	136,9	11,4	183,6	15,3	219,3	18,3	233,5	19,5
10 min.	111,7	18,6	133,4	22,2	147,7	24,6	153,0	25,5
15 min.	100,8	25,2	126,5	31,6	144,0	36,0	150,5	37,6
20 min.	89,2	29,7	113,9	38,0	130,7	43,6	137,0	45,7
30 min.	72,7	36,4	90,5	45,3	102,5	51,3	107,0	53,5
60 min.	50,9	50,9	63,6	63,6	72,1	72,1	75,3	75,3
120 min.	32,2	64,4	41,0	82,0	47,0	94,0	49,2	98,4
24 horas	4,57	109,7	5,99	143,8	6,97	167,3	7,35	176,4

Cuadro 8 - 8

4.2. Síntesis de los resultados del estudio de las intensidades

El método expuesto en el acápite anterior permite presentar, a nivel regional, reglas de estimación relativamente simples, puesto que, para el cálculo de los diferentes parámetros que entran en la fórmula (5), la única variable utilizada es la pluviometría diaria de frecuencia mediana $H_{0,5}$.

A continuación se presenta una definición de los parámetros e índices utilizados:

I_1 es el valor de I_0 , es decir $I_{(0,t)}$ para $t < 1$ hora y $0,1 \leq F < 1$

I_2 es el valor de I_0 , es decir $I_{(0,t)}$ para $t < 1$ hora y $0,01 \leq F < 0,1$

I_3 es el valor de I_0 , es decir $I_{(0,t)}$ para $t \geq 1$ hora y $0,1 \leq F < 1$

I_4 es el valor de I_0 , es decir $I_{(0,t)}$ para $t \geq 1$ hora y $0,01 \leq F < 0,1$

a_1 es el exponente de t para $t < 1$ hora

a_2 es el exponente de t para $t \geq 1$ hora

b_1 es el exponente de T para $t < 1$ hora y $0,1 \leq F < 1$

b_2 es el exponente de T para $t < 1$ hora y $0,01 \leq F < 0,1$

b_3 es el exponente de T para $t \geq 1$ hora y $0,1 \leq F < 1$

b_4 es el exponente de T para $t \geq 1$ hora y $0,01 \leq F < 0,1$

Zonas 1 y 2: no es posible estimación alguna.

Zona 3: zona occidental de transición

- para $t < 1$ hora: $I_1 = 0,64 H_{0,5} - 7$

$$I_2 = 0,59 I_1 + 22$$

es decir:

$$a_1 = -0,410$$

$$b_1 = -0,020 I_1 + 0,823$$

$$b_2 = 0,585 b_1 - 0,027$$

- para $t \geq 1$ hora: $I_3 = I_1$

$$I_4 = I_2$$

es decir

$$a_2 = 0,800$$

$$b_3 = b_1$$

$$b_4 = b_2$$

Zona 4: zona húmeda occidental

- para $t < 1$ hora: $I_1 = 0,74 H_{0,5} - 32$

$$I_2 = 1,13 I_1 + 5$$

es decir:

$$a_1 = 0,0091 I_1 - 0,738$$

$$b_1 = 0,0034 I_1 + 0,373$$

$$b_2 = 0,328 b_1 + 0,046$$

- para $t \geq 1$ hora: $I_3 = 0,72 H_{0,5} - 29$

$$I_4 = 0,87 I_3 + 20$$

es decir:

$$a_2 = -0,0027 I_3 - 0,657$$

$$b_3 = -0,0039 I_3 + 0,428$$

$$b_4 = 0,246 b_3 + 0,072$$

Zona 5: callejón interandino

- para $t < 1$ hora: $I_1 = 0,61 H_{0,5} - 3$

$$I_2 = I_1 + 4$$

es decir: $a_1 = 0,0085 I_1 - 0,726$

$$b_1 = -0,005 I_1 + 0,281$$

$$b_2 = 0,508 b_1 + 0,001$$

- para $t \geq 1$ hora: $I_3 = 0,695 H_{0,5} - 6$

$$I_4 = 1,21 I_3 + 1$$

es decir: $a_2 = -0,009 I_3 - 0,673$

$$b_3 = -0,006 I_3 + 0,310$$

$$b_4 = 0,440 b_3 + 0,017$$

Zona 6: zona húmeda oriental

Se debió tener en cuenta la discontinuidad de la relación $I = \Phi(t)$ para $t = 15$ minutos.

- para $t < 15$ minutos: $I'_1 = 0,66 H_{0,5}$
 $I'_2 = I'_1 + 7$

con $a'_1 = -0,250$

$$b'_1 = 0,105$$

$$b'_2 = 0,060$$

- para $15 \text{ minutos} \leq t < 1$ hora: $I_1 = 0,50 H_{0,5}$

$$I_2 = I_1 + 7$$

con $a_1 = -0,490$

$$b_1 = 0,110$$

$$b_2 = 0,055$$

- para $t \geq 1$ hora: $I_3 = 0,47 H_{0,5}$

$$I_4 = I_3 + 7$$

con $a_2 = -0,750$

$$b_3 = 0,120$$

$$b_4 = 0,060$$

A pesar de una relativa imprecisión, estas fórmulas son bastante homogéneas en cada una de las zonas. Los ábacos 15 a 18 facilitan el cálculo de los parámetros necesarios para utilizar la ecuación (5).

Si bien se trata de realizar rápidas estimaciones a nivel nacional, se puede incluso aumentar la simplificación y utilizar un solo grupo de fórmulas en las cuatro zonas consideradas:

$$I_1 = 0,69 H_{0,5} - 6$$

$$I_2 = 1,16 H_{0,5} + 2$$

Para el exponente de t :

$$\text{Zona 3: } a_1 = -0,410 \quad a_2 = -0,800$$

$$\text{Zona 4: } a_1 = -0,350 \quad a_2 = -0,790$$

$$\text{Zona 5: } a_1 = -0,600 \quad a_2 = -0,850$$

$$\text{Zona 6: } a_1 = -0,490 \quad a_2 = -0,750$$

$$b_1 = -0,0056 I_1 \quad b_2 = 0,48 b_1 + 0,008$$

El campo de aplicación de estas fórmulas, establecidas para intervalos de tiempo que varían entre 5 minutos y 24 horas, no debería ser extendido a más de dos días.

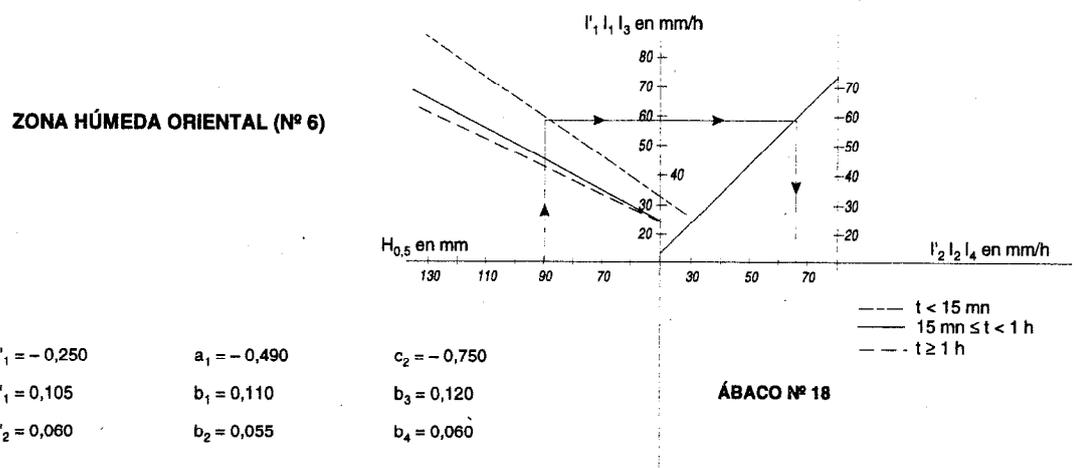
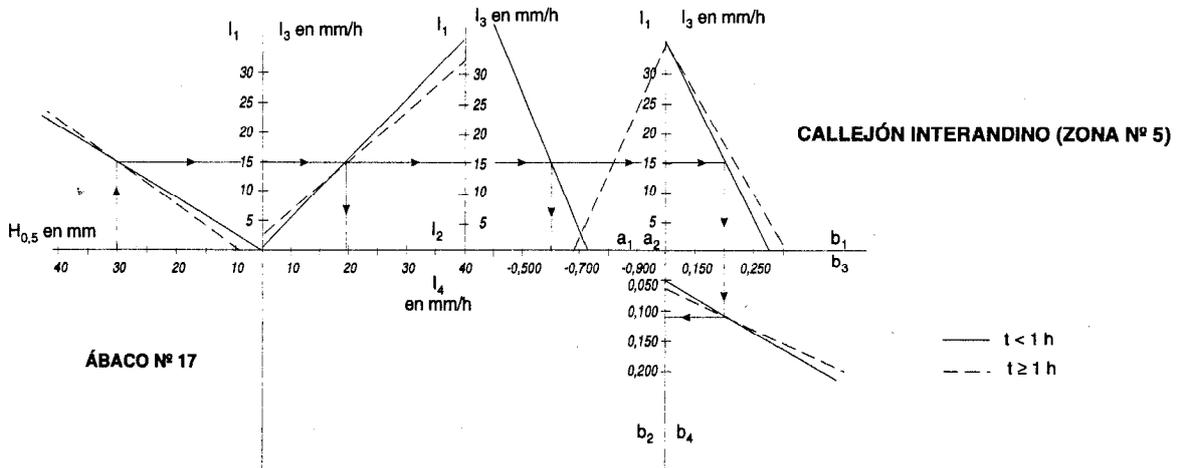
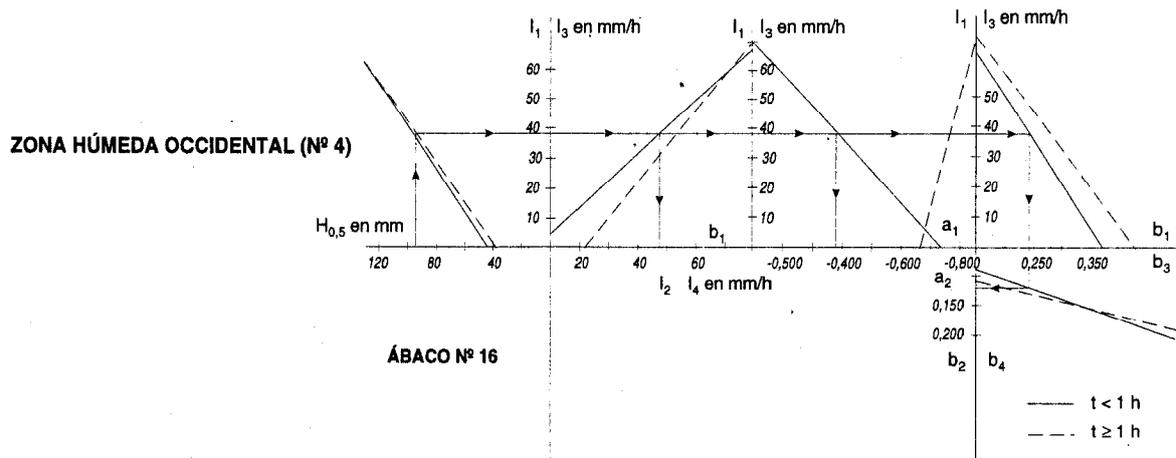


Fig. 9 - Estimación de las constantes de las fórmulas que permiten el cálculo de las intensidades (zonas nº 4, 5 y 6) — ábacos

ESTACIONES	0,10 ≤ F < 1				0,01 ≤ F < 0,10				0,10 ≤ F < 1				0,01 ≤ F < 0,10				0,10 ≤ F < 1				0,01 ≤ F < 0,10															
	l ₁	a ₁	b ₁	c ₁	l ₂	a ₂	b ₂	c ₂	l ₁	a ₁	b ₁	c ₁	l ₂	a ₂	b ₂	c ₂	l ₃	a ₃	b ₃	c ₃	l ₄	a ₄	b ₄	c ₄	l ₃	a ₃	b ₃	c ₃	l ₄	a ₄	b ₄	c ₄				
Portoviejo									t ≤ 50 minutos								t > 50 minutos																			
									26	-0,401	0,348		38	-0,41	0,184		24	-0,81	0,336		36	-0,81	0,16													
Pasaje									t ≤ 70 minutos								t > 70 minutos																			
									25,5	-0,466	0,326	0,146	37	-0,39	0,164	0,064	29	-0,77	0,245	-0,02	39	-0,81	0,117	0,024												
La Naranja*									t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
									42	-0,41	0,155		51	-0,41	0,071		38	-0,88	0,188		47	-0,88	0,106													
San Lorenzo									t ≤ 95 minutos								t > 95 minutos																			
									36	-0,42	0,307	0,039	51	-0,39	0,156	0,010	37	-0,67	0,445	-0,18	64	-0,78	0,207	-0,074												
Puerto Ila									t ≤ 90 minutos								t > 90 minutos																			
									42	-0,36	0,222		53	-0,36	0,121		47	-0,80	0,242		65	-0,80	0,100													
Pichilingue									t ≤ 70 minutos								t > 70 minutos																			
									53	-0,24	0,162		61	-0,24	0,101		60	-0,81	0,176		68	-0,81	0,122													
Isabel María									t ≤ 50 minutos								t > 50 minutos																			
									45	-0,36	0,261	0,06	62	-0,35	0,121	0,053	40	-0,74	0,184		56	-0,735	0,138													
Milagro*	t < 15 minutos								15 ≤ t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
	38	-0,435	0,398	0,220	60	-0,32	0,200	0,101	38	-0,435	0,253		50	-0,44	0,133		38	-0,78	0,265		48	-0,78	0,164													
Santo Domingo									t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
									54	-0,26	0,222		70	-0,26	0,109		55	-0,81	0,237		70	-0,81	0,133													
Tulcán	t < 20 minutos								20 ≤ t ≤ 90 minutos								t > 90 minutos																			
	25	-0,436	0,38	0,171	44	-0,31	0,145	0,043	20	-0,63	0,312	-0,05	28	-0,65	0,166	-0,03	22	-0,84	0,330	-0,07	32	-0,877	0,167	-0,039												
Ibarra									t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
									14,5	-0,61	0,210		18	-0,61	0,116		14,5	-0,79	0,219		19	-0,79	0,102													
San Pablo									t ≤ 80 minutos								t > 80 minutos																			
									19	-0,53	0,206		23,5	-0,53	0,113		19	-0,79	0,278	-0,10	27	-0,86	0,125	-0,03												
Quito-Observ.	t < 20 minutos								20 ≤ t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
	33	-0,4	0,177		40,5	-0,40	0,085		24	-0,680	0,161		29	-0,680	0,083		24	-0,90	0,161		29	-0,90	0,081													
Isobamba									t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
									25	-0,500	0,146		28	-0,5	0,067		24	-0,90	0,164		28	-0,90	0,097													
Latacunga									t ≤ 45 minutos								t > 45 minutos																			
									17,0	-0,573	0,314	0,094	24,5	-0,501	0,155	0,022	15,5	-0,85	0,301	-0,08	22	-0,88	0,149	-0,046												
Ambato									t ≤ 50 minutos								t > 50 minutos																			
									10,0	-0,408	0,250	-0,18	13,5	-0,509	0,127	-0,074	9,5	-0,74	0,253		13	-0,735	0,123													
Riobamba									t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
									11,0	-0,634	0,237	-0,03	15	-0,67	0,103		12	-0,81	0,200	-0,04	14,5	-0,818	0,117	-0,010												
Baños*									t ≤ 90 minutos								t > 90 minutos																			
									10,0	-0,438	0,204		12,5	-0,438	0,107		10,5	-0,55	0,234		14	-0,57	0,109													
Cañar									t ≤ 40 minutos								t > 40 minutos																			
									9,5	-0,463	0,306	-0,15	14	-0,517	0,137	-0,095	8,5	-0,72	0,316	-0,13	12,5	-0,805	0,152	-0,019												
Cuenca									t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
									22,0	-0,580	0,202		27	-0,58	0,113		19	-0,84	0,24		24	-0,84	0,138													
Santa Isabel									t ≤ 100 minutos								t > 100 minutos																			
									10,5	-0,567	0,242	-0,09	13,5	-0,61	0,122	-0,03	12	-0,76	0,222	-0,03	14	-0,76	0,155	-0,010												
Loja									t ≤ 70 minutos								t > 70 minutos																			
									18,0	-0,570	0,134		21	-0,57	0,067		19	-0,79	0,144		22	-0,79	0,081													
Tiputini	t < 15 minutos								15 ≤ t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
	70	-0,285	0,109		76	0,3	0,074		56,0	-0,470	0,097		62	-0,47	0,053		51	-0,80	0,137	0,044	60	-0,73	0,067	0,023												
Puyo	t < 15 minutos								15 ≤ t ≤ 60 minutos								t > 60 minutos																			
	68	-0,225	0,107		78	0,23	0,047		47,0	-0,505	0,120		54	-0,505	0,060		47	-0,73	0,127		55	-0,73	0,059													

* : Estaciones situadas en el límite de dos zonas

Cuadro 9 - Constantes para el cálculo de las intensidades de las alturas pluviométricas (en mm)

II. Regionalización mensual de las precipitaciones en el Norte ecuatoriano

1. PROBLEMÁTICA

1.1. Marco general del estudio

Desde 1987, el Instituto Ecuatoriano de Recursos Hidráulicos (INERHI) y el ORSTOM vienen estudiando el funcionamiento del riego tradicional andino con el fin de establecer recomendaciones para la elaboración de un Plan Nacional de Riego.

Los sistemas de riego tradicionales existieron tal vez en la época preincaica, pero se desarrollaron sobre todo con la colonización española. Están compuestos, en su mayoría, de pequeños perímetros (menos de 100 ha) dispersos en el espacio y que ocupan los tres pisos climáticos del callejón interandino.

Están alimentados por infraestructuras complejas (canales cavados directamente en el suelo) que captan el agua de los ríos por medio de tomas rústicas, sin obra de regulación alguna. El caudal derivado está entonces sujeto a las fluctuaciones de los recursos hídricos de la red hidrográfica.

El proyecto está dividido en 7 grandes temas de estudio (análisis del paisaje, trabajos pluridisciplinarios en terrenos representativos, inventario, análisis hidroclimático, observatorio agro-socio-económico, suelos, investigación histórica) cuyos resultados son integrados en un análisis global (tema nº 8) con base en el cual se elaboran diagnósticos y se establecen recomendaciones en una perspectiva a corto, mediano y largo plazo.

La repartición del agua es uno de los aspectos fundamentales del estudio para el diagnóstico de la situación y la validez de las recomendaciones.

1.2. La equidad hidrológica y su importancia

El buen funcionamiento de un sistema de riego depende en gran medida de la equitativa repartición del agua a todos los usuarios al interior de un mismo perímetro (distribución), entre perímetros de un mismo sistema complejo (repartición) y entre los diferentes sistemas repartidos a lo largo de la red hidrográfica (dotación global). Sin embargo, en este último caso, la desigualdad es patente.

Para necesidades climáticas poco diferentes (un mismo piso altitudinal y sistemas de cultivo similares), las dotaciones concedidas varían de 0,1 a 0,4 l/s/ha en el piso frío, de 0,2 a 0,7 l/s/ha en el piso templado y de 0,3 a 1,0 l/s/ha en el piso subtropical, es decir en promedio una relación de 1 a 3.

Tales diferencias suscitaron conflictos mayores que obligaron al Estado a intervenir en el manejo del agua hasta el punto de nacionalizar todos los recursos hídricos en 1972. Son igualmente esas diferencias las que

han modelado el trazado de los canales en el paisaje andino, evidenciando las diferencias de estructura y de poder. En general, las grandes haciendas de los fondos de valle van a buscar el agua a gran altura, aguas arriba de las demás tomas, a fin de evitar compartir el déficit de agua de los ríos cuando se producen estiajes pronunciados, incluso si ello las obliga a construir y mantener infraestructuras de transporte largas y sinuosas.

Está claro una situación como esta no favorece la coexistencia armoniosa de los diferentes grupos de usuarios.

El Estado ha tratado efectivamente de corregir esta herencia del pasado, pero le ha faltado ya sea la voluntad necesaria o datos precisos para establecer una repartición aguas arriba - aguas abajo más equitativa, con un ordenamiento racional y económico de los canales y las tomas.

Ciertamente, el problema es complejo y asocia estrechamente las consideraciones hidrológicas y sus consecuencias agro-socio-económicas.

En este contexto, el proyecto INERHI-ORSTOM se comprometió a proporcionar a las instituciones competentes una base científica y técnica que justifique y oriente la aplicación de una política de ese tipo.

1.3. Regionalización climática preliminar (necesidad y objetivos)

Para responder parcialmente a tal objetivo, el procedimiento que adopta el hidrólogo consiste en comparar las necesidades y los recursos, no sólo a nivel de las tomas actuales sino a todo lo largo de la red hidrográfica, a fin de prever las diferentes condiciones de evolución (reordenamiento, incorporación de nuevos perímetros al riego).

Con ese fin, el espacio es dividido inicialmente en zonas de recursos (microcuencas) y en zonas de análisis y de recomendaciones (ZARI).

Las microcuencas son cuencas vertientes de 50 Km² aproximadamente en las que los factores condicionantes del flujo (pendiente, permeabilidad, características y ocupación del suelo) son más o menos homogéneos. En cada una de ellas, se calibra un modelo lluvia-caudal.

Las ZARI presentan toda la cadena de movilización, transporte, distribución y utilización del agua. Sus límites son trazados en función de los accidentes del terreno y de las infraestructuras existentes. Son ideales para estudiar la evolución de los sistemas de producción.

La estimación de los recursos requiere un buen conocimiento regional de la lluvia y de la ETP (estimación de los valores promedio en cada microcuenca) mientras que la evaluación de las necesidades depende en gran parte de una correcta estimación puntual de los mismos parámetros a nivel de cada perímetro.

Consecuentemente, es indispensable un estudio climático preliminar que permita una estimación precisa de la lluvia y de la ETP en todo punto del espacio estudiado.

Si además no nos contentamos con valores promedio interanuales, sino que por el contrario deseamos introducir la noción de riesgo, es necesario razonar a nivel de series cronológicas.

Desde el punto de vista agronómico, el quinquenio o el decenio es un intervalo adecuado. Teniendo en cuenta los datos disponibles (en estado solo de manuscritos), el volumen de información y el marco de planificación en el que se desarrolla el proyecto, la elección de un período mensual es razonable.

La regionalización climática tiene entonces como objetivo generar en todo punto del espacio series cronológicas mensuales, estadísticamente probables, de lluvia y de ETP. Dicho trabajo ha avanzado considerablemente en lo que respecta al callejón interandino, la región costera y las islas Galápagos. Será realizado más tarde en la región amazónica. Actualmente, concierne algo menos de 900 estaciones pluviométricas y climáticas.

2. METODOLOGÍA

2.1. Estudios anteriores y red

Numerosos estudios ya realizados sobre el tema son sumamente someros y conciernen sitios bastante restringidos. Por otro lado, la información correspondiente es difícil de obtener.

A nivel nacional, el ORSTOM emprendió, en el marco de su cooperación con el Ministerio de Agricultura y Ganadería para el Programa Nacional de Regionalización Agraria (PRONAREG), y con la colaboración del INAMHI y el INERHI, un análisis serio de la red climática. El capítulo I de este artículo es ilustración de ello, al igual que los numerosos informes de E. Cadier, J.-F. Nouvelot, P. Pourrut y sus contrapartes nacionales, que constituyen una importante base de conocimiento.

Sin embargo, tal análisis es insuficiente para alcanzar los objetivos planteados, debido a la falta de medios informáticos y a la insuficiencia de la información disponible en esa época.

En efecto, la red, reciente en su conjunto (numerosas estaciones fueron instaladas alrededor de 1965), es manejada por más de 30 organismos públicos o privados, cada uno con sus preocupaciones, lo que explica en parte la deficiente repartición de las estaciones, desde el punto de vista tanto espacial como altitudinal.

Esta situación constituye un inconveniente considerable tratándose de un medio de relieve sumamente contrastado y sometido a diferentes fenómenos climáticos que provocan gradientes pluviométricos importantes en función de la exposición y de la situación general de las vertientes.

Por ello, la sola utilización de los datos de la red no es suficiente como para apreciar correctamente las variaciones espaciales de los parámetros investigados.

2.2. Zonas pseudo-proporcionales y vectores representativos

En un espacio sometido a los mismos fenómenos climáticos (planetarios, regionales y locales), los valores de los parámetros climáticos serán más o menos proporcionales a partir de un cierto intervalo de tiempo. Así, dentro de una zona climática homogénea, cada parámetro puede caracterizarse por una serie única, representativa de su organización cronológica interna. El espacio se restringe si se disminuye el intervalo (del año al mes por ejemplo) o si se exige una relación pseudo-proporcional mayor dentro de la zona.

Las definiciones anteriores constituyen la base teórica de los « vectores regionales » que son series cronológicas homogéneas creadas con base en las medidas observadas en las estaciones que pertenecen a la zona climática considerada, medidas a veces incompletas y que pueden presentar errores sistemáticos sin que ello influya en la elaboración del vector.

Actualmente, existen dos métodos (desarrollados en el ORSTOM): el vector regional de G. Hiez (1977) y el vector de los índices anuales de precipitación de Y. Brunet-Moret (1979). Sus fundamentos teóricos son expuestos en los artículos citados, por lo que no nos detendremos en ello.

2.3. Programa CLIMAN

CLIMAN es un programa desarrollado en el proyecto INERHI-ORSTOM con base en el algoritmo de cálculo de Brunet-Moret. Funciona con un intervalo mensual (análisis y correcciones) y permite tratar parámetros climáticos (temperatura, insolación, humedad relativa, viento, evaporación en tanque) así como los caudales medios.

Primeramente, posibilita la detección, la corrección o la supresión de los errores sistemáticos de las series cronológicas estudiadas (fase de homogeneización), y luego la búsqueda de los límites de las zonas climáticas homogéneas (fase de regionalización) para las cuales genera una serie cronológica representativa de índices mensuales y anuales.

• La pseudo-proporcionalidad de una zona es medida con el valor del coeficiente de correlación promedio entre estaciones y el vector correspondiente (en caso de estricta proporcionalidad, ese valor es igual a 1).

Luego de varias pruebas, se considera una zona como homogénea si los coeficientes de correlación mensuales y anuales son superiores o iguales a 0,9.

En realidad, se aceptan igualmente zonas en donde tales coeficientes son cercanos a 0,9 cuando la baja densidad de la red no permite reducir la zona.

En teoría, es posible agrupar la homogeneización y la regionalización. La visualización de las curvas de dobles masas entre estaciones y vector permite determinar

si una mala relación entre las dos (bajo coeficiente de correlación) proviene de errores sistemáticos o de la no pertenencia de la estación a la zona homogénea simbolizada por el vector.

Sin embargo, como el programa es manejado por otras instancias del INERHI y otras entidades ecuatorianas (Escuela Politécnica Nacional), se preconizan las dos fases de análisis para evitar los errores de diagnóstico.

En la fase de homogeneización, se restringen lo más posible los espacios estudiados para asegurarse de no tomar en cuenta sino las estaciones que pertenecen a la misma zona homogénea.

El cálculo de los vectores de ETP es un tanto más complicado. Primero, se homogeneizan los parámetros con CLIMAN, ya sea por el método del vector o por el análisis de las simples masas que en muchos casos es más que suficiente, en razón de su reducida variabilidad interanual.

Luego, en las pocas estaciones que poseen un tanque de evaporación de tipo A, la ETP se calcula según 7 fórmulas y los resultados obtenidos se comparan con las evaporaciones medidas. Esta última operación se efectúa a nivel de los valores absolutos y de las variaciones estacionales y permite destacar las fórmulas mejor adaptadas según las regiones estudiadas.

El desvío de ciertas fórmulas en función de la altitud (desvío ya estudiado en Colombia) que varía según el tipo de clima, hace necesaria esa operación.

Luego se calcula la ETP en cada estación climática según la fórmula adecuada y se puede entonces proceder, como anteriormente, a la fase de regionalización.

2.4. Clima y altitud

Los cálculos anteriores permiten delimitar zonas climáticas homogéneas representadas, para la lluvia y la ETP, por vectores de valores mensuales y anuales relativos, calibrados arbitrariamente en un valor interanual de 1.000 mm.

Queda por determinar los valores absolutos, lo cual se realiza mediante un estudio minucioso de las relaciones lluvia-altitud y ETP-altitud.

En una gran cuenca hidrográfica, esas relaciones están lejos de ser uniformes y dependen también de los mecanismos climáticos preponderantes. El conocimiento del clima es indispensable para identificar las zonas de validez de las relaciones encontradas que cubren en general algunas de las zonas homogéneas definidas en la fase de regionalización anterior.

En la práctica, un proceso interactivo se apoya en los dos análisis.

El producto final es un mapa de isoyetas (o isopletas) interanuales en el cual vienen a agregarse las zonas pluviométricas (o climáticas) homogéneas, estando cada una de ellas representada por un vector de índices mensuales y anuales. Permite así generar una serie cronológica mensual en cada punto del espacio estudiado.

Ejemplo: Si, según el mapa de isoyetas, un punto recibe 570 mm de lluvia anual y pertenece a la región climática n° 3, basta con multiplicar el vector pluviométrico de la región 3 por 0,570 para obtener una serie pluviométrica mensual probable del punto considerado.

Se procede de la misma manera en el caso de la ETP.

Para generar una serie promedio en una cuenca vertiente, se deberán considerar los porcentajes de superficie ocupados por los diferentes vectores así como la lluvia media correspondiente a las regiones climáticas involucradas.

3. APLICACIÓN A LA CUENCA DEL MIRA

3.1. Características generales

El sistema hidrográfico del Mira ocupa parte del Sur de Colombia y parte del Norte del Ecuador.

Se seleccionó la parte superior de la cuenca, situada enteramente en el callejón interandino ecuatoriano (figura 10). En efecto, esa parte contiene todos los sistemas de riego y está, además, controlada por una estación hidrométrica cuyas observaciones son de buena calidad (FF CC Carchi).

La cuenca, con una superficie de 3.500 Km², se extiende entre los 1.500 y los 4.500 m.s.n.m. Se organiza en torno a los grandes valles principales bien dibujados (Chota, Ambi, Apaquí), a los cuales se agregan numerosos valles secundarios más o menos perpendiculares.

Está sometida a la influencia de la Zona de Convergencia Intertropical, a aquella (bastante atenuada por la cordillera Occidental) de las masas de aire provenientes del Pacífico en cuya dirección está orientada, y a aquella (en parte bloqueada por la cordillera Oriental) de los alisios del Sudeste durante el verano.

La combinación de esos diferentes fenómenos más o menos alterados por el relieve, genera un régimen pluviométrico bimodal, al que se ajustan los ciclos de cultivo.

El riego es utilizado como complemento para asegurar la producción de una región de vocación agrícola que exporta buena parte de su producción hacia Colombia.

Desde 1987, se ha procedido a la recolección exhaustiva de los datos mensuales y anuales (manuscritos en su mayoría), en colaboración con el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y la Escuela Politécnica Nacional, ambos interesados en este estudio.

Los datos han sido luego ingresados en computadora en un formato propio de CLIMAN.

El caudal derivado (10) está destinado sólo al riego y no tiene en cuenta otros usos (agua potable, abrevaderos...) que representan únicamente un caudal de 1,3 m³/s.

Un sistema de riego típico o promedio se compone en general de un canal de tierra de 4 Km de longitud que transporta un caudal de 75 l/s para regar 180 ha en las que se encuentran los tres tipos de propiedades descritos en el cuadro 10.

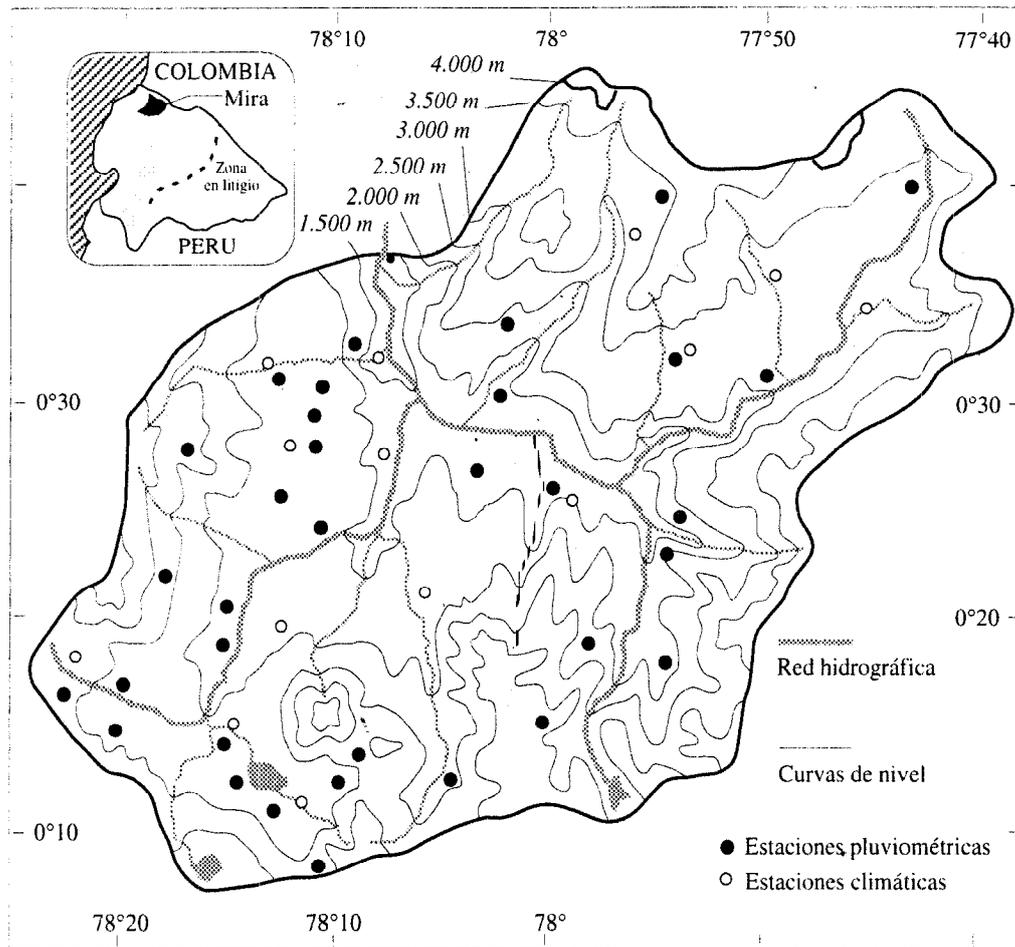


Fig. 10 - Cuenca del Mira - Oro-hidrografía - Estaciones pluviométricas y meteorológicas

Las haciendas predominan en los dos pisos extremos. En el piso frío, utilizan riego para mantener pastos de ganado y cultivar cebada y papa, mientras que en el piso subtropical, la caña de azúcar, la alfalfa y los cultivos de hortalizas ocupan las mayores superficies.

El piso templado está ocupado en su mayoría por los minifundios que practican un policultivo basado en la asociación maíz-fréjol.

3.2. Homogeneización de las series pluviométricas

En el caso del Mira, 76 estaciones presentan un interés para el análisis climático: 65 están situadas en la cuenca misma y otras 11 en cuencas vecinas, permitiendo aprehender mejor la influencia de los alisios del Sudeste y de las masas de aire provenientes del Pacífico.

En la práctica, se escogieron sólo 54 estaciones — las demás presentan demasiados vacíos en las observaciones — que totalizan 1.059 años completos, es decir un promedio de 20 años por estación (1966-1985).

Están agrupadas en función de sus períodos de observación y de su pertenencia a una misma zona homogénea.

El grupo puede ser modificado y restringido durante la fase de homogeneización si se presenta una duda sobre la pertenencia a esa zona.

Los errores sistemáticos se detectan a nivel de cada grupo (inicialmente en los valores anuales y luego en los mensuales), mediante el estudio de las dobles masas estaciones-vectores y el análisis de los parámetros de detección que ofrece CLIMAN.

• Dichos errores son entonces simplemente identificados (valores dudosos), corregidos (en casos de sustitución o desplazamiento de aparatos) o incluso suprimidos (valores incoherentes).

El diagnóstico se verifica mediante visitas al terreno, la lectura de fichas históricas de estaciones o entrevistas con los técnicos encargados del manejo de la red.

Una vez validado el diagnóstico, CLIMAN presenta en pantalla el aspecto de las dobles masas estación-vector antes y después de la corrección, en el formato que aparece en la figura 11.

De todas las estaciones, que comprenden 1.059 años de observación, se examinaron 11.599 valores

1	Superficie total de la cuenca	: 347.860 ha	
2	Superficie inferior a 3.600 m	: 298.055 ha	(86 % de 1)
3	Superficie cultivada	: 149.220 ha	(43 % de 1 ó 50 % de 2)
4	Superficie regada	: 50.340 ha	(34 % de 3) en 293 perímetros
	de la cual	: 19 %	por encima de los 2.700 m.s.n.m. (lluvia/ETP de 970/1.025 mm por año)
		: 45 %	entre 3.300 y 2.700 m.s.n.m. (lluvia/ETP de 795/1.165 mm por año)
		: 36 %	por debajo de los 2.300 m.s.n.m. (lluvia/ETP de 540/1.405 mm por año)
		: 46 %	de grandes propiedades o haciendas
		: 22 %	de propiedades medianas o fincas
		: 32 %	de pequeñas propiedades o minifundios
5	Riego tradicional	: 43.544 ha	(86 % de 4)
6	Riego estatal	: 4.600 ha	(9 % de 4)
7	Riego mixto	: 2.196 ha	(5 % de 4)
8	Nº de sistemas de riego	: 279	
9	Longitud total del los canales	: 1.164 km	
		: 9 %	revestidos
		: 91 %	tradicionales, de tierra
10	Caudal total derivado	: 26,2 m³/s	
11	Población de la cuenca en 1982	: 295.185 habitantes	
12	Población concernida por el riego	: 157.861 habitantes	(53 % de 11)

Cuadro 10 - Características del riego en el Mira

Fig. 11 - Homogeneización de series cronológicas

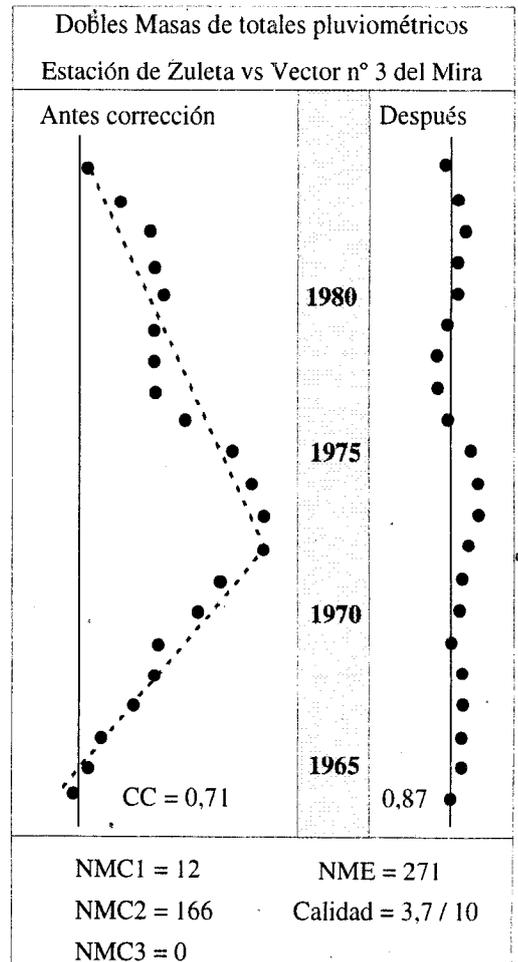
Ejemplo de homogeneización

La estación 316 de Zuleta presenta una ruptura muy clara en 1972 debida a una confusión entre probetas, hecho que es confirmado por un informe del inspector y una visita a la estación.

De los 271 meses examinados (NME), 166 son entonces corregidos (NMC2) pero quedan aún 12 meses dudosos (NMC1) repartidos en 2 años. No existen meses incoherentes (NMC3).

El coeficiente de correlación estación-vector (CC) pasa de 0,71 a 0,87 después de la corrección.

A pesar de su calidad bastante mediocre, esta estación sigue siendo importante por la extensión de su período de observación (años completos desde 1963) y su posición alejada del centro.



mensuales de lluvia, de los cuales 192 fueron identificados como dudosos, 1.443 corregidos y 666 eliminados por incoherencia.

En promedio, ello representa una estación de 20 años de observaciones que contiene 215 valores mensuales, de los cuales 4 son dudosos, 27 corregidos y 12 eliminados.

Las notas de calidad atribuidas a cada estación se reparten de la siguiente manera:

19 estaciones	tienen una nota de	10
8 estaciones	tienen una nota entre	9 y 10
6 estaciones	tienen una nota entre	8 y 9
6 estaciones	tienen una nota entre	7 y 8
2 estaciones	tienen una nota entre	6 y 7
2 estaciones	tienen una nota entre	5 y 6
11 estaciones	tienen una nota entre	0 y 5

Así, el 50 % de estaciones tienen una nota superior a 9. La corrección de períodos largos debida en gran parte al cambio de emplazamiento de las estaciones es la responsable de las menores notas, a excepción de las 2 más bajas que corresponden a valores globalmente incoherentes.

3.3. Relaciones lluvia-altitud

Durante la fase de homogeneización, el programa elaborado calcula nuevamente los valores interanuales de cada estación en función del período de determinación del vector. Esos datos son utilizados evidentemente para la elaboración de las curvas lluvia-altitud.

La altitud es considerada como el factor preponderante de las variaciones climáticas, lo cual ya fue demostrado y explicado en el estudio sobre el altiplano cundi-boyacense de Colombia.

Las relaciones lluvia-altitud estudian subiendo por los valles principales desde la parte baja de las cuencas. Posteriormente, el interés se centra en los valles secundarios.

Este análisis debe acompañarse de un buen conocimiento del clima local y de la dirección general de las masas de aire. Cuando la densidad de las estaciones es insuficiente o su distribución espacial inadecuada, se consideran las características de la vegetación natural.

En el caso del Mira (figuras 12a y 12b), se llega a dos tendencias principales que corresponden a los tres grandes valles señalados en la descripción general de la

cuenca hidrográfica, con variaciones de gradiente según los valles secundarios transversales.

La parte baja de la cuenca (valle del Chota) corresponde al mínimo pluviométrico (menos de 500 mm de lluvia por año). La parte este y norte de la cuenca (valle del Apaquí) contiene 4 curvas de igual tendencia pero desplazadas según los diferentes valles transversales (valles de El Ángel en el presente caso). La parte oeste y sudoeste (figura 12b), que corresponde al valle principal del Ambi y a un valle secundario bastante importante (Blanco), está más protegida, por lo que está sometida a gradientes menos importantes.

La parte inferior de la curva (común por cierto a las 2 figuras) representa el flanco occidental de la cordillera de los Andes y no se encuentra en la zona de estudio.

Corresponde al descenso del Mira a lo largo de la cordillera hasta el piedemonte.

Esa vertiente está muy expuesta a las masas de aire provenientes del Pacífico que generan gradientes pluviométricos importantes.

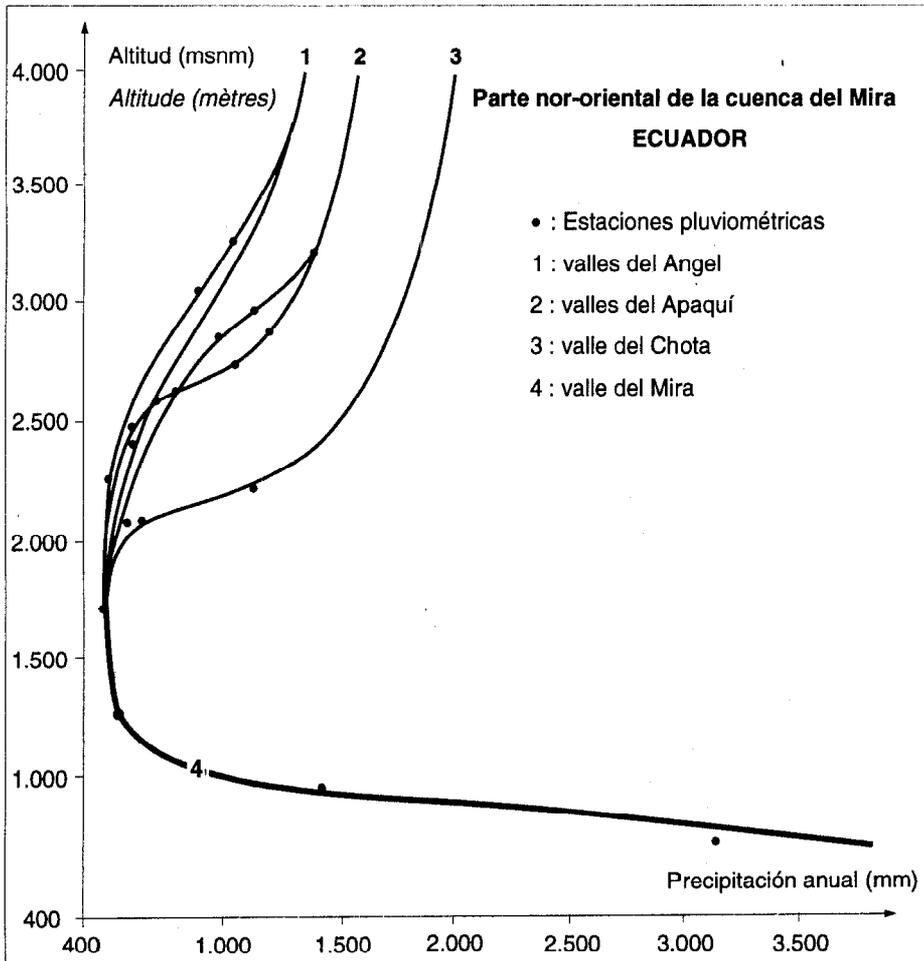


Fig. 12a - Cuenca del Mira, parte nor-este - Relaciones lluvia-altitud

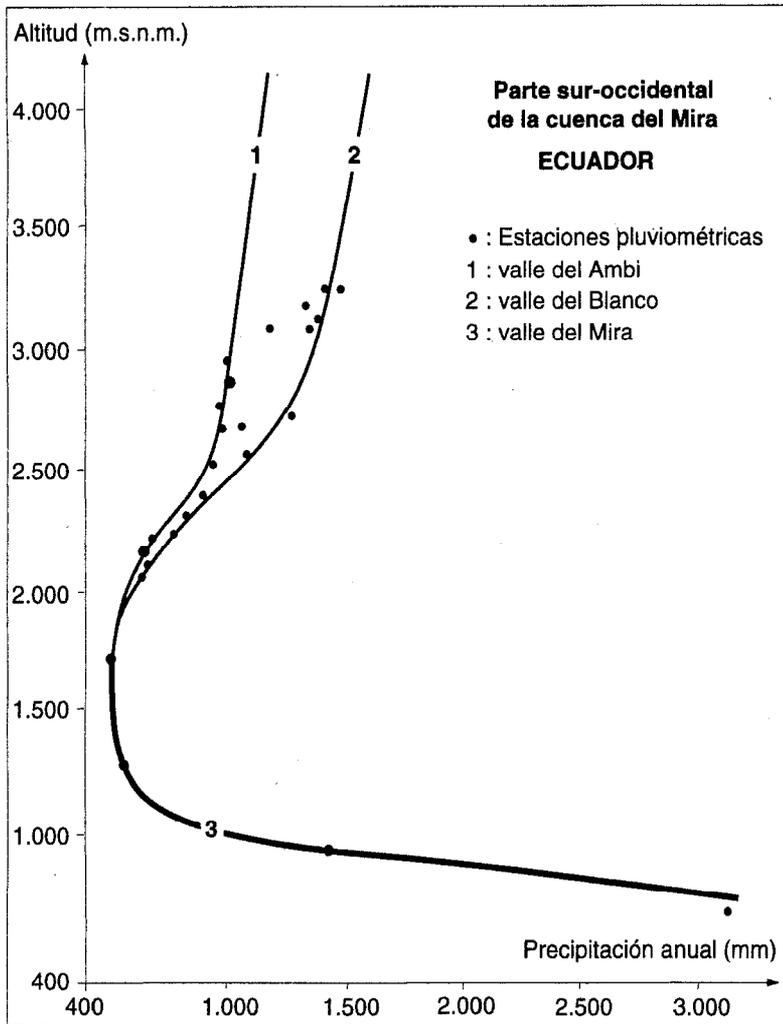


Fig. 12b - Cuenca del Mira, parte oeste y sureste
Relaciones lluvia-altitud

Ampliando el análisis a las estaciones costeras, se encuentra un máximo pluviométrico de 4.000 mm de lluvia anual alrededor de los 700 m.s.n.m.

En Colombia, ese máximo se sitúa entre los 1.200 y 1.800 m.s.n.m.

En los dos casos, se observará que, por encima de los 3.000 m.s.n.m., las curvas no son muy exactas en razón de la falta de estaciones. Fueron trazadas teniendo en cuenta curvas calculadas en cuencas vecinas y la vegetación natural con la colaboración del botánico C. Huttel.

La superficie situada por encima de los 3.000 m.s.n.m. ocupa alrededor del 30 % de la superficie total de la cuenca y recibe la mayor parte de la lluvia. Todo error en los totales pluviométricos de esta zona acarrearía entonces imprecisiones aún mayores en el cálculo de los recursos hídricos.

Se ve claramente el gran interés que presenta una redistribución de la red para obtener una mejor repartición altitudinal.

Estas curvas permiten trazar con precisión las isoyetas promedio anuales valle por valle (ver figura 13).

3.4. Regionalización

El módulo de regionalización de CLIMAN utiliza los archivos de datos corregidos. Luego de la fase de homogeneización, sólo quedan 48 estaciones cuya calidad se considera suficiente.

Estas son agrupadas según la proporcionalidad de sus respectivos valores (anuales y luego mensuales), tratando de constituir regiones climáticas en las cuales el coeficiente de correlación promedio entre estaciones y vector sea cercano o superior a 0,9.

En un primer análisis, se utilizan las curvas lluvia-altitud.

Una vez constituidos los grupos, se trazan los límites de zona teniendo en cuenta el relieve. En caso de que la baja densidad de las estaciones no permita un trazado exacto, se utilizan los factores del medio natural (vegetación por ejemplo) para definir un límite probable.

El tratamiento de las 48 estaciones restantes desemboca en la constitución de 8 grupos homogéneos y por lo tanto de 8 vectores.

El menor coeficiente de correlación promedio es de 0,87.

El grupo 1 obtiene los resultados más bajos. Sólo dos estaciones pertenecen a la cuenca propiamente dicha; las otras dos están situadas un tanto más arriba, en una cuenca vecina dividida por la frontera con Colombia y en una vertiente orientada hacia

el Norte. Las 4 estaciones están dispersas y son insuficientes como para definir un vector más representativo.

Para el grupo 3 se obtienen resultados medianos, pero el vector de esa región se calcula solamente con base en 3 estaciones (valor límite) bastante alejadas.

Se observará en cambio la buena homogeneidad del grupo 7, en el cual la mayoría de estaciones forman parte de un valle secundario (río Blanco) en el que el INAMHI maneja una gran cuenca vertiente experimental.

Las estaciones son más numerosas que en otras partes, bastante concentradas y mejor observadas puesto que 8 de ellas obtienen una nota de calidad de 10. En ese grupo, sólo dos estaciones presentan coeficientes inferiores a 0,9: la estación 323 (en correlación mensual) y la estación 875 (en correlación anual).

En la primera, 76 meses son corregidos y 12 meses eliminados, lo cual deja flotando una cierta duda en cuanto a la calidad de los datos; la segunda posee el período más corto de observación (6 años), lo que da poca

nº regiones	nº estaciones	coeficientes mensuales	coeficientes anuales	nº regiones	nº estaciones	coeficientes mensuales	coeficientes anuales
nº 1 0,87 0,88	306	0,82	0,87	nº 6 0,90 0,91	021	0,92	0,92
	305	0,89	0,84		053	0,89	0,90
	059	0,91	0,89		317	0,90	0,92
	308	0,87	0,91		328	0,89	0,90
nº 2 0,91 0,91	084	0,91	0,94	nº 7	001	0,99	0,98
	103	0,86	0,83		322	0,96	0,95
	303	0,94	0,92		323	0,87	0,92
	102	0,89	0,94		329	0,96	0,94
nº 3 0,88 0,93	083	0,89	0,94		330	0,99	0,99
	307	0,88	0,94		331	0,98	0,98
	324	0,87	0,91		332	0,99	1,00
nº 4 0,89 0,91	304	0,90	0,94	0,97 0,95	333	0,99	0,99
	310	0,85	0,93		334	0,97	0,93
	314	0,91	0,91	nº 8	875	0,99	0,84
	315	0,91	0,88		085	0,87	0,93
nº 5 0,91 0,90	105	0,86	0,89	100	0,89	0,95	
	110	0,93	0,95	104	0,89	0,94	
	316	0,89	0,84	301	0,88	0,93	
	319	0,91	0,91	302	0,86	0,91	
	320	0,94	0,92	311	0,93	0,95	
	321	0,89	0,91	312	0,94	0,93	
	526	0,94	0,94	313	0,91	0,97	
	604	0,90	0,87	0,89 0,93	571	0,92	0,93
				603	0,83	0,86	

Cuadro 11 - Coeficientes de correlación estaciones-vectores

Coeficientes de correlación mensuales y anuales entre estaciones pluviométricas y vectores correspondientes. Los coeficientes promedio de cada grupo aparecen bajo el número de región.

significación al valor de su coeficiente de correlación. Finalmente, la estación 332 no tiene en realidad un coeficiente de 1 sino de 0,997.

De una manera general, se observa que los resultados obtenidos dentro de cada grupo son tanto más desiguales cuanto menor es el número de estaciones.

Las zonas menos homogéneas, en las que los fenómenos climáticos son más complejos, son también, desafortunadamente, las que menos estaciones poseen.

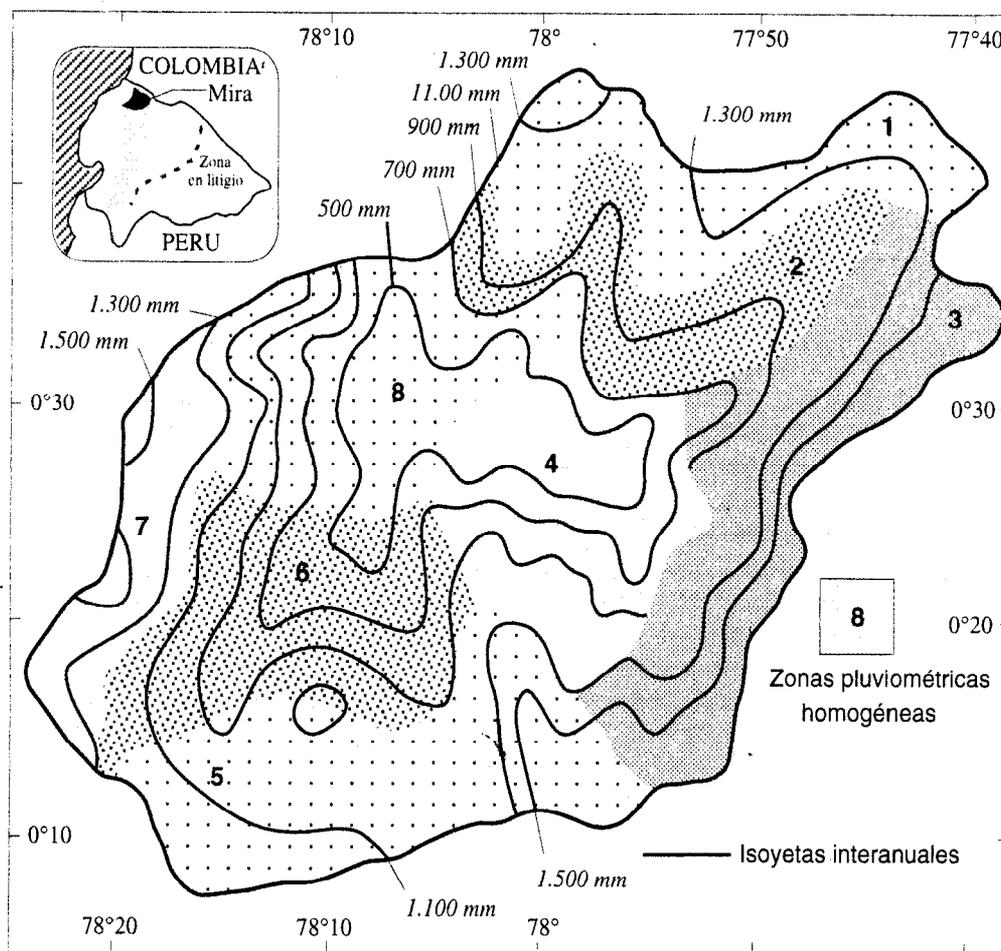
Los límites de las regiones pluviométricas pseudo-proporcionales representadas en la figura 13 están trazados en función de los grupos constituidos y teniendo en

cuenta los límites altitudinales y los accidentes de relieve que separan a los diferentes valles.

Las regiones 8, 4 y 6 corresponden a la parte baja de los tres valles principales (Chota, Apaquí y Ambi) separados por estrechamientos muy marcados (entre 8 y 4 y entre 8 y 6) o por líneas de cresta importantes (entre 4 y 6).

La región 5 corresponde a la parte superior del valle del Ambi separado de la cuenca inferior por el volcán Imbabura.

Estos accidentes de relieve modifican la circulación de las masas locales de aire y el impacto de los fenómenos climáticos continentales.



**Fig. 13 - Cuenca del Mira - Isoyetas promedio anuales
Zonas pluviométricas pseudo-proporcionales**

Las regiones 1, 2, 3 y 7 están separadas de sus regiones vecinas por un límite altitudinal.

Están muy expuestas a las precipitaciones provocadas por el ascenso de las masas locales de aire y pueden estar sometidas igualmente a la influencia de las cuencas vecinas (influencia amazónica en la región 3 por ejemplo).

Partiendo del análisis de las series mensuales representativas de cada región (vectores generados para el período 1965-1985), se constata que la organización cronológica de las lluvias anuales no difiere esencialmente de una región a otra. Se encuentran algunas constantes:

años de precipitaciones (**muy**) elevadas:

69, 70, 71, **74, 75**, 82, 84

años de precipitaciones (**muy**) escasas:

67, 73, **77, 78**, 79, 85

Se observará la poca influencia del Niño en la cuenca del Mira: el año 1983, que corresponde a un Niño excepcional, no presenta valores superiores al promedio sino solo en algunas estaciones.

Existe una cierta diferencia en los coeficientes de variación ($Cv = \text{desviación estándar/promedio}$) en función de la altitud.

Los menores Cv (de 0,15 a 0,17) se encuentran en las regiones más altas (nº 1, 2, 5 y 7) mientras que se elevan a 0,22 - 0,23 en los fondos de valle (regiones 4, 6 y 8). Presentan un valor mediano (0,20) en la región intermedia nº 2.

Esta diferencia es en cambio más marcada a nivel de la repartición estacional de las precipitaciones (regímenes pluviométricos).

Las vertientes expuestas al Sur-Sudeste (1, 2 y 8) tienen una pluviometría mayor durante la segunda estación de lluvias (octubre-noviembre, diciembre) cuando la Zona de Convergencia Intertropical vuelve a subir hacia el Norte.

Sucede exactamente lo contrario en el caso de las vertientes expuestas al Norte (4, 5, 6 y 7) que poseen una primera estación de lluvias (marzo-abril-mayo) más fuerte, cuando desciende la Zona de Convergencia Intertropical.

La región 3 muestra claramente la influencia de los alios del Sudesie que logran pasar la barrera que constituye la cordillera. Prácticamente no tiene estación seca y recibe más lluvia en el mes de julio que en el mes de noviembre.

Se puede llevar el análisis de los vectores mucho más lejos, y ello se realizará una vez analizadas completamente todas las cuencas (lluvia y ETP), pero por el momento ese no es el objetivo del proyecto.

4. LOS VECTORES Y SU UTILIZACIÓN EN EL PROYECTO INERHI-ORSTOM

4.1. Regionalización de la ETP

La regionalización de la ETP se realizó con la metodología antes descrita. Los datos climáticos de base fueron homogeneizados mediante los métodos del vector y de las simples masas. En el caso del Mira, el segundo método es a menudo suficiente como para detectar y corregir los errores sistemáticos.

Después de la comparación con las medidas de los tanques de evaporación en 7 estaciones, nuestra elección recayó en la fórmula de Penman cuyos coeficientes fueron modificados y adaptados según los resultados obtenidos en el altiplano colombiano.

Las relaciones entre ETP y altitud ponen en evidencia 3 curvas distintas, y la regionalización mediante el vector desemboca en 3 regiones pseudo-proporcionales. En los dos casos, los 3 grupos concuerdan con y corresponden a los 3 valles principales. Las correlaciones entre estaciones y vectores son en cambio inferiores a las encontradas en el análisis pluviométrico (coeficientes mensuales promedio de 0,88, 0,84 y 0,88 respectivamente). Sin embargo, la comparación entre los valores observados en las estaciones y los calculados mediante los vectores muestra diferencias mínimas.

4.2. Cálculo de las necesidades actuales

Superponiendo los mapas de regionalización climática

obtenidos (del tipo de la figura 13) y los mapas de delimitación de los perímetros regados, es sumamente fácil asociar a cada perímetro un valor promedio de lluvia o de ETP (isolíneas) y los vectores correspondientes.

Estas informaciones son llevadas al banco general de riego en donde figura una descripción exacta de la infraestructura de transporte y de distribución (longitud, pendientes, eficiencia, etc.) y de los perímetros (sistemas de producción, características hidrodinámicas de los suelos, superficies equipadas y regadas, etc.), establecida con base en las demás operaciones del proyecto.

A partir de ese banco de datos, se calculan las necesidades actuales por perímetro para cada mes del período para el que se han generado los vectores. Tales cálculos desembocan en la evaluación de las dotaciones necesarias en función de los riesgos que se está dispuesto a correr: satisfacción de las necesidades un año de 2, tres años de 4, etc.

Los resultados se comparan con las concesiones legales y los caudales realmente derivados (que pueden ser diferentes) para establecer un primer diagnóstico sobre la movilización del agua de uso agrícola.

4.3. Estimación de las necesidades futuras

En muchos casos, los sistemas de producción se han adaptado a los recursos hídricos disponibles (volumen y frecuencia de riego). Su evolución hacia sistemas más intensivos depende entonces en parte de una mejor distribución de tales recursos.

El proyecto procedió a la modelización de la economía agrícola en los espacios regados a fin de detectar los efectos de una rehabilitación de los sistemas de riego en la evolución de los sistemas de producción de las superficies regadas. Esa modelización, realizada mediante el programa GAMS del Banco Mundial, permite simular diversas situaciones plausibles de evolución según los objetivos perseguidos.

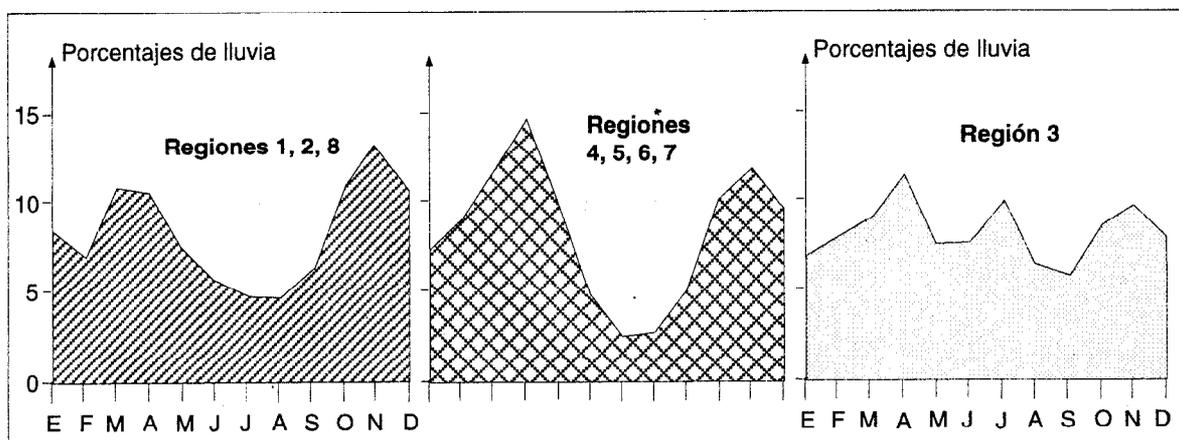


Fig. 14 - Cuenca del Mira. Repartición estacional de las precipitaciones en las 8 regiones pseudo-proporcionales

Por otro lado, se caracterizan también las superficies aún no regadas pero potencialmente regables, sobre todo desde el punto de vista climático (valores promedio anuales de lluvia y de ETP y vectores asociados).

Los resultados de la simulación agro-económica proporcionan esquemas de evolución en los perímetros regados y de incorporación al riego de superficies potenciales, que se introducen en el banco de datos globales a fin de evaluar las necesidades de agua futuras según los diversos esquemas escogidos.

4.4. Modelo lluvia-caudal

Los vectores y sus regiones se utilizan igualmente para calibrar un modelo de transformación lluvia-caudal en cuencas hidrológicamente homogéneas. Los límites de zonas deberían permitirnos aprehender mejor el impacto de los diferentes regímenes climáticos en el recurso agua a fin de calcular un vector promedio por cuenca que tenga en cuenta exactamente los diferentes impactos.

Se están efectuando pruebas en 3 cuencas vertientes controladas por estaciones hidrométricas y en las cuales influyen varias zonas climáticas, utilizando primeramente los datos observados en las estaciones siguiendo el método tradicional y haciendo luego intervenir los vectores con sus zonas de impacto.

Las mejores correlaciones entre climas (lluvia, ETP) y caudales mensuales se obtienen con los vectores, pero aún no son satisfactorias (alrededor de 0,6) en razón de la poca confiabilidad de los datos hidrométricos que requieren ser verificados y analizados críticamente.

4.5. Cálculo de los recursos disponibles en las tomas

A cada toma de agua corresponde una cuenca vertiente. Cada una de las tomas es identificada por su pertenencia a una cuenca hidrológicamente homogénea y por su posición en la red hidrográfica, gracias a una codificación lineal que permite determinar los caudales derivados aguas arriba y el impacto de dicha toma aguas abajo.

La cuenca vertiente se caracteriza por su superficie, sus valores promedio anuales de lluvia y de ETP y los vectores promedio correspondientes.

Una vez terminada la calibración definitiva del modelo de transformación lluvia-caudal, es posible estimar los caudales disponibles (mes por mes y año por año) a nivel de cada toma, y simular los cambios propuestos por la modelización agro-económica, a fin de apreciar su factibilidad.

5. OTRAS UTILIZACIONES POSIBLES

5.1. Diagnóstico de la red

La metodología adoptada en la cuenca del Mira permite analizar las estaciones de la red según 3 criterios: la calidad de la observación, la repartición altitudinal y la distribución espacial.

Las curvas lluvia-altitud muestran claramente la falta de estaciones por encima de los 3.000 m.s.n.m. Los grupos 1, 2 y 3 tienen muy poca consistencia por la inexistencia de estaciones; en ciertos casos, para elaborar el vector, fue necesario introducir puestos pluviométricos pertenecientes a cuencas vecinas. En el grupo 7, las estaciones están demasiado localizadas en la cuenca vertiente experimental, lo cual determina una falta de precisión en el trazado de los límites de la región.

En el fondo de valle (región 8 principalmente) en cambio, otros organismos (públicos o privados) han instalado estaciones climáticas para mejorar el manejo de los grandes perímetros de cultivo de caña de azúcar. En algunos casos, dichas estaciones cumplen la misma función que ciertas estaciones del INAMHI, por lo que este último podría retirar ciertos puestos pluviométricos recientes (107 y 902) o muy mal observados (603) para reequilibrar la red hacia las regiones señaladas.

Estas recomendaciones prácticas y precisas podrán completarse con criterios más elaborados de manejo de la red (densidad mínima según el tipo de región) cuando se disponga de datos más completos sobre las demás cuencas del callejón interandino. Se podrá entonces proponer una óptima red de observación.

5.2. Clasificación y caracterización climática

Casi siempre, la clasificación climática a nivel de un país está basada en el análisis de estaciones llamadas representativas; en efecto, es casi imposible tener en cuenta todas las estaciones dado su gran número y las variaciones puntuales que presentan. Desgraciadamente, pocas veces se demuestra la representatividad espacial de las estaciones escogidas. En la mayoría de los casos, la elección se realiza únicamente en función de la extensión de las series observadas.

La regionalización climática tiene la ventaja de delimitar espacios dentro de los cuales el vector generado proporciona una representatividad cifrada (correlaciones entre vector y estaciones). Es por ello un instrumento interesante para elaborar una clasificación climática precisa.

Si se estima que el número de vectores generados es aún demasiado elevado, es posible pasar al cálculo de vectores de segundo orden, de la misma manera que antes, para obtener una diferenciación más marcada. Se desembocará entonces en una clasificación menos fina, pero a menudo suficiente. Se puede igualmente repetir la operación varias veces para llegar a los grandes tipos de clima.

En el presente caso, se ha podido apreciar la importancia de un buen conocimiento preliminar de las principales características del clima (lluvia y ETP) para establecer diagnósticos a nivel de perímetros y de sistemas muy dispersos en el espacio. El método del vector regional permite responder a esa necesidad, incluso si se puede aún mejorarlo en especial a nivel de las relaciones

que caracterizan a una zona homogénea. En efecto, el coeficiente de correlación no es un indicador totalmente confiable de la pseudo-proporcionalidad de las series cronológicas dentro de una misma región, pues tiende a sobreestimar las relaciones entre vectores y estaciones en presencia de valores extremos muy marcados.

El algoritmo utilizado (vector de Y. Brunet-Moret) y el programa asociado (CLIMAN) son instrumentos prácticos y eficaces para homogeneizar las series cronológicas mensuales (casi todos los errores detectados fueron confirmados mediante encuestas y visitas de campo). Permiten igualmente delimitar zonas pseudo-proporcionales representadas por vectores que se utilizan luego para calcular necesidades y recursos en todo punto del espacio, lo cual corresponde a los objetivos fijados por el proyecto (a pesar de resultados interesantes que podrían tal vez generalizar su aplicación en el ámbito andino, un test realizado con el índice del programa MVR — vector propuesto por G. Hiez — ha mostrado igualmente que, por el momento, la distinción entre regiones pseudo-proporcionales requiere aún un cierto conocimiento del medio).

La prueba efectuada en el Mira permite agrupar las 8 regiones originales en 3 categorías:

- la primera comprende las regiones 1, 2 y 8 con coeficientes de correlación promedio de 0,94 a nivel mensual y 0,93 a nivel anual;
- la segunda reúne a las regiones 4, 5, 6 y 7 con coeficientes de 0,93 y 0,90;
- la región 3 permanece aislada.

Así, mediante el cálculo se encuentran nuevamente los grupos establecidos a nivel de los regímenes pluviométricos.

III. Conclusiones

Aunque el conocimiento de las lluvias en el Ecuador sigue siendo imperfecto, los elementos de evaluación de las pluviometrías aquí presentados permiten sin duda alguna realizar un análisis regional suficiente como para establecer, sin riesgo de gruesos errores, la pre-factibilidad de los proyectos de ordenamiento, incluso si luego se requieren estudios locales a fin de completar la información

necesaria para el cálculo definitivo de las obras.

Esto nos lleva a constatar que, por regla general, todos los métodos utilizados para estimar los valores de los parámetros pluviométricos de una región, incluso los más modernos, altamente eficaces a nivel del agrupamiento de las estaciones y de la división en zonas homogéneas, dependen de la calidad y la duración de las observaciones, sobre todo cuando se trata de estimaciones de las frecuencias elevadas de recurrencia.

Esta observación aboga evidentemente por la perennidad de las estaciones de observación pero, cuando la red es relativamente reciente, lo que es *el caso de buen número de países en vías de desarrollo*, no se debe perder de vista que se puede en cierta medida paliar la corta duración de las series de observación de las precipitaciones recurriendo a una « ampliación espacial » de la información (recogida en una zona pluviométrica homogénea) con miras a la utilización del método de estaciones-años.

Es así como, si una lluvia de frecuencia F , por ejemplo decenal, tiene puntualmente la probabilidad de ser observada en promedio un año cada diez en una estación dada, no ocurre lo mismo a nivel regional en donde ese evento de frecuencia decenal puede producirse en varios lugares durante un mismo año. Esto es particularmente cierto en la zona intertropical y en el Ecuador, en donde, a partir de masas de aire con ciertas características de temperatura y humedad (ver artículo III), los aguáceros excepcionales reflejan a menudo un aumento de la actividad convectiva que responde a condiciones estrictamente locales y por lo tanto bastante aleatorias.

Se observa que al multiplicarse el número de estaciones, es decir al aumentar la densidad de la red, aumentan las probabilidades de observar el evento.

Esta reflexión lleva a la siguiente constatación: cuando se trata de redes de reciente creación, se deben modular cuidadosamente los criterios de representatividad que se utilizan a menudo, a fin de conservar sólo una cobertura espacial mínima, y antes de cualquier supresión de estaciones que presumiblemente están repetidas se deberá realizar un estudio a profundidad. Tal acción de racionalización no se justifica realmente sino en el caso de redes suficientemente densas y antiguas.

ANOMALÍAS Y FENÓMENOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

Pierre Pourrut, Jean-François Nouvelot

I. Aspectos climáticos generales específicos al Ecuador

El panorama de conjunto del artículo III revela la complejidad de la realidad climática ecuatoriana. No se trata solamente de un régimen único rico en variantes sino de un mosaico de climas ligados a sistemas regionales y micro-regionales de gran diversidad, condicionados en parte por las características geográficas.

En sí misma, tal diversidad confiere al país una gran originalidad que se traduce en paisajes que pueden cambiar de un extremo al otro a muy cortas distancias. Este aspecto es acentuado aún más por la gran irregularidad de los elementos climáticos y en particular por la de los totales pluviométricos observados en un lugar dado, que pueden manifestarse tanto mediante lluvias anormalmente abundantes como mediante agudas sequías. El exceso, así como la falta de agua, tienen un impacto capital en el frágil equilibrio de una economía nacional dependiente en gran parte de los recursos agrícolas, y hacen que el clima sea una de las principales preocupaciones del agricultor, del planificador o del ingeniero encargado de las infraestructuras. Los valores promedio anuales ya no constituyen un criterio de apreciación suficiente y son los eventos excepcionales, tales como las lluvias catastróficas que acompañan a los fenómenos de El Niño (EN), los que tienen efectos determinantes. Así, la predicción de tales eventos extremos sería muy valiosa puesto que permitiría tomar ciertas precauciones para limitar sus efectos.

Por esta razón, se ha intentado a veces, sin mayor éxito hasta ahora, demostrar la repetición cíclica de tales eventos. Al igual que es imposible negar *a priori* la existencia de esos ciclos (aunque parece muy poco probable), sería aventurado considerar que la realidad climática actual del país es un parámetro fijo e inalterable, incluso si quienes afirman que la franja costera central y meridional está afectada actualmente por un proceso de

desertificación utilizan para ello argumentos un tanto subjetivos. A fin de disponer de los elementos de respuesta suficientes para confirmar o invalidar tales asertos, es necesario que los datos de observación disponibles sean previamente:

- sacados de su contexto estrictamente local para ser analizados a la luz de factores que los condicionan en un campo espacial mucho más amplio, a nivel del continente o incluso del planeta;
- « calibrados » situándolos en el marco temporal de referencia más amplio posible, única manera de apreciar una eventual evolución y de develar posibles « tendencias ».

Se examinarán sucesivamente los dos eventos climáticos anormales que, en el Ecuador, pueden ser considerados como mayores: por una parte, El Niño y, por otra, el pretendido desarrollo actual de un proceso de desertificación en la región costanera. En cuanto al primero, se intentará hacer un balance actual de los conocimientos relativos a su origen y su desarrollo, y se buscará cuantificar el impacto de las lluvias excepcionales, en particular durante el fenómeno de recurrencia elevada observado en 1982-1983. Utilizando el análisis de algunas series pluviométricas, se tratará de verificar si existe verdaderamente un decrecimiento de la pluviosidad en la faja litoral.

II. El fenómeno El Niño

1. DESCRIPCIÓN, CAUSAS Y EFECTOS

Fueron los pescadores sudamericanos quienes bautizaron con el nombre de « El Niño » (término que designa al niño Jesús en referencia a la época en que se produce) al calentamiento de la superficie del océano que, a lo largo de las costas peruanas y ecuatorianas, se inicia todos los años hacia Navidad y se prolonga generalmente hasta marzo o abril.

Sucede en ocasiones que tal evento adquiere una amplitud inhabitual y que el aumento de la temperatura de las aguas oceánicas es a la vez más acentuado y más prolongado. Durante los últimos decenios, ello fue observado en 1925, 1939, 1941, 1953, 1957, 1958, 1965, 1972-1973, 1976-1977, y, más recientemente, en 1982-1983. Actualmente, el término « fenómeno de El Niño (o « Niño », ENSO o simplemente EN) no se refiere a la situación observada anualmente, sino que está reservado a los eventos excepcionalmente marcados. El SCOR (*Scientific Committee for Ocean Research*) define el EN de la siguiente manera: *un flujo de aguas cálidas que, durante un período de por lo menos cuatro meses, presenta una anomalía positiva de temperatura igual o superior al valor de una desviación estándar y se desplaza a lo largo de las costas del Ecuador y del Perú*; esta definición se ha extendido hoy en día para caracterizar al conjunto de flujos de aguas superficiales anormalmente calientes en toda la zona del océano Pacífico tropical.

A lo largo del litoral sudamericano, el fenómeno puede extenderse desde el Sur de Colombia hasta el Norte de Chile. Afecta principalmente a las costas peruanas en donde se observa habitualmente el *upwelling*, es decir importantes movimientos ascendentes de aguas profundas cuya subida es favorecida generalmente por alisios intensos que desalojan las capas de superficie en dirección mar adentro. Hay que recordar que esas aguas frías, ricas en elementos nutritivos, constituyen un medio favorable para la existencia de una importante fauna de peces pelágicos e indirectamente de aves marinas, lo que ha permitido al Perú desarrollar numerosas industrias ligadas a la pesca y a la explotación del guano.

Por su importante incidencia negativa en los planos biológico y climático, EN tiene consecuencias catastróficas en la economía de los países de la zona, razón por la que, desde hace muchos años, es objeto de estudios regionales específicos. Es así como Chile, Colombia, el Ecuador y el Perú formaron el grupo ERFEN (Estudio Regional del Fenómeno El Niño) que trata de descubrir los mecanismos del fenómeno y prever su aparición, gracias a un intercambio constante de datos climatológicos y a las observaciones recogidas por cruceros oceanográficos. Los trabajos se realizan en estrecha coordinación con los estudios desarrollados a nivel internacional por un grupo COI-OMM-CPPS (Comisión Oceanográfica Internacional - Organización Meteorológica Mundial - Comisión Permanente del Pacífico Sur) que mantiene una vigilancia permanente de las condiciones físicas, meteorológicas y biológicas del océano, utilizando para ello los datos registrados y transmitidos por estaciones meteorológicas fijas, buques oceanográficos o mercantes, balizas a la deriva y especialmente satélites.

Aunque no es posible adelantar una explicación definitiva de las causas de aparición del fenómeno, en

particular porque un examen comparativo muestra que los EN pasados nunca se asemejan completamente a pesar de ciertas características comunes, se han emitido varias teorías respecto a la formación y al desarrollo de un evento tipo.

Pese a los grandes avances logrados recientemente gracias a la acumulación de datos de observación y a su procesamiento computarizado, las hipótesis planteadas no siempre concuerdan y los factores que condicionan ciertos parámetros (sobre todo aquellos que se suponen útiles a su previsión) siguen siendo objeto de estudio. Por el momento, las explicaciones más satisfactorias son bastante antiguas puesto que se trata de las de Klaus Wyrtki y Jacob Bjerknes.

Se creía primeramente que el EN era un fenómeno local provocado por el debilitamiento de los vientos de baja altitud a lo largo del litoral. Su estudio debió sin embargo contemplarse en un marco espacial mucho más amplio después de que K. Wyrtki probara que no existía disminución apreciable de la fuerza de esos vientos y que los EN pasados siempre se acompañaban de condiciones meteorológicas inhabituales. Habiendo demostrado además que, durante los 18 meses que preceden su aparición, los alisios soplan más fuertemente que lo normal, Wyrtki formuló su tesis de la « respuesta dinámica del océano al aumento de la fuerza de los alisios ». Un extracto de sus artículos resume perfectamente su teoría: « ... fuertes alisios del Sureste, que soplan durante más de 18 meses, provocan una acumulación de agua caliente en el Pacífico Oeste, acompañada de un alza del nivel del océano y de un hundimiento de la termoclina. En cuanto esos vientos se debilitan, el agua acumulada tiende a regresar hacia el Pacífico oriental y las costas sudamericanas; la llegada de esas aguas calientes provoca un alza del nivel del océano, mientras que la termoclina se hunde, lo cual reemplaza los efectos del *upwelling* y marca el inicio de un Niño »

Por su parte, J. Bjerknes propone su teoría de la « interacción termodinámica entre el océano y la atmósfera ». En 1966, observó que el calentamiento anormal del océano estaba asociado a la Oscilación Sur (SO), fenómeno que había sido observado por primera vez en 1924 por Walker. La Oscilación Sur corresponde a una fluctuación de la circulación atmosférica transversal (puesta igualmente en evidencia por Walker, ver artículo II) que se manifiesta con una variación más o menos cíclica (el período es de alrededor de 3 años) de la diferencia de presión atmosférica existente entre el sistema de altas presiones del Pacífico Sureste (isla de Pascua - Tahití) y el de bajas presiones de la región pacífica occidental (Indonesia - Australia). El índice SO es positivo cuando la diferencia es superior a la habitual y negativo en el caso contrario. Bjerknes observó que el EN estaba asociado a un índice negativo: se inicia cuando el

índice comienza a disminuir y termina cuando alcanza su valor mínimo, desplazándose el ramal ascendente de la circulación zonal hacia el Este, entre Nueva Guinea y el meridiano 180°. El debilitamiento de los alisios y el alza de las temperaturas superficiales del océano contribuyen a reforzar la contracorriente ecuatorial, lo cual, asociado a las ondas de Kelvin que se propagan de Oeste a Este, se traduce en un aporte de aguas calientes y por lo tanto en una elevación del nivel del océano en el litoral occidental del continente sudamericano. Las aguas son entonces redistribuidas, en parte hacia el Norte, pero sobre todo hacia el Sur, dando origen al EN.

Ya se ha hecho mención de los efectos catastróficos del fenómeno.

En el plano climático, el debilitamiento de los alisios, la elevada temperatura de las aguas oceánicas de superficie y las posiciones anormales ocupadas por el FE y el FIT (siendo el primero empujado hacia el Sur por la afluencia de aguas calientes y situándose el segundo también en posición muy meridional, como consecuencia de una fuerte alteración de la circulación atmosférica de Hadley) crean las condiciones propicias a la caída de abundantes precipitaciones. Incluso si sus efectos no son solo negativos (relleno de los embalses, aporte de agua a la vegetación y abastecimiento de las napas subterráneas de un sector de clima muy seco), tienen consecuencias nefastas pues son seguidas de inundaciones devastadoras y de una aceleración de los procesos erosivos. Según Joan Hock, del Servicio de Información y de Observación del Medio Ambiente de los Estados Unidos, el EN de 1982-1983 causó los siguientes daños: « (...) inundaciones en las cinco provincias occidentales del Ecuador y en la llanura costera del Perú, dejando como saldo 260 víctimas, 200 millones de dólares en destrucción de propiedades, 100 millones en pérdidas agrícolas. En el Ecuador, las inundaciones destruyeron gran parte de las plantaciones de arroz y de las infraestructuras de riego » (traducción libre).

En el plano biológico, los EN contrarían los movimientos del *upwelling*. La biomasa del fitoplancton oceánico sufre una reducción considerable en diatomeas y un aumento en dinoflagelados de aguas calientes, cambios que se acompañan de una fuerte disminución de huevos y alevinos de peces pelágicos (caballas, sardinas y sobre todo anchoas), lo que tiene una incidencia desastrosa en la vida marina y en la población de aves acuáticas. Es así como, en el Perú, por falta de alimentación, El Niño de 1982-1983 redujo la fauna avícola marina de 28 a 6 millones de individuos y el de 1972 determinó el paso espectacular de la captura de anchoas de 12 MT (megatoneladas) en 1970 a 4 MT en 1972 y 1,5 MT en 1973. A este respecto, el EN de 1982-1983 tuvo un impacto aun mayor puesto que tales capturas descendieron a menos de 0,5 MT.

Las hipótesis de Wyrтки y de Bjerknes establecen ambas la posibilidad de una predicción de un EN gracias a ciertos indicadores tales como la variación positiva del nivel del océano y de la profundidad de la termoclina entre el Pacífico oriental y el Pacífico occidental, en el primer caso, y el aumento significativo de las temperaturas superficiales de las aguas y fuertes anomalías en la diferencia de presiones atmosféricas entre el Pacífico Sudeste y Australia-Indonesia, en el segundo caso. Se debe sin embargo señalar que, a pesar de la observación de algunas anomalías, el sistema de previsión fracasó durante el Niño de 1982-1983 que sobrevino de manera inopinada. Igual sucedió con la predicción errónea de un EN en 1989-1990, el que súbitamente no se produjo pese a los numerosos signos precursores.

2. EL NIÑO 1982-1983

No cabe duda alguna de que el EN de 1982-1983 respondió a un modelo de formación diferente al modelo tipo. Wyrтки había pronosticado por cierto que el fenómeno no tendría lugar en 1982 ni en 1983, y probablemente tampoco en 1984 porque no habían cambios significativos en las variaciones del nivel del océano y de la termoclina. Sólo un análisis posterior permitió detectar algunos signos precursores, en particular un calentamiento inhabitual de las temperaturas oceánicas superficiales en la longitud 180°, ya en enero de 1982, y una anomalía de diferencia de presión atmosférica entre Darwin (Australia) y Tahití, igualmente a inicios de ese mismo año. Los fuertes déficits pluviométricos observados a mediados de 1982 en Indonesia, Nueva Zelanda y Filipinas, al igual que la sequía que afectó a Australia en la misma época deben atribuirse a un desplazamiento precoz hacia el Este de la rama ascendente de la circulación de Walker. Se observa igualmente la tendencia del FIT a desplazarse prematuramente hacia el Sur al igual que el anormal establecimiento de un sistema de vientos de Oeste a poca altura que favorece la propagación de la onda Kelvin a través del océano Pacífico.

En uno de los artículos difundidos por la Fundación Charles Darwin para las Islas Galápagos en 1985, Wyrтки hace, *a posteriori*, un excelente análisis del EN de 1982-1983. La pertinencia de sus afirmaciones merece una cita textual (traducción libre) de amplios extractos que valen la mejor de las explicaciones.

1. « (...) constituyendo la variación del nivel del océano una respuesta a la acción de los vientos, se deben ante todo describir los principales cambios anormales que sufrieron los mismos en el Pacífico tropical durante el Niño de 1982-1983. Durante la primera mitad del año 1982, el régimen de los alisios en el océano Pacífico no era notablemente diferente a lo normal (Arkin et al., 1983). A lo largo del Ecuador, al igual que al Este de la línea de cambio de fecha, los vientos eran un tanto más fuertes

que de costumbre y se registraban algunas borrascas de vientos de Oeste en la zona occidental del Pacífico ecuatorial (Sadler y Kilonsky, 1983) pero tal situación de conjunto no podía considerarse como inhabitual. La anomalía se inicia a fines de junio de 1982 y consiste en una generalización y un refuerzo de los vientos de Oeste ya observados en el Pacífico ecuatorial occidental. Alcanzan la línea de cambio de fecha en julio y su campo de acción se desplaza lentamente hacia el Este para estar finalmente presente casi en la totalidad del Pacífico ecuatorial en octubre y noviembre (Sadler y Kilonsky, 1983). (...) De enero a mayo, los vientos de Oeste soplan en la mayor parte del Pacífico ecuatorial entre el ecuador y 10° S, lo que es opuesto al régimen habitual de los alisios. Esta situación, que dura hasta junio, es responsable de la formación y del desarrollo de gran número de ciclones tropicales en el hemisferio sur. »

2. « En resumen, se puede decir que, a gran escala, dos eventos rigen al Niño de 1982-1983. Durante la segunda mitad de 1982, vientos de Oeste engendrados al Norte del ecuador se desplazan hacia el Este a lo largo de este último. Durante la primera parte de 1983, el campo de acción de esos vientos emigra hacia el hemisferio sur y ocupa todo el espacio comprendido entre el ecuador y 10° S. La topografía de la superficie del océano da una respuesta conforme a esa situación.

En todo el Pacífico, esta respuesta del nivel del océano puede ser ilustrada por los registros efectuados en cuatro estaciones escogidas como representativas de las diversas partes del Pacífico. Ponape (6° 59' N, 158° 14' E), situada en la contracorriente, es representativa de los eventos del Pacífico occidental al Norte del ecuador. En ella se observa un lento decrecimiento del nivel del océano que se inicia en mayo de 1982, alcanza su valor mínimo en diciembre y es seguido de un rápido ascenso. La isla Christmas (1° 59' N, 157° 29' O) es representativa del Pacífico central ecuatorial y el registro muestra un pico del nivel del océano entre julio y diciembre. Ese pico corresponde a la llegada al Pacífico oriental del agua caliente proveniente del Oeste, transportada por las ondas Kelvin. Luego de ese paso, el nivel del océano es claramente inferior al normal.

La evolución del nivel del agua en Santa Cruz (islas Galápagos, 0° 45' S, 90° 19' O) es representativa del Pacífico oriental ecuatorial que soporta los efectos mayores de El Niño. El registro es casi idéntico a los observados en todas las estaciones del Ecuador, del Perú y de Colombia. En él se observan dos picos bajos en mayo y junio de 1982. El nivel se eleva fuertemente en septiembre de 1982 y experimenta dos ascensos sucesivos, en enero y mayo de 1983, después de los cuales desciende rápidamente para alcanzar valores inferiores al normal. Funafuti (8° 31' S, 179° 21' E) es representativa del nivel del océano en el Pacífico occidental al Sur del ecuador, en

una zona en donde se observa habitualmente una relativa elevación de la topografía dinámica que marca el centro de la circulación anticiclónica del Pacífico meridional. En Funafuti, el nivel del océano comienza a descender en diciembre de 1982 y alcanza su valor mínimo en junio de 1983, después de lo cual emprende un nuevo ascenso.

Aunque estos registros muestran las variaciones locales del nivel del océano, no revelan los verdaderos cambios que lo afectaron a gran escala, los mismos que son mejor ilustrados por mapas de nivel oceánico para todo el Pacífico. Durante el año 1981 y muy al inicio de 1982, el nivel no mostraba una desviación significativa con relación a la normal y no es sino en el transcurso del primer trimestre de 1982 cuando se pueden poner en evidencia ligeras anomalías positivas en el Pacífico occidental. Del orden de 5 a 10 centímetros, se desarrollan entre enero y marzo a lo largo del ecuador, en el intervalo comprendido entre las islas Salomón y Tahití. (...) Este nivel más elevado que de costumbre en el Pacífico occidental es sin embargo muy inferior al observado durante los EN pasados y no puede considerarse como una de las causas directas del fenómeno de 1982. »

3. « En las Galápagos, la primera alza importante del nivel del océano se sitúa el 3 de octubre. Sigue a un lento ascenso, en agosto y septiembre, y constituye aparentemente la señal de la llegada al Este de la primera onda Kelvin. El alza del nivel oceánico en el lado oriental del continente prosigue durante lo que queda del año y alcanza un pico de + 47 cm el 6 de enero de 1983, para luego caer rápidamente. El mapa de las anomalías del nivel oceánico en diciembre de 1982 muestra al EN en el máximo de su desarrollo: en el Pacífico occidental, el nivel es en todo lado inferior al normal y la anomalía máxima alcanza - 25 cm en las islas Carolina. Esta amplia anomalía indica la existencia de un flujo de aguas calientes de superficie proveniente del Pacífico occidental, en particular de la zona situada al Norte del ecuador. Simultáneamente, aguas superficiales calientes se acumularon en el Pacífico oriental, en donde el nivel cerca del ecuador es superior en aproximadamente 35 cm a la normal, extendiéndose las anomalías positivas lejos hacia el Norte, hasta California, y lejos hacia el Sur, hasta Chile. »

4. « Durante la primera mitad del año 1983, (...) se registra en Galápagos un segundo pico del nivel oceánico; afecta a las costas del Ecuador y del Perú. La profunda depresión del nivel oceánico en el Pacífico occidental indica también una circulación anormal. Al Norte de esa depresión, entre el ecuador y 10° S, el flujo de superficie se desplaza hacia el Este, transportando las aguas calientes hacia las islas Marquesas. La acumulación de aguas anormalmente calientes es evidente en los mapas de temperaturas superficiales (Arkin et al., 1983). Al Sur de la depresión, entre 10° y 20° S, el flujo circula hacia el Oeste, lo que indica un desplazamiento meridional de

la corriente Ecuatorial Sur y, aparentemente, de todo el sistema subtropical del Pacífico Sur. »

5. « Después del Niño de 1982-1983, el regreso a la normal de la topografía oceánica y del sistema de circulación asociado a ella es un lento proceso. (...) A lo largo de las costas del Ecuador, el nivel oceánico es aún ligeramente más elevado que de costumbre mientras que es inferior a la normal en las islas Galápagos.

El principal resultado del análisis de las fluctuaciones del nivel oceánico en el Pacífico durante El Niño de 1982-1983 es la puesta en evidencia de la coherencia de esas variaciones cuando son consideradas a una escala espacial muy amplia y a una escala de tiempo muy extensa. El nivel oceánico es un excelente parámetro para correlacionar la respuesta del océano a regímenes de vientos muy variables y para estudiar el aspecto dinámico de tales respuestas. »

En el litoral ecuatoriano, los eventos descritos fueron percibidos desde octubre de 1982. El calentamiento precoz de las aguas oceánicas, seguido de un aumento apreciable de las temperaturas del aire (del orden de 3° C), contribuyó a aumentar la inestabilidad de las capas inferiores de la atmósfera y se produjeron lluvias prematuras durante la segunda quincena del mes.

Aunque su intensidad haya sido desigual según los lugares, la influencia de El Niño se extiende a todo el año, de octubre de 1982 a septiembre de 1983. La comparación entre las precipitaciones interanuales y aquellas provocadas por el fenómeno demuestra perfectamente la gran variabilidad pluviométrica de la región costanera, aspecto que fue abordado en el artículo III. Se observará que el impacto de El Niño es particularmente importante en la franja litoral, hasta una latitud de 0° 30', al igual que en las estribaciones de la cordillera Occidental. En esa zona, las pluviometrías anuales, mensuales y diarias observadas en ciertas estaciones de duración relativamente larga pueden considerarse como verdaderamente excepcionales incluso si, como lo subraya F. Moniod, « ... cuidado con las consideraciones estadísticas de los fenómenos hidrópluviométricos consecutivos a El Niño: la realidad de las frecuencias o los tiempos de retorno anunciados es muy discutible pues el hecho observado no es tal vez el paroxismo de una situación latente cuyo "germen" estaría contenido en la muestra de referencia, sino la manifestación accidental, aunque relativamente común, de otra situación ignorada en la muestra de referencia, en cuyo caso las extrapolaciones mediante las leyes de Galton, Pearson u otra, de la distribución de la muestra no tienen razón alguna de reflejar la frecuencia del accidente ». Aquí se encuentra el problema ya señalado de las distribuciones plurimodales y de los « outliers »; en realidad, el ajuste debería ser una combinación de dos componentes para tomar en cuenta la existencia de los procesos. La estimación de las frecuencias presentada es entonces sólo un elemento indicativo.

GUAYAQUIL (67 años), media interanual:

1.100,9 mm - mediana: 1.015 mm (véase fig. 15 y 16)

- Niño de 1982-1983: 4.600,4 mm (segundo valor observado: 2.619,3 mm en 1925), lo que correspondería a un período de retorno superior a varios miles de años si se admite una distribución unimodal;

- 6 meses tienen un período de retorno superior a 100 años;

- 12 lluvias diarias tienen una frecuencia anual, 4 una frecuencia decenal y 1 una frecuencia centenal;

- se registraron 33,9 mm en 10 minutos, es decir una intensidad de 203 mm/hora.

SALINAS (27 años), media interanual: 125,5 mm - mediana: 100 mm

- Niño de 1982-1983: 2.883,0 mm (segundo valor observado: 340,4 mm en 1976), lo que correspondería a un período de retorno superior a varios miles de años si se admite una distribución unimodal;

- 5 meses tienen una frecuencia más rara que la frecuencia centenal;

- 33 lluvias diarias tienen una frecuencia anual, 8 una frecuencia decenal y 2 una frecuencia centenal (señalemos en particular una lluvia de 223 mm).

MANTA (32 años), media interanual: 225,8 mm - mediana: 170 mm

- Niño de 1982-1983: 1.835,1 mm (segundo valor observado: 754,2 mm en 1953), lo que correspondería a un período de retorno superior a varios miles de años si se admite una distribución unimodal;

- 7 meses tienen un período de retorno superior a 100 años;

- 14 lluvias diarias tienen una frecuencia anual y 1 una frecuencia centenal (180 mm).

En la zona interandina, en donde la cordillera Occidental contribuye a reducir en gran medida el papel de las masas de aire oceánico, a distribuir las de manera heterogénea y tal vez incluso a anular su efecto, es muy difícil establecer una relación directa entre El Niño y las pluviometrías registradas en 1982-1983. En su conjunto, son superiores a los valores normales pero el aumento es muy variable: generalmente del orden del 20 al 30 %, pero puede también ser nulo o alcanzar el 400 %, pudiendo el alza de la pluviosidad ser muy diferente entre estaciones vecinas. Consecuentemente, la influencia de El Niño no parece traducirse principalmente en la invasión de masas de aire húmedo sino más bien en el incremento de una actividad convectiva que responde a condiciones estrictamente locales y bastante aleatorias. En Quito, se observaron 219 días de lluvia (es decir 33 más que el número anual promedio), totalizando 1.780 mm (en lugar de 1.204 mm) de los cuales 1.678 se registraron de octubre a mayo; la frecuencia del evento es de orden centenal. Se debe observar en cambio que el fenómeno no tuvo influencia alguna en las alturas

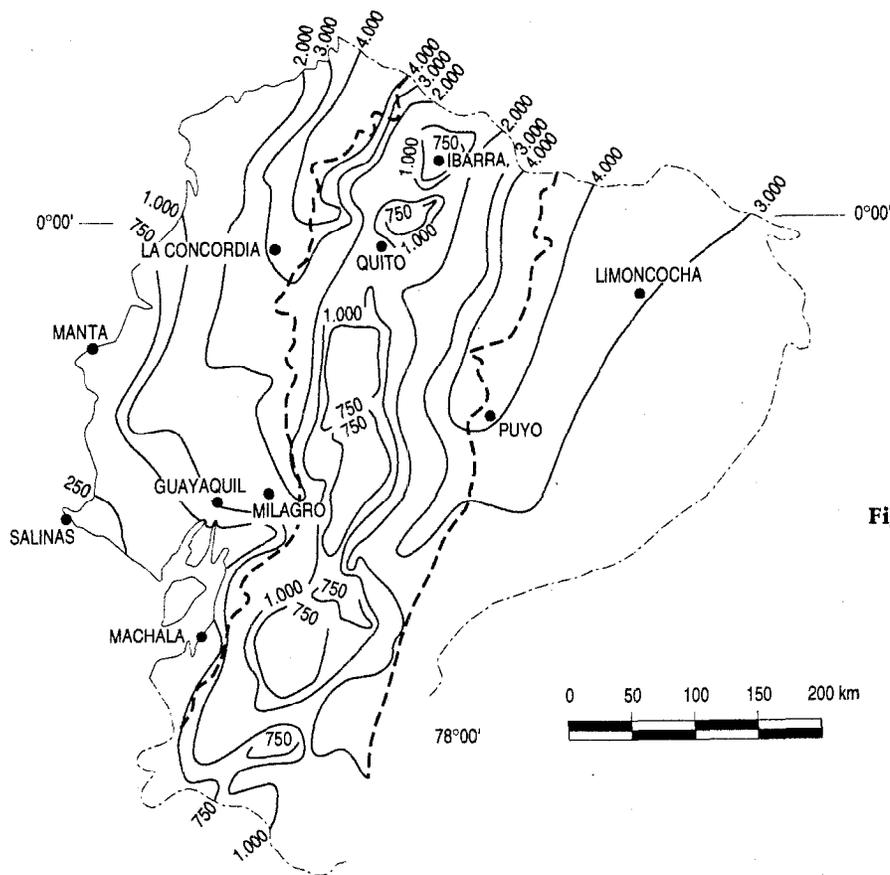


Fig. 15 Alturas pluviométricas anuales 1965-1978

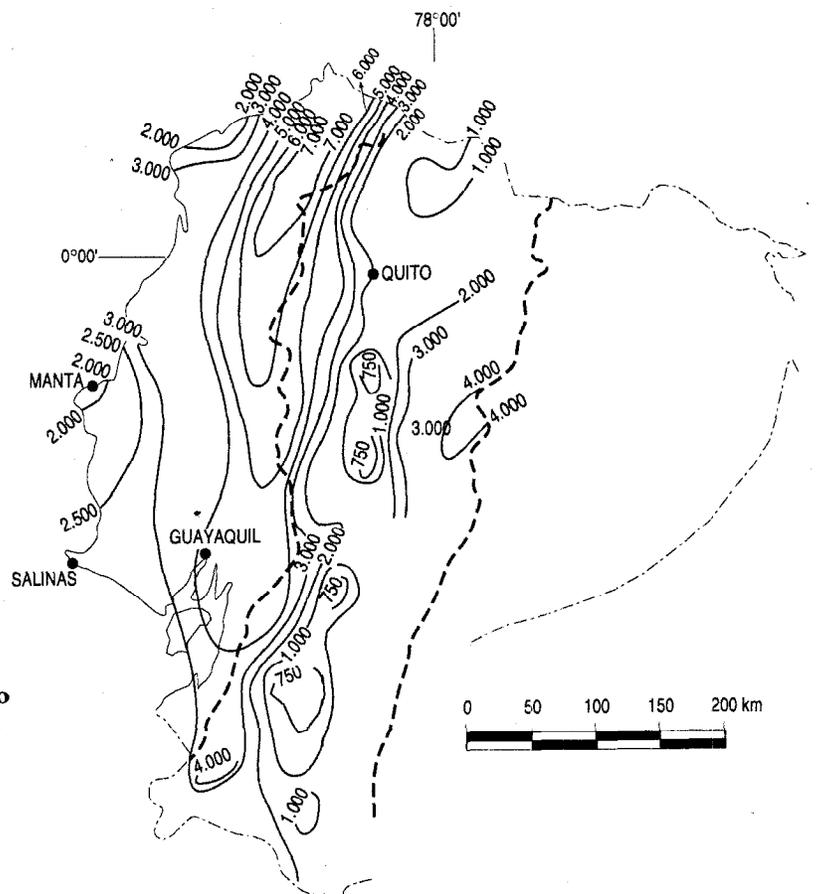


Fig. 16 - Alturas pluviométricas El Niño octubre de 1982 - septiembre de 1983

pluviométricas diarias (aunque la cantidad de lluvias fuertes sea más importante que de costumbre, lo que es ilustrado por el hecho de que el total anual aumenta en un 48 % mientras que el número anual de días lluviosos no se incrementa sino en un 17 %) ni en las intensidades que se acercan a los valores medianos.

III. Decrecimiento de las precipitaciones en la región litoral

Para subrayar el grado de anormalidad de ciertos eventos pluviométricos o para poner en evidencia una tendencia climática, es necesario hacer referencia a una crónica suficiente de datos, es decir analizar series de observaciones continuas y de larga duración.

Así, se puede pensar que una manera objetiva de ilustrar que un proceso de desertificación afecta a la región litoral central y meridional consistiría en demostrar que existe un decrecimiento de las precipitaciones anuales. Con esa intención, se escogieron las estaciones de larga duración de Guayaquil (período de 1915-1983), Milagro (1921-1983), Machala (1931-1983) y Portoviejo (escogida por su excepcional situación aunque presenta importantes y frecuentes lagunas de información) y, como referencia, al exterior de la zona estudiada, la de Quito-Observatorio (1891-1986) situada en la región andina. Se debe señalar que la información, a menudo deficiente, debió ser completada ya sea utilizando las medias interanuales para los meses faltantes (hasta dos en general, excepcionalmente tres), o estableciendo correlaciones entre estaciones vecinas cuando el año entero era demasiado deficiente. Por otro lado, el período anual de referencia escogido fue el año calendario, pues cualquier otra división no mejoraba sustancialmente los resultados. El procesamiento estadístico aplicado a las series consistió en:

- buscar leyes de distribución adaptadas para evaluar la frecuencia de ciertos eventos excepcionales, tales como los EN (ver el capítulo 2) o los años extremadamente secos (en particular 1926 y 1960 en los Andes y 1952 y 1968 en el litoral);
- estudiar la distribución en el tiempo de los picos y de los años deficitarios (búsqueda de eventuales pseudo-ciclos);
- buscar una tendencia general tratando de eliminar la influencia de las variaciones accidentales y el efecto de las fluctuaciones de corta duración, gracias:
 - al cálculo de las medias móviles simétricas, de período de cinco años, reemplazando cada valor anual n por la media aritmética entre el mismo y los valores que lo enmarcan: $(n_{-2} + n_{-1} + n + n_{+1} + n_{+2}) / 5$;
 - al cálculo de medias móviles ponderadas que toman en cuenta los años anteriores, utilizando para ello una forma exponencial decreciente siguiendo el método propuesto por J.-C. Olivry;

- al trazado de las diversas rectas de tendencia, tanto para los datos en bruto observados como para las medias móviles y las medias móviles ponderadas.

Este procesamiento y los gráficos correspondientes (figuras 17 a 21) permiten extraer las siguientes enseñanzas:

1. Las series observadas en el litoral y en los Andes son casi siempre independientes.
2. Los años muy lluviosos tienen una distribución prácticamente al azar. Tal observación es igualmente válida para los años muy secos.
3. Aunque el número de eventos y la duración de las series sean insuficientes para sacar conclusiones definitivas, se puede observar que en el litoral, los EN están precedidos de un año de baja pluviometría y que esta se sitúa en la fase decreciente de las medias móviles.
4. En Quito, el examen de las medias móviles parece mostrar una « pseudo-periodicidad » cuyos picos estarían centrados en los años 1899, 1916, 1933, 1952 y 1970, es decir cuyos intervalos son muy cercanos puesto que varían de 17 a 19 años. Incluso si los valores anuales originales lo sugieren también, sobre todo a partir de inicios de siglo, hay que guardarse de sacar de ello conclusiones demasiado afirmativas, en particular a causa del efecto Sulsky que es un efecto de ciclo introducido artificialmente por el empleo de las medias móviles.
5. La serie de Quito muestra igualmente una baja muy ligera de la pluviometría, del orden de 1 mm por año (la ecuación de la recta de tendencia ajustada, presentada sólo como elemento indicativo, es $P \text{ mm} = 1.287 - 1,3 t$, en donde t es el número de años contado a partir del inicio de las observaciones), pero, también aquí, se debe ser prudente pues la desviación estándar de la estimación de la media representa varias decenas de milímetros y por ello es difícil adelantar que el hecho no es fortuito.

En cuanto a las cuatro series observadas en la región costera hasta 1982, también ponen en evidencia una tendencia (coeficientes de correlación significativos en el intervalo de confianza del 95 %) al decrecimiento de las lluvias del orden de 300 mm en 50 años (las ecuaciones de las rectas de regresión, cuyos resultados deben ser tomados con extrema prudencia, arrojan valores de pendientes de aproximadamente 7 mm/año en Machala, Portoviejo y Guayaquil, alcanzando incluso cerca de 16 mm/año en Milagro). En Guayaquil y en Milagro, en donde la pluviosidad es relativamente más elevada, este fenómeno pasa prácticamente desapercibido mientras que en Machala, Portoviejo y en general en toda la franja litoral sur y central, la baja registrada es percibida con mayor agudeza, lo que acredita la versión popular de la existencia de un actual proceso de desertificación. En lo que respecta al presente estudio, afirmar que tal proceso se está operando sería muy aventurado. Incluso si se identificó una tendencia a la baja, las series observadas son muy insuficientes como para hacerse una idea

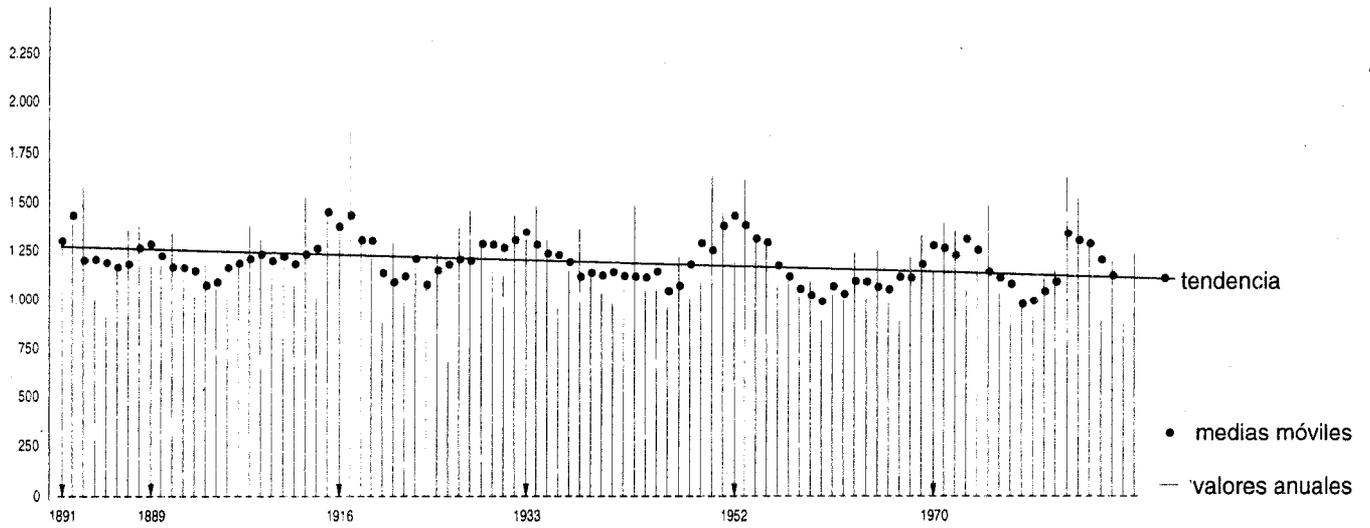


Fig. 17 - Quito

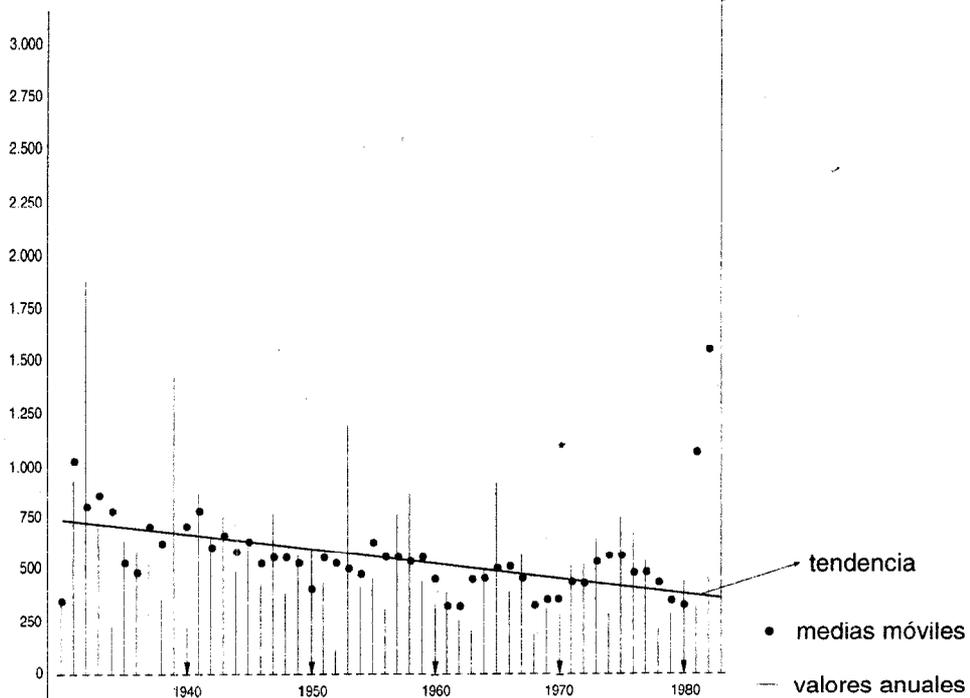


Fig. 18 - Machala

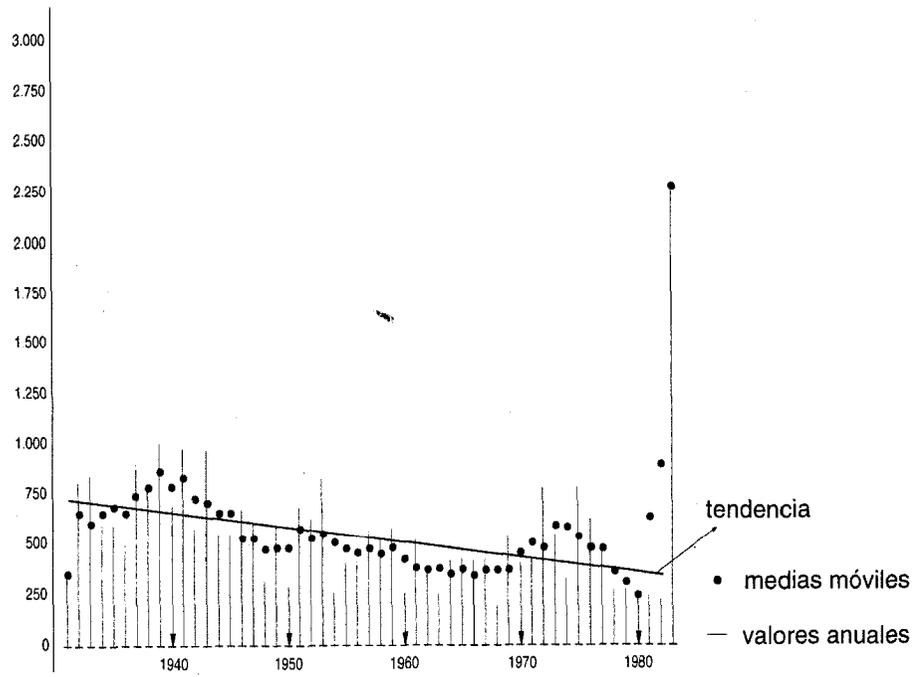


Fig. 19 - Portoviejo

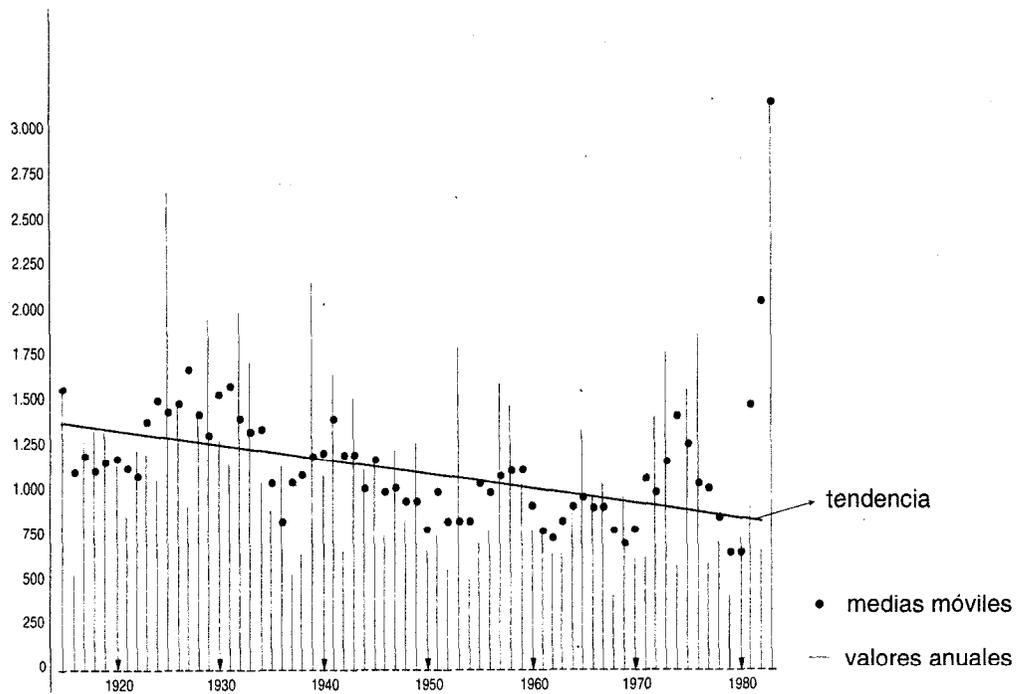


Fig. 20 - Guayaquil

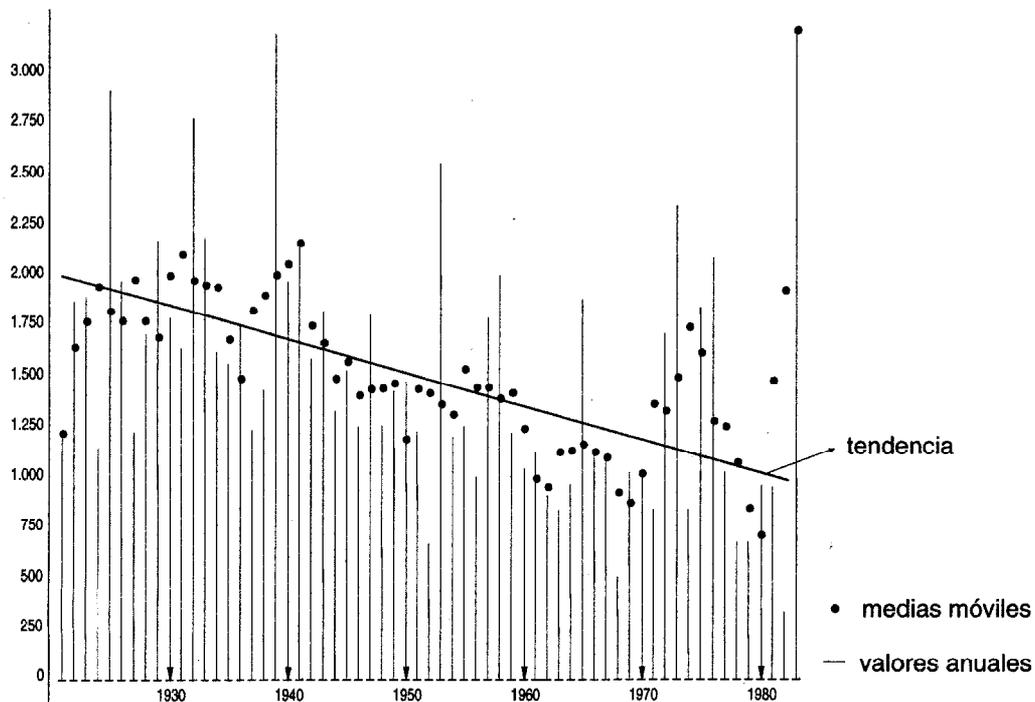


Fig. 21 - Milagro

definitiva de la posición exacta del período estudiado dentro del contexto de las demás tendencias históricas, a la baja y al alza sucesivamente, que constituyen las oscilaciones altamente probables de un elemento climático tal como la lluvia.

IV. Conclusiones

El análisis estadístico al que fueron sometidas las series pluviométricas observadas, aunque no permite una verdadera predicción de los eventos excepcionales ni de los totales pluviométricos futuros, proporciona algunas valiosas indicaciones en cuanto a la posibilidad de aparición de un Niño. Es así como un índice como el que representa la anterioridad de un año particularmente seco durante un período de pluviometría decreciente (únicamente el Niño de 1931 no responde estrictamente a esa condición incluso si el año 1930 es un tanto deficitario) constituye un nuevo elemento de previsión que merece probablemente ser considerado,

sobre todo si viene a sumarse a los demás indicadores tradicionales (variación positiva del nivel del océano, aumento significativo de la temperatura superficial de las aguas, incremento prolongado de la fuerza de los alisios y anomalías de la Oscilación Sur).

También fue posible identificar una tendencia decreciente de las pluviometrías en la región costanera, lo que implica dos aspectos complementarios. El primero consiste en que los valores de los años secos de frecuencia rara presentados en los dos artículos anteriores están ligeramente sobrestimados puesto que fueron calculados con el conjunto de la serie. El segundo se refiere al hecho de que sería audaz pronosticar, como algunos no han vacilado en hacerlo, que las pluviometrías de la zona litoral continuarán decreciendo para desaparecer completamente. Toda consideración de este orden no podría adelantarse a menos que se situara en un amplio contexto histórico, es decir en un marco temporal mucho más amplio que el permitido por las series disponibles.

ARTÍCULO VI

**ESTIMACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS
SUPERFICIALES DE AGUAS ALTAS
Y ANÁLISIS DE LAS RELACIONES
LLUVIA-ESCORRENTÍA**

*Éric Cadier, Georges Girard, Jean-François Nouvelot, Pierre Pourrut,
Michel Travaglio, Rafael Alulema, Iván Leiva, Fabián Burbano, Roberto Cruz*

El método de estudio de la escorrentía ya fue objeto de una corta presentación en el artículo I. Destinado a estimar los recursos hídricos superficiales con fines agro-pastorales, inicialmente estaba centrado en la evaluación de los parámetros hidrológicos, ya sea necesarios para la elaboración de los proyectos de valorización de los perímetros agrícolas, o requeridos para la construcción de obras de almacenamiento o captación. Se trataba entonces esencialmente de apreciar el valor de los módulos y de los estiajes. Es sorprendente constatar que el estudio de las aguas altas era considerado entonces como relativamente secundario por las entidades encargadas de la recolección de datos hidrológicos, indiferencia que se traducía por cierto en la inexistencia casi sistemática de medidas de caudales elevados, casi siempre estimados a partir de la extrapolación aventurada de las curvas de calibración establecidas con aforos de aguas bajas y medianas. A pesar de la insistencia ya antigua de los hidrólogos del ORSTOM, hubo que esperar el decenio de los ochenta para que la urgencia de resolver ciertos problemas específicos al desarrollo de las zonas secas, al igual que la absoluta necesidad de aumentar a corto plazo la dotación de agua potable de las grandes ciudades, permitieran finalmente equipar tres cuencas representativas.

Se revela primeramente útil indicar en pocas palabras algunos aspectos de los que se deriva la problemática de los estudios hidrológicos en el Ecuador:

- como en la mayoría de países en vías de desarrollo, las cuencas controladas por las estaciones hidrométricas de la red nacional son en general de gran

tamaño, siendo raras las de una extensión menor a varios centenares de Km²;

- al inicio, a falta de observaciones sobre las cuencas y subcuencas hidrográficas de reducida extensión equipadas con una cantidad suficiente de aparatos de medición, era por supuesto impensable establecer relaciones que permitan pasar de las lluvias a los escurrimientos, y menos aún proceder al análisis estadístico de los parámetros de la escorrentía utilizando, como de costumbre, los datos de las estaciones pluviométricas de referencia situadas en la misma zona. Afortunadamente, algunas estaciones de la red hidrométrica poseían observaciones de una duración bastante larga y de calidad aceptable a la vez que controlaban cuencas de superficie relativamente reducida; en cambio, tales cuencas no estaban equipadas con una red pluviométrica de densidad suficiente e incluso a veces no existía puesto pluviográfico alguno. El estudio estadístico de los parámetros hidrológicos debía entonces efectuarse independientemente de la pluviometría;

- la gran heterogeneidad de las condiciones físico-climáticas, sobre todo en las regiones secas, implica imperativamente la instalación de una cantidad importante de cuencas vertientes representativas de superficie reducida.

El presente artículo comprende dos partes, expuestas en el orden cronológico de su realización.

La primera se refiere a los estudios antiguos realizados en las estaciones hidrológicas de la red nacional de observación. Como ya se indicó, se trataba de rellenar de la mejor manera la importante laguna referente al

estudio de las crecidas. Esto explica que los valores estimados por los hidrólogos del ORSTOM, basados en una información precaria o insuficiente, sean probablemente aproximados incluso si algunos son aún de actualidad.

La segunda parte trata de los estudios realizados sobre tres conjuntos de cuencas representativas, en asociación con organismos de desarrollo regional y con un municipio. Tales estudios se proponían cuantificar las disponibilidades de agua e identificar los parámetros que permitieran la óptima utilización de los recursos existentes. En el plano estrictamente hidrológico, permitieron sobre todo afinar una buena cantidad de conceptos que habían permanecido imprecisos y especialmente establecer (como se verá, con una precisión muy desigual según los casos) las relaciones que, en cuencas de superficie limitada y con intervalos de tiempo cortos, unen las lluvias a la escorrentía.

I. Evaluación de las aguas altas en las estaciones de la red

En una primera fase, no se pudo hacer nada mejor que consultar los registros y diagramas originales de todas las estaciones de la red que tenían más de ocho años de observaciones a fin de buscar las alturas máximas de agua observadas y luego, una vez realizado el análisis crítico de la curva de calibración y de sus posibilidades de extrapolación, *evaluar los caudales máximos anuales* y calcular la media correspondiente. La representación gráfica de los valores de los caudales específicos (q en l/s/Km²) en función de las superficies de las cuencas (S en Km²) y el trazado de las curvas

$$q \cdot \sqrt{S} = \text{Cte}$$

permiten comparar los caudales máximos provenientes de cuencas de superficies diferentes.

Aunque constituye un procedimiento rudimentario, tal estudio, basado en aproximadamente 40 estaciones, permite apreciar que las zonas de alto relieve de la cordillera Occidental, en particular los sistemas hidrográficos situados en la fachada pacífica, producen crecidas desproporcionadas con relación a la superficie de las cuencas; ellas resultan probablemente de la ruptura brutal de taponos producto de enormes deslizamientos de terreno. Se constata igualmente que los ríos costeros están sujetos periódicamente a desbordamientos catastróficos que deberían ser objeto de estudios particulares para conocer su propagación y determinar las obras de protección necesarias.

Mientras las cuencas representativas en proceso de instalación proporcionaran los resultados esperados, lo que no podía esperarse, razonablemente, antes de tres a cinco años, se emprendió un *estudio hidrológico teórico sobre las cuencas hidrográficas de tamaño mediano no equipadas con red pluviométrica*. Tal estudio se proponía

remediar provisionalmente la falta de datos, sobre todos de aquellos relativos a las altas aguas, proporcionando estimaciones que, si se respetaban los criterios de representatividad puestos en evidencia, podían transferirse o extrapolarse a conjuntos más amplios.

Por principio, para tener una cierta representatividad, las estaciones hidrométricas escogidas debían tener cuencas de una superficie inferior a los 1.000 Km², estar equipadas con un limnógrafo que haya funcionado durante por lo menos diez años (duración que pudo disminuirse a cinco o seis años en ciertos casos), disponer de una calibración lo suficientemente extensa como para no tener que recurrir a extrapolaciones demasiado importantes, tener a proximidad (e incluso mejor en la cuenca misma) una o varias estaciones pluviométricas de referencia y finalmente pertenecer a grandes conjuntos físico-climáticos (zonas hidrológicas teóricamente homogéneas, ver artículo I).

Las observaciones y las medidas seleccionadas con base en los criterios expuestos dieron lugar a un tratamiento cuyas grandes líneas se indican a continuación.

1. Se calcularon de nuevo cuidadosamente las relaciones alturas-caudales. Se descartó toda relación no unívoca y se puso especial atención en los cambios de calibración que son muy frecuentes en el Ecuador. Se verificaron los valores de los caudales elevados gracias a una comparación de los resultados obtenidos de diversas maneras, por extrapolación ya sea de la curva de calibración o de las curvas de velocidades medias y de secciones mojadas, o finalmente mediante la utilización de fórmulas hidráulicas tradicionales (Manning ...).

2. Se procedió a una rigurosa selección de las crecidas observadas, conservando únicamente la muestra constituida por aquellas que tenían un caudal pico elevado y cuya forma era simple, con un ascenso y un descenso bien individualizados; solo en casos excepcionales, por falta de datos, se utilizaron hidrogramas resultantes de la descomposición de una crecida compleja. Las crecidas escogidas permitieron trazar y definir parámetros correspondientes a los hidrogramas de crecidas de frecuencias mediana y decenal (ver punto 4 más adelante). Por supuesto, no se puede hablar de verdaderos « hidrogramas unitarios », para los que se necesita conocer la distribución de las lluvias en el tiempo y el espacio, sino más bien de *hidrogramas característicos* cuya forma fue simplificada al máximo a fin de obtener resultados homogéneos. Se calcularon:

- el tiempo de subida t_s
- el tiempo de base t_b
- el volumen total escurrido V_e
- el volumen de escurrimiento superficial V_r
- la lámina total escurrida $L_e = V_e / S$
- la lámina de escurrimiento superficial $L_r = V_r / S$
- el caudal inicial Q_0

- el caudal máximo total Q_{max}
- el caudal promedio escurrido Q_m
- el caudal máximo de escurrimiento superficial Q_r
- el coeficiente de forma $K_f = Q_r / Q_m$, en donde el caudal promedio de escurrimiento superficial $Q_{mr} = V_r / t_b$

3. Debido al número generalmente insuficiente de años observados, la muestra necesaria para el análisis estadístico de los caudales pico no contempla un solo valor por año sino que está compuesta de todos los picos de crecidas no vinculados entre sí. Esta condición de independencia de los valores es fundamental, lo que explica que algunos de ellos fueran descartados. Una vez seleccionados, los datos de cada estación fueron clasificados en orden decreciente ($n, n+1, \dots$) y se calculó la frecuencia empírica de cada valor a fin de buscar la ley de distribución que diera el mejor ajuste. Dada la utilización de series cuyo número de eventos N es ampliamente superior al número de años de observación N_a , hay que señalar que las frecuencias calculadas tienen en cuenta este último valor; no se trata entonces de la frecuencia empírica obtenida a partir de las fórmulas tradicionales $F = n - 0,5 / N$, o incluso $F = n - 0,3 / N + 0,4$, sino de la frecuencia $f = F \cdot N_a / N$. Se realizaron igualmente pruebas comparativas trabajando por clases o en muestras reducidas con valores superiores al umbral.

4. Conociendo para cada estación los valores de los diversos caudales pico de frecuencia 0,5 ó 0,1 (las muestras no permitieron estimar los valores de recurrencia mayor), se elaboró un hidrograma promedio ya sea por comparación de las crecidas relacionándolas con una misma lámina escurrida (10 mm por ejemplo) o simplemente adoptando como valores las medianas de los tiempos de subida y de los tiempos de base, así como el mayor coeficiente de forma.

5. Para relacionar las crecidas con las lluvias que las han provocado, por ejemplo, para estimar el coeficiente de escurrimiento superficial K_r , se debe admitir primeramente que toda crecida de una cierta frecuencia ha sido provocada por un aguacero diario (excepcionalmente lluvias de varios días consecutivos cuando los tiempos de base son muy largos) con una frecuencia idéntica y bastante bien repartida en toda la cuenca. En el capítulo 1 del artículo IV se demostró que se podían utilizar las leyes de Galton y de Pearson III para el análisis de las lluvias diarias (o de varios días consecutivos) en la mayor parte de las regiones del país. Es posible entonces, ya sea servirse de los datos de una estación de referencia de larga duración si existe en la cuenca o a proximidad, o utilizar el mapa de isoyetas anuales y los ábacos del artículo mencionado para calcular la precipitación diaria que tenga la frecuencia buscada.

Sin embargo, el valor obtenido es puntual y, una vez conocida esa altura pluviométrica P_x que tiene una cierta probabilidad de observarse en cualquier punto de

una cuenca de superficie S , se debe pasar a la lluvia media P_m que tenga la misma probabilidad de observarse en el conjunto de la cuenca. Se debe entonces definir un coeficiente de reducción $k_a = P_x / P_m$. Desgraciadamente, como los estudios realizados en el Ecuador sobre la variabilidad del coeficiente de reducción son incompletos o poco convincentes, se debió recurrir a la fórmula propuesta por Gabriel Vuillaume para África Occidental y Central:

$$k_a = 1 - (9 \log T - 42 \cdot 10^{-3} P + 152 \pm 10) 10^{-3} \log S$$

en donde S es la superficie de la cuenca, P la altura pluviométrica anual y T el período de retorno para el que se calcula k_a . El empleo de esta fórmula (se conservó el coeficiente 9, probablemente un poco elevado en el Ecuador, y se escogió 152 como valor del factor constante) se justificó mediante una verificación realizada *a posteriori* en la cuenca vertiente representativa del Tinto, en donde dio resultados muy coherentes.

6. Gracias a las características definidas por los hidrogramas (t_b, K_f y V_r) y a partir de lo anterior, se puede, para las frecuencias escogidas, proceder al cálculo de los demás parámetros y en particular del coeficiente de escurrimiento superficial K_r . Es así como, a partir de la fórmula que define el coeficiente de forma

$$K_f = \frac{Q_r}{Q_m} = Q_r \cdot \frac{t_b}{V_r}, \text{ se deduce:}$$

$$V_r = \frac{Q_r \cdot t_b}{K_f}$$

$$L_r = \frac{V_r}{S} = \frac{Q_r \cdot \frac{t_b}{K_f}}{S}$$

y después de haber estimado el aguacero promedio P_m en la cuenca:

$$K_r \text{ en } \% = 100 \frac{L_r}{P_m}$$

7. Regresando a la extrapolación a las zonas desprovistas de observaciones de los principales parámetros de las crecidas, especialmente los caudales pico, se comprenderá fácilmente que el reducido tamaño de la muestra de trabajo no permitía abarcar el territorio en su conjunto. El método indicado a continuación es entonces válido solamente:

- en el callejón interandino y en las estribaciones de la cordillera Occidental, para relieves con fuertes pendientes (clases R6 a R8, ver más adelante) en donde el aguacero diario mediano está comprendido entre 25 y 65 mm (clase H1). Se trata de zonas cuya altura anual de lluvia puede variar de 700 a 1.800 mm y en donde predomina una cobertura vegetal herbácea con raíces superficiales;

- en las regiones costaneras con un relieve fuerte a moderado (clases R4 y R5), en donde la lluvia diaria

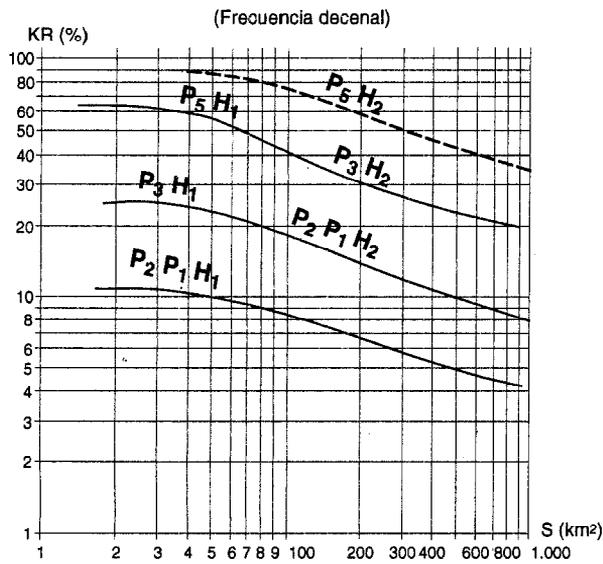


Fig. 22 - Variación del coeficiente de escurrimiento superficial en función de la superficie, de la permeabilidad de la cuenca y de las precipitaciones anuales

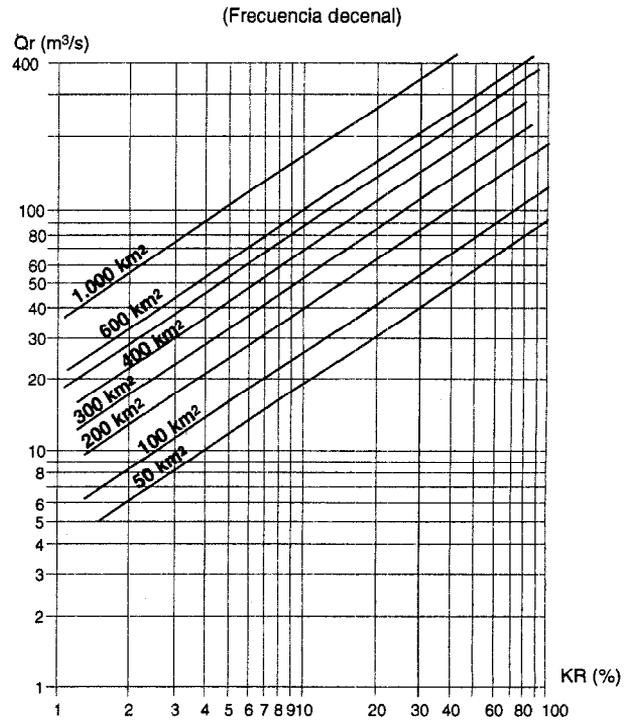


Fig. 23 - Variación del caudal máximo de crecida en función del coeficiente de escurrimiento superficial y de la superficie de la cuenca

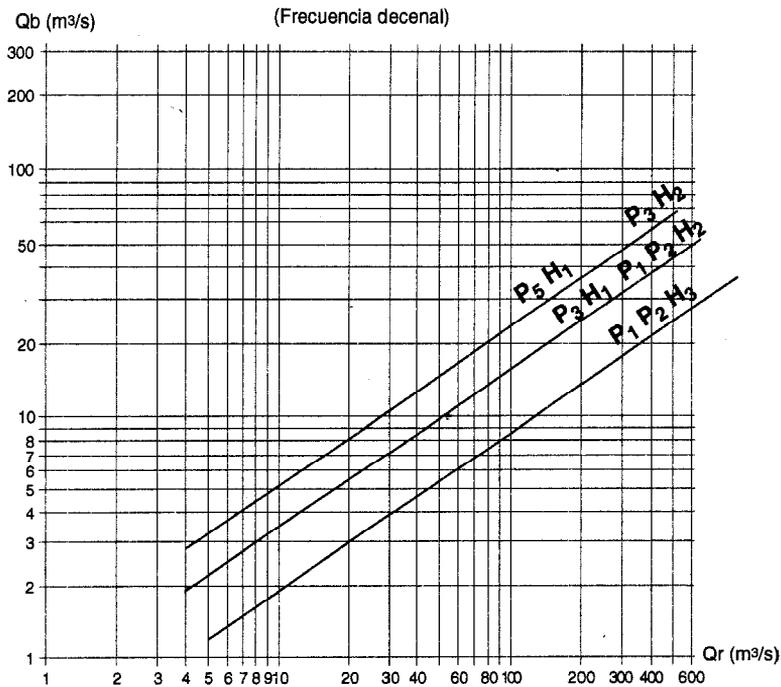


Fig. 24 - Variación del caudal de base en función del caudal máximo de crecida, de la permeabilidad de la cuenca y de las precipitaciones anuales

está comprendida entre 65 y 100 mm (clase H2). Se trata de una vasta zona en donde la altura pluviométrica anual varía de 1.200 a 2.500 mm y en donde la vegetación natural dominante, bastante densa, es un bosque cuyos árboles tienen un sistema radicular bien desarrollado.

El procedimiento de estimación de los valores de frecuencia decenal comprende las siguientes etapas:

a) en primer lugar, corresponde calcular la superficie S de la cuenca y definir a qué clases de permeabilidad P y de altura pluviométrica diaria H corresponde. Mientras que los dos primeros parámetros requieren una documentación cartográfica, se puede estimar el último, ya sea tomando como referencia un puesto pluviométrico con un período de registro bastante largo, o, en su defecto, utilizando las normas presentadas en el artículo IV de esta obra;

b) luego se debe utilizar la figura 22 para estimar el valor probable del coeficiente de escurrimiento superficial $K_r = f(S, P, H)$;

c) una vez conocido K_r , se puede evaluar el caudal máximo de escurrimiento superficial Q_r utilizando la figura 23, en donde $Q_r = \phi(K_r, S)$;

d) finalmente, para pasar del caudal máximo de escurrimiento superficial al caudal pico total Q_{max} , hay que agregarle el valor del caudal de base Q_b que fluye en el mismo instante, parámetro que se puede estimar con la ayuda de la figura 24.

Estas estimaciones proporcionan a los diseñadores de proyectos (incluso si se trata solo de una evaluación para un período de retorno de diez años) el valor de los parámetros que generalmente hacen falta cuando se deben dimensionar obras hidráulicas, por ejemplo calcular sobre bases racionales la apertura de un puente, la sección de un canal o las características de un vertedero de crecida.

Las cuencas de referencia y los principales resultados se presentan en los cuadros 12 y 13.

En el cuadro 12 figuran las características físicas y climáticas en 12 cuencas hidrográficas que sirvieron de referencia para realizar el presente análisis; su superficie varía de 66 a 715 Km². A pesar de la presentación general del método de extrapolación espacial y de regionalización utilizado en el Ecuador, que aparece en el artículo I, la comprensión del cuadro requiere la siguiente información complementaria:

- columna 2: nombre de la estación hidrométrica de control; las abreviaciones a.j. y d.j. significan « antes de la confluencia » y « después de la confluencia »;
- columna 5: altitud de la estación, en m.s.n.m.;
- columna 6: superficie, en Km²;
- columna 7: índice de Gravelius (compacidad de la cuenca);
- columna 8: índice de pendiente o clase de relieve, calculado a partir del desnivel específico D_s :

R1 = relieve muy reducido	$D_s < 10$ m
R2 = relieve reducido	$10 < D_s < 25$
R3 = relieve reducido a moderado	$25 < D_s < 50$
R4 = relieve moderado	$50 < D_s < 100$
R5 = relieve moderado a fuerte	$100 < D_s < 250$
R6 = relieve fuerte	$250 < D_s < 500$
R7 = relieve muy fuerte	$500 < D_s < 1.000$
R8 = relieve extremadamente fuerte	$1.000 < D_s$

- columna 9: clase de aporte subterráneo, es decir de participación efectiva de las aguas del subsuelo en la escorrentía; esta noción es más o menos asimilable a la permeabilidad (el índice H es signo de heterogeneidad):

- P1 = zona muy permeable, con o sin napa acuífera;
- P2 = zona permeable con napa acuífera;
- P3 = zona de permeabilidad mediana a baja;
- P4 = zona kárstica o macro-fisurada;
- P5 = zona impermeable;

- columnas 10 y 11: pluviometría anual y diaria de frecuencia mediana.

El cuadro 13 resume las características principales de las crecidas de frecuencia mediana y de frecuencia decenal para las mismas estaciones: caudal pico total, caudal máximo de escurrimiento superficial, tiempo de subida, tiempo de base, coeficiente de forma y coeficiente de escurrimiento superficial.

II. Estudios de las aguas altas realizados en cuencas vertientes representativas o experimentales

El 14 de julio de 1978, se suscribió en Quito un convenio interinstitucional de cooperación técnica relativo a « la realización de estudios en cuencas vertientes representativas o experimentales ». Los signatarios eran el Ministerio ecuatoriano de Agricultura y Ganadería a través del PRONAREG, el INERHI, el CRM, el CREA, el PREDESUR y la EMAP-Quito, con la asistencia técnico-científica se confiaba al equipo de hidrólogos del ORSTOM en Quito. El objetivo fundamental de ese acuerdo era instalar, en cuencas de tamaño pequeño o mediano, una red de observación hidro-climatológica suficiente como para analizar y cuantificar los diversos parámetros del balance hídrico y, especialmente, para estimar las características de los escurrimientos excepcionales y establecer las relaciones lluvia-escorrentía superficial.

Como las regiones áridas (península de Santa Elena, provincia de Manabí) y las zonas urbanas podían presentar un déficit en el abastecimiento de agua potable (aglomeración de la capital), se consideraron prioritarias y los primeros sitios equipados abarcaron las tres cuencas vertientes juzgadas representativas de cada una de esas regiones: la del río Tinto, la del río Banchal y la de la ciudad de Quito.

nº	Estación	Latitud	Longitud W	A en m	Características físicas de la cuenca				Lluvia media	
					S (km²)	C	R ~	P ~	año	día
1	Portoviejo a Santa Ana	01° 12' 10" S	80° 22' 00"	50	466	1,82	R5	P3H	1.550	95
2	Carrizal a Calceta	00° 50' 40" S	80° 09' 35"	20	546	1,42	R4	P3H	1.800	93
3	Bulubulu a.j. Payo	02° 15' 11" S	79° 33' 23"	40	687	1,52	R3-5	P2	2.000	95
4	Calera a.j. Amarillo	03° 38' 23" S	79° 38' 32"	680	215	1,20	R7-8	P3-4	1.500 ?	62 ?
5	Chimbo a San Lorenzo	01° 04' 11" S	79° 00' 15"	2.400	616	1,30	R7	P3-4	780	37
6	Chima a.j. Pesquerías	01° 51' 25" S	79° 04' 15"	2.100	96	1,30	R7-8	P4	1.200 ?	60
7	Matadero d.j. Alausí	02° 52' 01" S	79° 04' 00"	2.645	312	1,22	R6	P3H	1.200	45
8	Yanayacu Puente Pucará	01° 04' 27" S	78° 27' 18"	3.095	256	1,32	R6	P3H/4	1.400 ?	59*
9	Ambato a Ambato	01° 15' 32" S	78° 39' 46"	2.680	715	1,20	R6-7	P4/3H	850	27
10	Apaquí d.j. Minas	00° 32' 16" N	77° 47' 00"	2.650	329	1,23	R6	P3H	1.300?	47
11	Guachalá a.j. Granobles	00° 00' 41" N	78° 10' 00"	2.740	411	1,39	R6-7	P2-4	1.500	47
12	Ozogoche desagüe lago**	02° 14' 43" S	78° 35' 52"	2.715	66	1,22	R7	P3H	1.200 ?	42

* Lluvia de 2 días consecutivos

** existencia de lagos

C es el índice de compacidad de Gravelius

R ~ es la clase de relieve, definida a partir del desnivel específico de la cuenca (ver artículo I)

P ~ es el tipo de aporte subterráneo deducido de la permeabilidad de las rocas (ver artículo I)

? valor aproximado

Cuadro 12 - Estaciones de estudio de las crecidas

nº	Estación	Crecida de frecuencia mediana						Crecida de frecuencia decenal					
		Qmax	Qr	tm	tb	Kf	Kr (%)	Qmax	Qr	tm	tb	Kf	Kr (%)
1	Portoviejo a Santa Ana	88	76	8h30	28h00	2,35	12	137	122	10h30	35h00	2,15	17
2	Carrizal a Calceta	240	215	10h00	43h00	2,70	25/30	265	235	12h00	50h00	2,60	30/35
3	Bulubulu a.j. Payo	77	62	7h30	30h00	2,20	6	110	90	12h00	40h00	2,10	9
4	Calera a.j. Amarillo	83	63	1h35	8h00	3,50	6	110	85	2h15	11h00	3,00	9
5	Chimbo a San Lorenzo	75	60	1h30	11h00	3,10	4	128	108	2h00	13h30	3,10	6,5
6	Chima a.j. Pesquerías	16	8	3h00	11h00	2,85	3	23	13	4h30	15h00	2,80	4,5
7	Matadero d.j. Alausí	69	58	2h30	16h00	3,40	10	96	84	3h00	19h00	3,35	13
8	Yanayacu Puente Pucará*	78	66	12h30	72h00	2,60	55/58	92	77	13h00	80h00	2,55	60/65
9	Ambato a Ambato	92	80	4h00	12h30	2,55	11	115	100	5h00	15h00	2,50	14
10	Apaquí d.j. Minas	56,5	50	4h30	22h00	3,00	14	76	65	7h00	30h00	3,00	17
11	Guachalá a.j. Granobles	64	54	8h00	26h00	2,60	13	92	79	9h00	33h00	2,90	15/16
12	Ozogoche desagüe lago**	12,5	7,5	11h00	33h00	2,90	13	18	12	13h30	38h00	3,10	16

* lluvia de dos días consecutivos

** existencia de lagos

Cuadro 13 - Características de las crecidas

Tal como lo especifica el título de este artículo, se abordarán aquí únicamente los aspectos relativos a las aguas altas y a las relaciones entre las lluvias y la escorrentía. Para todo complemento de información respecto a los estudios realizados en los tres conjuntos de cuencas, el lector podrá remitirse a las informes técnicos correspondientes. Por razones diversas, la calidad de los resultados obtenidos es sumamente heterogénea.

1. LA HOYA DE QUITO

Situada en un compartimento fallado de la vertiente interandina de la cordillera Occidental, enmarcada por los altos relieves de los volcanes Pichincha (4.680 m.s.n.m.) y Atacazo, al Oeste, y por el *horst* de Puengasí-Bellavista al Este, la ciudad de Quito se extiende de Norte a Sur en más de 35 Km, mientras que su ancho nunca supera los 8 Km. En su mayoría, está construida sobre la llanura lacustre que ocupa el eje de la depresión (2.800 m.s.n.m.) pero, como consecuencia del incremento explosivo de la población durante el último decenio, algunos barrios periféricos recientes ocupan los flancos del Pichincha y llegan a veces a los 3.200 m.s.n.m.

Los estudios duraron cuatro años a contarse desde el 1º de marzo de 1981. Fueron realizados por un grupo de ingenieros de alto nivel y de técnicos pertenecientes a la EMAP-Q y al PRONAREG, en cooperación con los hidrólogos del ORSTOM. Además, la EMAP-Q financió una colaboración de expertos de calidad y el programa contó con el apoyo del *Centre Informatique Géologique* — Centro Informático Geológico — de la *École Nationale des Mines* — Escuela Nacional de Minas — de París, para el aspecto modelización, y del *Bureau de Géologie Appliquée* — Oficina de Geología Aplicada — (BURGEAP), para el aspecto alimentación artificial de las napas.

Contrariamente a las soluciones de gran envergadura contempladas (tal como la transferencia de los recursos de la cuenca amazónica o el proyecto Mica-Tambo a cargo de una consultora francesa, con financiamiento muy importante y puesta en servicio relativamente lejana en el tiempo), las investigaciones emprendidas debían en principio proporcionar al municipio de la capital ecuatoriana una opción de costo razonable que pueda contribuir a resolver a un menor plazo su principal problema, el abastecimiento de agua potable para una población urbana en permanente crecimiento.

En efecto, se debe saber que, al iniciarse los estudios, el déficit de tal abastecimiento para el año 1994 era estimado en 1.300 l/s y que los caudales disponibles entonces, del orden de los 3.000 l/s, de los cuales un tercio provenía de la explotación de las aguas subterráneas de Quito, ya no podían responder a los picos de la demanda. Para hacer frente a esta situación, las reservas potenciales eran muy bajas: por una parte, los recursos en agua superficial localizada en la proximidad ya

habían sido utilizados en su totalidad, y por otra, la explotación desde hacía cuarenta años de la napa acuífera había sido tan intensa que los niveles piezométricos habían disminuido en promedio en 20 a 30 m, estando la baja de producción apenas compensada por el aumento de la profundidad de los antiguos pozos y la puesta en servicio de nuevas perforaciones. Este breve panorama de una situación socialmente explosiva explica el contenido de los dos principales objetivos de los estudios: en primer lugar, mejorar o al menos mantener el nivel de explotación de las aguas subterráneas mediante su recarga artificial, y, en segundo término, elaborar un modelo de manejo que permita definir las diversas estrategias que conduzcan a optimizar su utilización teniendo en cuenta al mismo tiempo los demás aportes.

Se repara en el carácter complejo de las investigaciones de hidrología tridimensional a desarrollarse en este perímetro enteramente modificado por la intervención humana, en donde los criterios habituales que rigen las leyes de los flujos tanto superficiales como subterráneos en medio natural ya no tienen vigencia. Es por ello que el amplio espectro de datos de base a recogerse exigía, de manera imperativa, no solo la instalación de redes hidroclimatológica e hidrogeológica de importancia, sino también la instauración de un sistema de control de las observaciones y de ejecución de mediciones de gran calidad.

1.1. Equipamiento de la cuenca

a) Red hidrométrica: El perímetro estudiado, llamado por comodidad « hoya de Quito », pertenece a dos sistemas hidrográficos (figura 25):

- en el Sur y en la zona central (dos sectores urbanos bien individualizados), el del Machángara y su afluente principal, la quebrada del Batán. Después de la confluencia de esta última, la cuenca abarca un total de 213 Km² en la estación hidrométrica de Dos Puentes;

- el del río Monjas, que drena el Norte de la ciudad y cuya estación S2 de El Colegio controla una superficie de 48,5 Km².

Entre las partes aguas arriba y aguas abajo, se extiende toda la zona urbanizada (superficie estimada en aproximadamente 9.500 ha en 1980). El flujo circula entonces por conductos subterráneos de una red única que evacúa al mismo tiempo las aguas lluvia y las aguas servidas cuya obstrucción sistemática al producirse aguaceros importantes ocasiona serias inundaciones e introduce errores sistemáticos en los valores característicos de las crecidas, los mismos que, según el deseo lógico de los hidrólogos, debían ser « puros ». Es una de las razones por las que se debió proceder a la instalación de cinco estaciones hidrométricas complementarias.

Dos de ellas controlaban a los afluentes principales del Machángara después de su trayecto subterráneo,

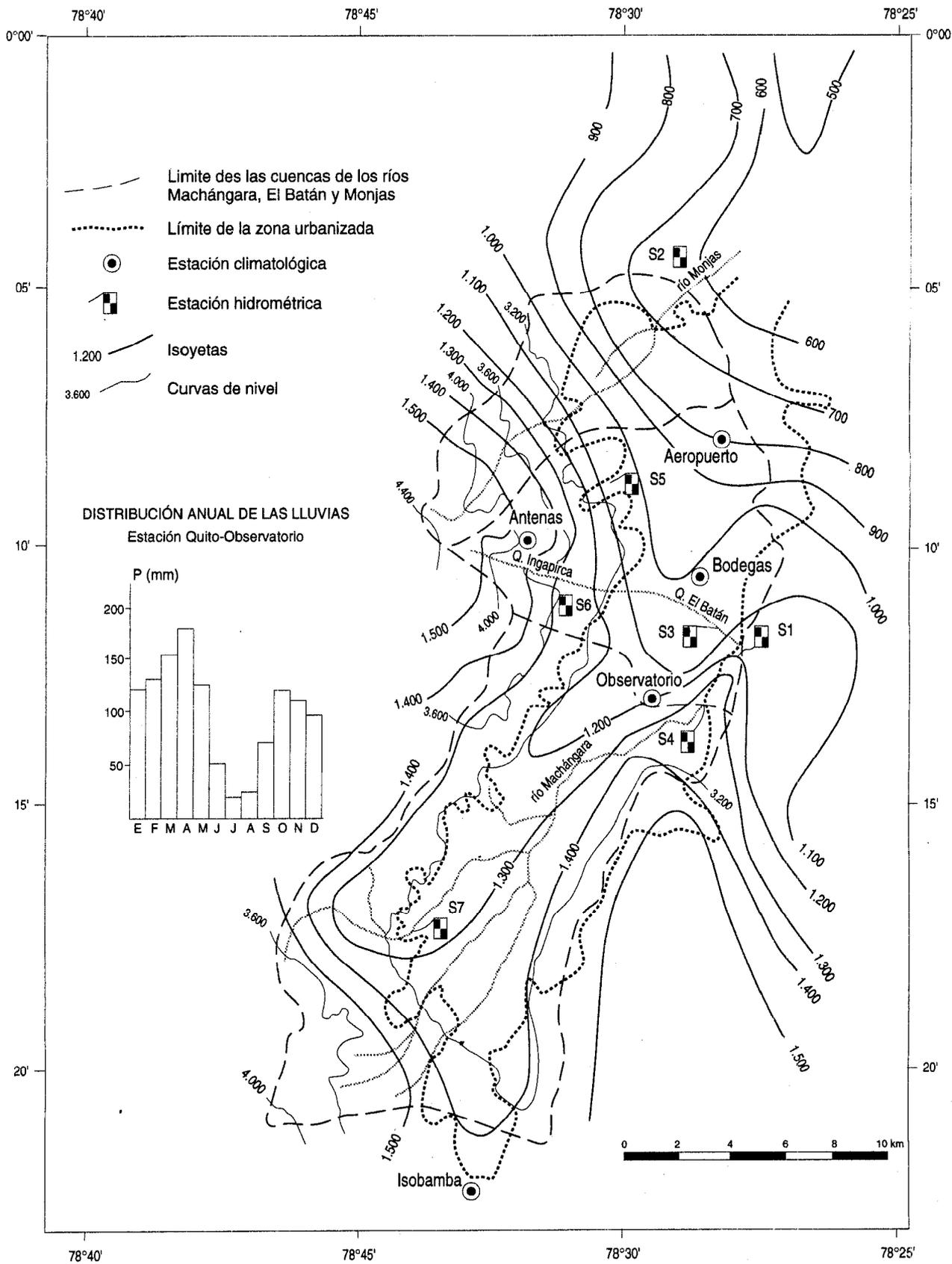


Fig. 25 - Red de observación hidrometeorológica y lluvias anuales en Quito

inmediatamente a la salida de la zona de intensa urbanización:

- estación S3 en El Batán (59,5 Km²);
- estación S4 en el Machángara en Guápulo, antes de su unión con El Batán (151 Km²).

Las otras tres estaciones estaban destinadas al estudio de los flujos que presumiblemente no estaban perturbados y fueron instaladas en las pequeñas cuencas en las faldas de los volcanes. Del Norte hacia el Sur:

- estación S5 de La Pulida Chica (3,5 Km²);
- estación S6 de Rumanaccha (6,7 Km²);
- estación S7 del Salto de la Libertad (16,2 Km²).

Todas estas estaciones estaban por supuesto equipadas con limnógrafos (tipo OTT X de rotación diaria) y con escalas limnimétricas. En cuanto a las secciones de aforo, presentaban diversas características:

- secciones naturales coronadas por puentes de carretera: S1 y S4;
- controles artificiales: canales y paredes de hormigón en V, más pasarela de medición: S2, S5, S6 y S7;
- canal de salida de la red de evacuación de las aguas de la ciudad, más pasarela de medición: S3.

b) Red meteorológica y climatológica: La ciudad de Quito disponía ya de un buen número de estaciones de larga y mediana duración, instaladas por razones específicas o para tratar de aprehender de la mejor manera el fuerte gradiente que, de Norte a Sur, afecta a la mayoría de elementos climáticos, muy especialmente las precipitaciones (figura 25). Aparte de aquella del Aeropuerto, manejada por la Dirección de Aviación Civil, todas las demás están controladas por el INAMHI:

- Quito-Observatorio, la más antigua puesto que entró en funcionamiento en 1890;
- Quito-Aeropuerto, instalada en 1957;
- Isobamba, cuya serie comienza en 1962;
- Cotocollao, instalada en 1963 por religiosos, al Norte de la ciudad, abandonada en 1984;
- Bodegas Ñaquito, en servicio desde 1974.

Salvo la estación Isobamba, situada a 3.060 m.s.n.m., en el borde meridional de la hoya, todas las demás están situadas en el eje de la depresión central a alturas muy cercanas, apenas superiores a los 2.800 m.s.n.m. Para caracterizar el clima de las partes altas de la cuenca y estimar diversos gradientes altitudinales (se instalaron igualmente varios puestos pluviométricos y tanques de evaporación intermedios a fin de precisar mejor las lluvias y la evaporación, factores importantes en el cálculo de los balances), se puso en funcionamiento, el 1º de agosto de 1981, una nueva estación climatológica llamada « de las Antenas », en las pendientes del Pichincha, a 3.900 m.s.n.m.

c) Red de medición de las precipitaciones: Además de los registradores de las 6 estaciones citadas, existían igualmente

12 pluviómetros o pluviógrafos pertenecientes al INERHI o al INAMHI, es decir una red inicial de 18 aparatos.

Para dar cuenta de la extrema heterogeneidad de la pluviometría, tanto a nivel diario (los quiteños dicen que « llueve por barrios ») como a nivel anual, la red definitiva fue incrementada a 47, de los cuales 26 pluviógrafos (17 de ellos funcionando con sifón y 9 con balancín).

d) Red de observación piezométrica: Se señaló ya la importancia de las aguas subterráneas y la antigüedad de su explotación, cuyas normas de utilización y de conservación, dictadas por el Cabildo de la ciudad, se remontan a 1535. Esto implica que, en 1981, había gran número de puntos de agua destinados a diversos usos y el inventario más o menos exhaustivo realizado en el marco de los estudios daba cuenta de 188, de los cuales 49 eran manantiales. Sin embargo, no se procedía sistemáticamente a medición alguna de los niveles de la napa, y las pocas referencias a la profundidad correspondían ya sea a niveles estáticos observados durante la perforación de las antiguas obras, o incluso a niveles dinámicos (o pseudo-estáticos dadas las interferencias entre pozos) medidos durante perforaciones recientes o suspensiones del bombeo para trabajos de mantenimiento. A esta falta de información bastante desconsoladora, había que agregar una situación igual de negativa: la extrema densidad de los pozos de ciertas zonas y la intensidad de la extracción (más de 40 sitios bombeados permanentemente por la EMAP-Q y alrededor de 50 utilizados por particulares con fines industriales).

A fin de estimar de la mejor manera los niveles piezométricos, una vez efectuada la indispensable nivelación topográfica de cada punto de agua, se procedió:

- a la instalación de tubos que permitieran el paso de una sonda eléctrica de medida, a lo largo de los conductos de las bombas de eje vertical de 16 pozos;
- a la colocación, en 4 pozos, de limnógrafos de rotación semanal, 2 fijos y 2 móviles, utilizándose episódicamente estos últimos como piezómetros de observación durante ciertos bombeos de prueba).

Conclusión relativa a los equipamientos: gracias a un esfuerzo financiero consecuente y a un trabajo meritorio, el equipo de la EMAP-Q respetó los planos de instalación y aceptó el control permanente de los trabajos así como las recomendaciones de los hidrólogos del ORSTOM. Se puede entonces considerar que las redes de observaciones y de medidas proporcionaban las garantías teóricas necesarias y suficientes para la obtención de los resultados esperados.

1.2. Operación de las redes

Paralelamente a la instalación o mejoramiento de las redes de observación y medición, los hidrólogos del

ORSTOM, ayudados por los responsables del PRONAREG, del INERHI y de la EMAP-Q, se dedicaron a mejorar la capacitación del personal local de los diversos equipos que se encargarían de la recolección de los datos de base, su clasificación e incluso su interpretación. Se dispuso entonces un entrenamiento intensivo. En el plano de los ejercicios prácticos de campo, el esfuerzo se centró particularmente en la correcta utilización de los aparatos de medición y de los registradores, en la ejecución de las mediciones de caudales en las condiciones a menudo difíciles impuestas por el contexto y en la obtención de los diversos datos hidrogeológicos, tales como la realización de bombeos de prueba. En cuanto al complemento de conocimientos necesario para la buena ejecución de las tareas de oficina, se dictaron varios cursos teóricos (entre otros sobre las estadísticas utilizadas en hidroclimatología y sobre hidráulica subterránea) y se procedió a la transferencia de las técnicas ORSTOM utilizadas tradicionalmente para la clasificación y el procesamiento de la información; este último aspecto fue completado más tarde mediante la elaboración de programas adaptados a las calculadoras entonces disponibles, tales como los relativos a la depuración de los aflujos, las leyes de distribución o la repartición espacial de las precipitaciones.

Sumándose a la amplitud de la capacitación dispensada a los diversos participantes, el permanente control asumido por el equipo del ORSTOM a todo lo largo del estudio permite afirmar la buena calidad de los datos elaborados con base en la información recogida en el campo.

¿Cuál es actualmente la situación en cuanto a la calidad de los datos de base recogidos por el personal encargado de la operación de las diversas redes? Sin que, por supuesto, sea posible generalizar al extremo, la calidad de la información en bruto generada por el estudio estuvo muy condicionada por la existencia de factores, algunos de los cuales escapaban totalmente al control del equipo científico.

Se debe ante todo señalar la importancia de ciertos aspectos del contexto físico-climático:

1. Indiscutiblemente, la urbanización puede considerarse como un factor primordial de complejidad. Todos conocen el considerable aumento de los escurrimientos superficiales con la paralela disminución de los tiempos de respuesta de la cuenca y de subida de las crecidas, como consecuencia de la impermeabilización de parte de la zona de abastecimiento. En el presente caso, se agrega a él el efecto inducido por ciertas características de las tuberías subterráneas: mezcla de las aguas servidas y las aguas de origen pluvial, insuficiente capacidad de evacuación lo que coloca el sistema en carga hidráulica. Además de la inundación de numerosos sectores urbanos, las consecuencias hidrológicas son las siguientes:

- sesgo, cuya importancia es difícil de determinar, de las características de las fuertes crecidas, en particular

de los caudales pico y de los tiempos de subida. ¿Cómo, en esas condiciones, trazar un hidrograma estándar y relacionar los escurrimientos superficiales con las alturas y la intensidad pluviométricas? ¿Cómo apreciar la influencia de las zonas urbanizadas?

- flujos de salida bajo la forma de un verdadero chorro con velocidades superiores a 5 m/s, de olor nauseabundo y con transporte sólido importante. Esto implicaba, por una parte, la imposibilidad de aplicar las fórmulas hidráulicas comunes dada la forma del canal de salida, y por otra, un riesgo sanitario inherente al inevitable contacto con las aguas contaminadas y a la inhalación de los efluvios químicos durante las tentativas de aforo. Así, se comprende por qué se debieron estimar los caudales de aguas altas en las estaciones hidrométricas S3 y S4 a partir de las velocidades de superficie medidas con flotadores naturales, con el elevado riesgo de error que presenta esa evaluación.

2. Otro factor, cuyo papel es esencial en la escorrentía, es el pronunciado relieve de la parte aguas arriba (estaciones S5 y S6 de las vertientes del Pichincha y, en un grado menor, la estación S7 del Atacazo) y del tramo situado inmediatamente aguas abajo de los colectores de la ciudad (en S2, después de S3, S4 y antes de S1). A pesar del cuidado con que se eligió la localización de las estaciones de medidas hidrológicas, las velocidades y los caudales sólidos son muy elevados. Es así como la estación S5 de La Pulida Chica debió abandonarse dada la importancia de la sedimentación (que alcanzó 1,5 m de espesor en el canal de medición de la estación durante la primera crecida de importancia) que volvía inútil cualquier esfuerzo de registro de los escurrimientos (colmataje del pozo del limnógrafo) o de medición de los caudales (rápidas variaciones de la sección mojada y de la cota de referencia). Aguas abajo, se observó frecuentemente el desplazamiento de bloques que podían alcanzar varios quintales, lo que explica la gran dificultad de realizar la calibración de las estaciones hidrométricas S1 y S4 sin exponer los costosos equipos a daños mayores (escandallo de 50 kg arrastrado en toda dirección, hélice torcida ...).

3. Finalmente, la heterogeneidad espacial de las alturas de lluvia y de las intensidades de los aguaceros debe considerarse como un factor que contribuyó en gran medida a dificultar el establecimiento de las relaciones lluvia-escorrentía. En efecto, no cabe duda de que, pese a su cobertura juzgada inicialmente satisfactoria, la red de observación no daba cuenta de la realidad de las precipitaciones, fenómeno que puede atribuirse a la vez a una densidad insuficiente y al mal funcionamiento (y en ocasiones al robo sistemático) de parte de los registradores. Prueba de ello es una crecida particularmente devastadora de la quebrada La Raya, que pasó desapercibida en el plano pluviométrico. Suponiendo que se hubieran

podido estimar correctamente las láminas escurridas y los caudales pico, se ve que no era posible atribuir sino una confianza limitada a los parámetros pluviométricos a tenerse en cuenta para el estudio de las crecidas y de las relaciones entre lluvias y escurrimiento superficial.

Sin embargo, las condiciones físico-climáticas enumeradas no son los únicos factores explicativos de la calidad de las observaciones y mediciones efectuadas en las diferentes redes. En el presente caso, se deben tomar en consideración también factores de orden humano y señalar que los funcionarios municipales (que ya ocupaban esos puestos) a quienes la EMAP-Q encargó la parte operativa de las redes no pudieron cumplir a cabalidad con sus tareas; en efecto, se trataba a menudo de realizar, fuera de los horarios habituales (los aguaceros tienen lugar generalmente a finales de la tarde o durante la noche), un trabajo de campo cuya dificultad ya se señaló. Fueron entonces los hidrólogos del ORSTOM, en ocasiones ayudados por los responsables de la EMAP-Q y del PRONAREG, quienes debieron asumir la realización de parte de las mediciones durante la estación lluviosa; dado su limitado número y los demás estudios en curso, no pudieron dedicarse a esa tarea sino de manera esporádica e imperfecta.

Conclusión relativa a la operación de las redes:

El gran esfuerzo que representa la constitución de redes amplias, lo mejor adaptadas posible al difícil contexto físico-climático, no tuvo desafortunadamente su equivalente en lo que respecta a la operación que fue deficiente durante eventos hidro-pluviométricos importantes.

1.3. Efecto de la urbanización y relación entre las lluvias y el escurrimiento superficial

Ya se mencionó que los estudios realizados en la hoya de Quito recibieron el apoyo del Centro Informático de la Escuela Superior de Minas de París, con miras a elaborar un modelo matemático acoplado destinado al manejo de los recursos hídricos. Basadas en un modelo tridimensional probado (MODCOU) que garantizaba la consideración de las transferencias y los intercambios entre aguas superficiales y subterráneas, las investigaciones dieron lugar a la redacción de un informe en idioma francés, el mismo que comprende, entre otras cosas:

- la presentación del conjunto de los datos anteriores a 1981 y de los recogidos en 1982 y 1983;
- la exposición de los resultados someros obtenidos utilizando todas las observaciones e informaciones derivadas de la explotación del modelo.

La experiencia y el renombre científico de los autores certifica que las conclusiones a las que llegan (al igual que las opiniones sin concesión alguna que expresan) son autoridad. Ello justifica el hecho de haber extraído de su obra largos extractos relacionados con el

tema del presente artículo, que son reproducidos a continuación (traducción libre).

« Es útil recordar que las instalaciones de las estaciones hidrométricas de la región de Quito fueron implantadas durante el segundo semestre de 1981 por el PRONAREG y la EMAP-Q (bajo el control del ORSTOM) pero que, debido a dificultades de retiro de aduana, los limnigrafos no pudieron colocarse sino durante el segundo trimestre del año 1982. Aunque los niveles eran levantados tres veces al día por los observadores de las escalas limnimétricas y se indicaban la cota máxima alcanzada por cada crecida así como la hora correspondiente, no fue posible reconstruir, ni siquiera aproximadamente, la variación de los niveles de agua a lo largo del tiempo (año 1981-1982). En efecto, tales niveles son extremadamente variables en el tiempo y solamente un registro continuo de los mismos permitiría obtener informaciones precisas. »

« Numerosos problemas prácticos quedan por resolverse y por repensarse en Quito dadas las dificultades técnicas locales. La estación de Pulida Chica fue completamente obstruida por el importante transporte sólido producto de una de las primeras crecidas de fines de 1982. El limnógrafo instalado aguas arriba de la estación Dos Puentes fue dañado casi por completo por una violenta crecida. Se lo debió instalar 200 m aguas abajo en donde fue averiado por la caída de bloques de roca descargados por camiones desde la cima de la colina.

Por otro lado, los ajustes y las calibraciones no pudieron efectuarse en buenas condiciones dado el difícil acceso a los aparatos, la falta de fondos y los medios inadecuados, pues los datos recogidos no están exentos de anomalías. Anotemos que las medidas de caudales realizadas en un curso de agua que recibe directamente las aguas servidas y las alcantarillas de una ciudad de más de 800.000 habitantes, sin depuración alguna en una planta de tratamiento, demandan a los operadores mucha buena voluntad, dados los riesgos sanitarios y los peligros que representa la potencia del flujo de agua de esos verdaderos torreses. Al parecer, en Quito no se percibieron en su justa magnitud las dificultades de realización de las mediciones.

Constatamos actualmente que numerosos registros limnográficos son irrecuperables, que algunas calibraciones aún no son satisfactorias y que los caudales diarios obtenidos contienen gran cantidad de anomalías. »

« ... presentar dos casos tipo de respuestas observadas en las cuencas vertientes de Quito ante aguaceros moderados y mostrar las dificultades de las medidas completas y simultáneas de los eventos hidropuviométricos.

Durante el viaje de trabajo de junio de 1984, se pidieron las informaciones completas relativas a esos dos eventos, las mismas que se obtuvieron al final de dicho viaje. » Se presenta como ejemplo únicamente el evento más característico.

- El aguacero del 30 de agosto de 1983 fue observado:
- en el pluviógrafo PG 33: lluvia total de 40,6 mm, intensidad máxima de 53,5 mm/h en 11 minutos;
- en el pluviógrafo PG 15: lluvia total de 98,0 mm, intensidad máxima de 24 mm/h en 5 minutos;
- en el pluviógrafo PG 23: lluvia total de 29,6 mm, intensidad máxima de 60 mm/h en 20 minutos;
- el pluviógrafo PG 28 no funcionó;
- en el pluviógrafo PG 7: lluvia total de 20 mm, intensidad máxima de 31,2 mm/h en 25 minutos.

Las informaciones entregadas, aunque incompletas, permiten apreciar la variabilidad de las intensidades de las precipitaciones en el tiempo y el espacio, aunque sin precisarlas.

Los cuatro hietogramas trazados en la figura 26 muestran que el aguacero del 30 de agosto duró, según el lugar, entre 1 hora y 1 hora 30, siendo su período útil de aproximadamente 30 minutos con una intensidad promedio del orden de 40 mm/h (48-40-29).

Los hidrogramas de crecida en las estaciones El Batán, Guápulo y Dos Puentes, aunque presentan errores evidentes que indicaremos posteriormente, aportan valiosas indicaciones que figuran en el siguiente cuadro:

	El Batán	Guápulo	Dos Puentes
volumen escurrido (m ³)	370.500	446.400	1.281.000
caudal máximo (m ³ /s)	75	80	242
superficie urbana año 1976 (Km ²)	16,5	21,7	38,1
lámina de escurrimiento superficial en zona urbanizada (mm)	22,5	20,6	33,6
caudal específico, zona urbanizada (m ³ /s/Km ²)	6,35	4,54	3,69
superficie de la cuenca (Km ²)	56,21	51,0	208,2

La intensidad promedio de la lluvia de 40 mm/h en 30 minutos da un caudal específico de lluvia del orden de 11,1 m³/s/Km². Este último valor debe ser comparado con el caudal específico de crecida en zona urbanizada para poner en evidencia no solo el interés del conocimiento del grado de impermeabilización de las zonas urbanizadas sino la necesidad de conocer perfectamente la variación de las fuertes intensidades de las precipitaciones en el espacio mediante pluviógrafos registradores.

Subsisten numerosas incertidumbres a nivel de la superficie de las cuencas vertientes urbanizadas en la época de la fuerte precipitación del 30 de agosto de 1983 y a nivel de las intensidades de la misma en el espacio, para apreciar el coeficiente de escurrimiento superficial debido a la impermeabilización.

Desde el punto de vista crítico de los resultados de las medidas hidrológicas, los hidrogramas presentados comportan varias anomalías.

Dado que la cuenca vertiente intermedia para pa-

sar de la estación de El Batán a la de Guápulo apenas tiene una superficie de 1 Km², el hidrograma en la estación de Dos Puentes debería, con un margen de algunos por cientos, ser comparable al obtenido por adición directa de los hidrogramas de crecida de El Batán y Guápulo. De ello se deriva que:

- a) el hidrograma de El Batán está adelantado aproximadamente en 2 horas ± 20 minutos;
- b) admitiendo un sincronismo entre los dos picos de crecida en El Batán y en Guápulo, el caudal máximo en Dos Puentes no debería superar la suma del caudal máximo en El Batán (75 m³/s) y del caudal en Guápulo (80 m³/s), es decir 155 m³/s. Ahora bien, según las medidas en Dos Puentes, alcanzaría 240 m³/s.

El error cometido está comprendido entre el 35 y el 55 %.

En conclusión, se puede decir que las observaciones y las medidas efectuadas en la hoya de Quito permitieron adquirir una voluminosa y valiosa masa de información relativa a los elementos climáticos, al régimen de precipitaciones y a las láminas escurridas. Contribuyeron también a mejorar el conocimiento de la geometría de los acuíferos, de sus características hidrodinámicas y de sus reservas, incluso si la falta de fondos no permitió proceder a las pruebas de recarga artificial que constituían el objetivo principal del proyecto.

No sucede desgraciadamente lo mismo en lo que respecta a la distribución espacial de las intensidades y de las alturas diarias de lluvia o en lo relativo a la escurrimiento a intervalos cortos de tiempo, parámetros cuyo conocimiento sigue siendo muy impreciso, y en todo caso insuficiente como para permitir una evaluación ni siquiera aproximada de la influencia de la urbanización en el escurrimiento superficial o como para proceder al establecimiento de las relaciones lluvias-escurrimiento durante las fuertes crecidas. En ese campo, no se puede sino constatar la modestia del producto científico final.

2. CUENCA VERTIENTE REPRESENTATIVA DEL RÍO BANCHAL

Situada entre 01° 34' 20" y 01° 46' 55" de latitud Sur y entre 80° 28' 28" y 80° 35' 40" de longitud Oeste, la cuenca vertiente del río Banchal es representativa del 40 % de Manabí, vasta provincia litoral cuyo elevado potencial agro-pastoral está sometido a las incertidumbres del clima, en particular a las variaciones de un régimen pluviométrico caracterizado por un fuerte gradiente negativo de Este a Oeste y una gran irregularidad anual y estacional. Contrastando con la franja costera en donde el riego es de rigor, la región central, en donde está situada la cuenca, tienen una producción agraria muy diversificada (algodón, cacao, frutas y verduras de pretemporada, pastizales para un importante ganado bovino) durante los años normalmente regados por la

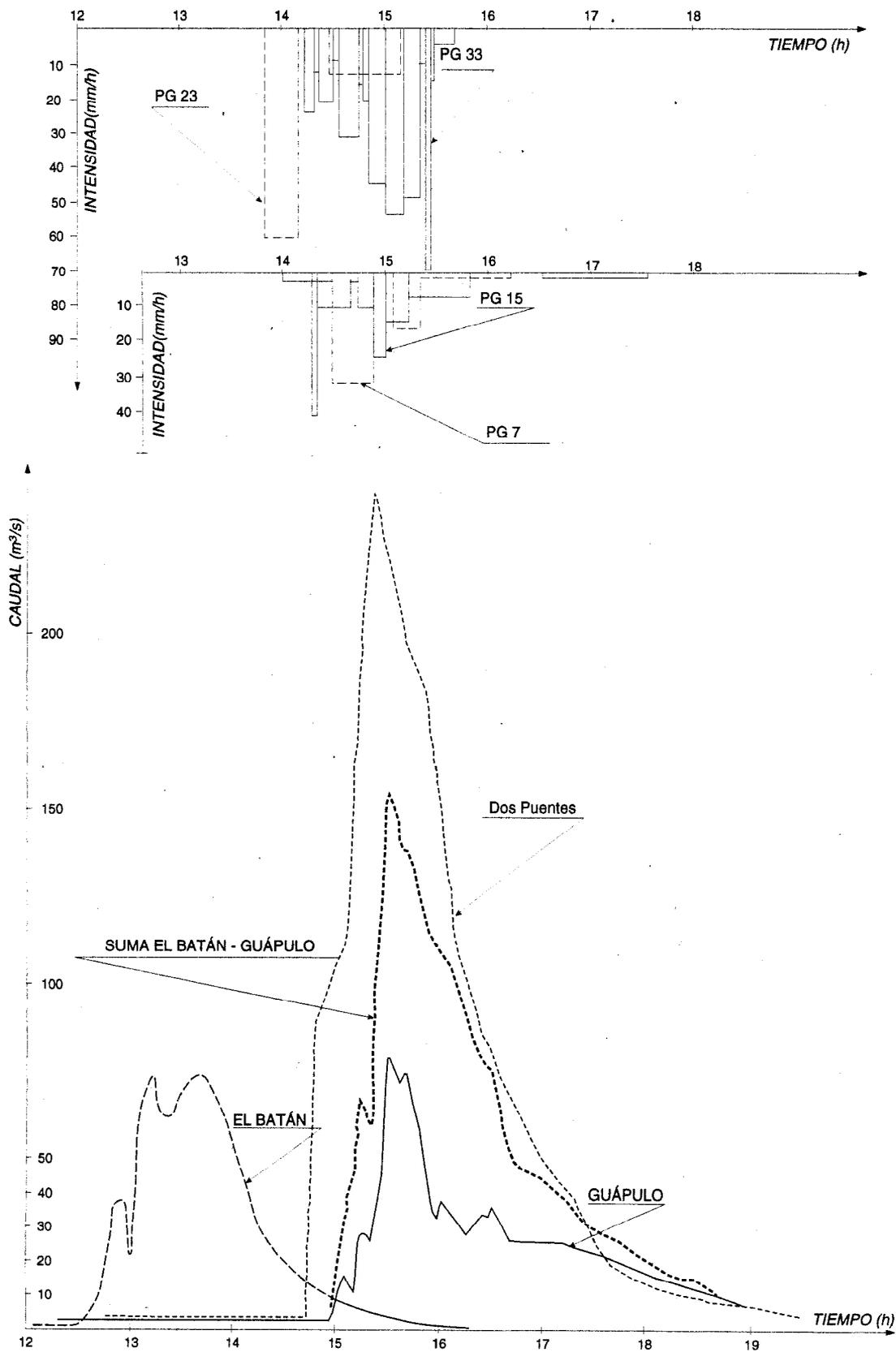


Fig. 26 - Aguaceros y crecidas del 30 de agosto de 1983

lluvia (800 a 1.000 mm repartidos en 5 meses), lo que justifica plenamente que se hable de ella como la « provincia verde ». Sin embargo, tal situación no es la norma y toda la región se ve afectada episódicamente ya sea por lluvias catastróficas consecutivas a los fenómenos de El Niño, o por sequías aún más calamitosas.

Se comprende entonces toda la importancia económica que reviste una estimación objetiva de los recursos hídricos disponibles y un buen conocimiento de los fenómenos pluviométricos e hidrológicos extremos, tanto para los responsables regionales del sector silvo-agropastoral como para aquellos responsables del ordenamiento y de las infraestructuras.

Los estudios fueron desarrollados en colaboración con el PRONAREG y con un organismo regional de desarrollo, el CRM. Comenzaron en febrero de 1980 con la instalación de la red de observación pluviométrica pero las estaciones hidrométricas no pudieron ser colocadas sino en noviembre de 1982, afortunadamente antes de que se desarrollara el Niño de 1982-1983 cuya elevada recurrencia se conoce.

2.1. Equipamiento de la cuenca (figura 27)

a) Red hidrométrica: situada a dos horas por carretera de Portoviejo, centro operacional del CRM, y un kilómetro aguas arriba del puente del eje Jipijapa-Cascol-Guayaquil, la cuenca vertiente escogida tiene una superficie de 155,5 Km² y sus alturas extremas son 760 m.s.n.m. y 120 m.s.n.m. Estaba controlada ya por una estación hidrométrica de la red nacional del INAMHI, río Banchal d.j. Guabas, cuyo funcionamiento había sido poco satisfactorio hasta entonces puesto que no se disponía de observaciones confiables ni de aforos sino para las aguas bajas (caudal mayor medido de 1976 a 1980: 4,76 m³/s). Para necesidades del estudio, se conservaron los 5 m de la escala limnimétrica existente pero se reemplazó el vetusto limnógrafo a fines de 1982 por un limnógrafo con flotador de rotación semanal (estación H2). En previsión de flujos importantes, se construyó un dique de tierra en la orilla izquierda, a nivel de la torre del cable teleférico que sostiene a la vagoneta móvil destinada a la realización de aforos de aguas altas. Por otro lado, para estimar mejor los caudales en período de estiaje, se instaló, un centenar de metros aguas abajo, un vertedero triangular de pared delgada.

Para precisar ciertos aspectos de los parámetros del balance hídrico y de la escorrentía, fue necesario equipar una subcuenca, la de la quebrada Las Guabas, cuya estación H3 (río Guabas a.j. Banchal) drenaba una superficie de 7,75 Km² comprendida entre 440 y 190 m.s.n.m. Allí se instaló un vertedero de hormigón (6,5 m de largo), equipado en su eje con un vertedero tipo Venturi (alrededor de 3.900 l/s de caudal máximo) que fue prolongado lateralmente en V (pendientes del 10

por ciento) hasta los muros verticales que limitaban la obra. Una pasarela de aforo, una escala limnimétrica 0-3 m y un limnógrafo diario completaban la estación, cuya instalación finalizó el 18 de diciembre de 1982. Desgraciadamente, una crecida extraordinaria, cuyo caudal — estimado a partir de la fórmula de Manning después de la nivelación de las huellas de crecida — debía ser del orden de 42 m³/s (es decir más de 5 m³/s/Km²), la destruyó por completo el 11 de marzo de 1983.

b) Red climatológica: En marzo de 1980, se instaló una estación climatológica cerca de la salida de Las Guabas, a 280 m.s.n.m. El equipo correspondiente comprendía: un abrigo (termómetros, psicrómetro, termohigrógrafo y evaporímetro Piche), tanque de evaporación clase A con anemómetro totalizador, veleta, heliógrafo Campbell, pluviómetro y pluviógrafo de sifón.

c) Red pluviométrica: Además de los aparatos de la estación climatológica (PV 1 y PG 2), se procedió a la instalación de 13 pluviómetros y 9 pluviógrafos de balance, 8 de rotación diaria y uno de rotación semanal (PG 22). La mayoría de pluviómetros fueron instalados en marzo-abril de 1980; posteriormente la red fue ampliada parcialmente en agosto del mismo año para ser completada finalmente con la instalación de los pluviógrafos en 1982.

d) Red piezométrica: Tres pozos, inicialmente previstos para garantizar el control de las variaciones del nivel piezométrico de la napa, no fueron perforados por razones financieras.

Conclusiones respecto al equipamiento de las redes: Hay que felicitar por el hecho de que el CRM, aunque debió afrontar serias restricciones presupuestarias, tomó conciencia de la verdadera significación de los estudios emprendidos y atribuyó al programa el financiamiento mínimo necesario. Pese a ciertas deficiencias, se puede estimar que, a fines del año 1982, la cuenca vertiente estaba provista del equipamiento suficiente como para llevar a buen término los estudios programados.

2.2. Operación de la red

Todo el período comprendido entre marzo de 1980 y diciembre de 1982, incluso si puede parecer largo, no fue en realidad sino una época de entrenamiento para los observadores en la cuenca y para el equipo de Portoviejo encargado de los controles periódicos y de las medidas de caudal. La verdad obliga a decir que se debió ante todo vencer una cierta dejadez, tradición heredada de culturas milenarias y por cierto totalmente adaptada a las condiciones climáticas particularmente difíciles de la región. Pero también se debe agregar que,

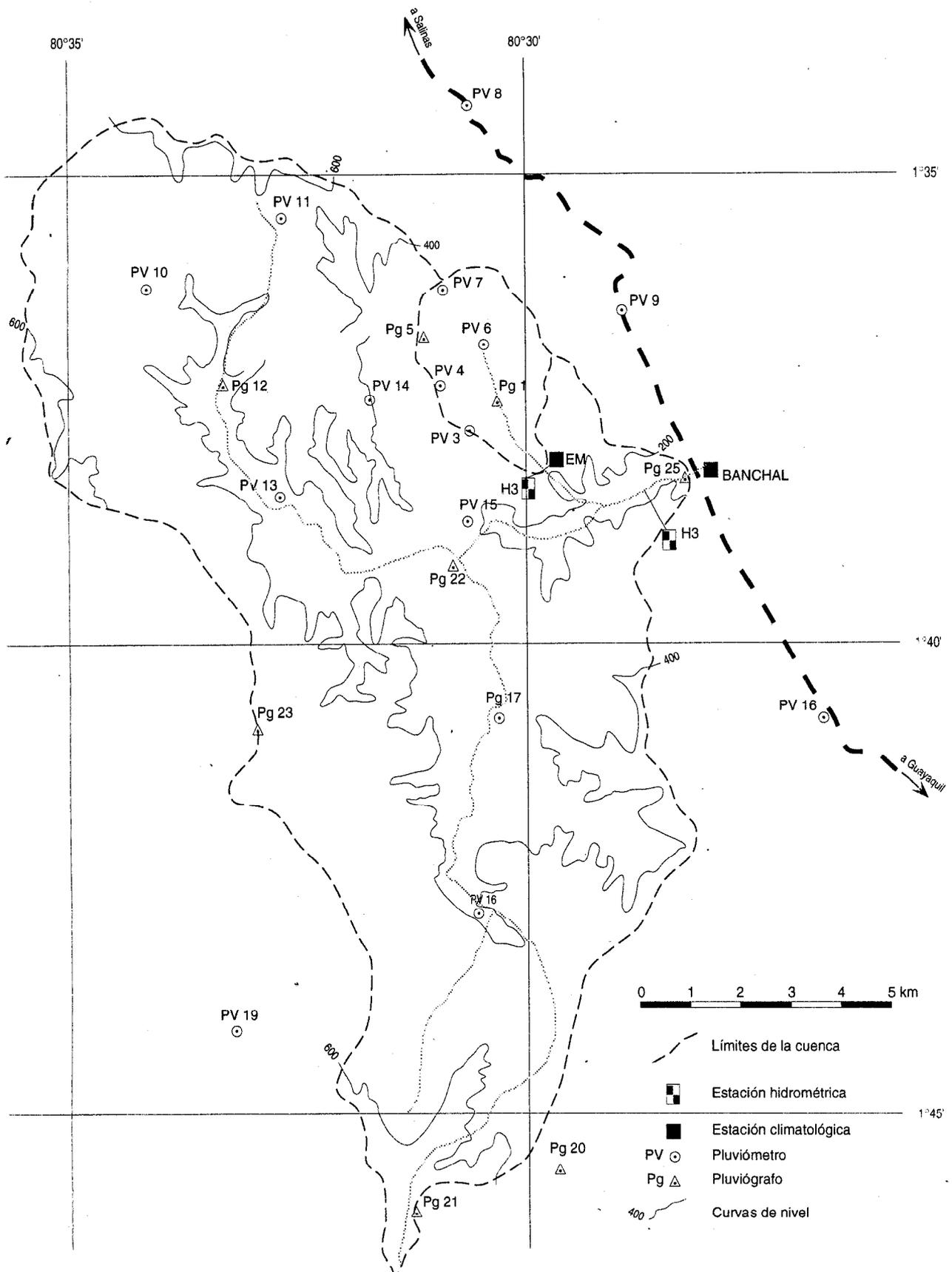


Fig. 27 - Cuenca vertiente representativa del río Banchal. Mapa de base y equipamiento

aprovechando el tiempo dejado por la llegada escalonada de los equipos, un entrenamiento técnico y teórico intensivo suscitó en todos los participantes una notable toma de conciencia, creándose así condiciones favorables para la ejecución de los trabajos.

Señalemos igualmente que ese intermedio no fue totalmente estéril en el plano de la recolección de información y que se recogieron numerosos datos durante más de dos años, incluso si a menudo están incompletos o son poco precisos por las razones invocadas anteriormente. Ellos permitieron apreciar el orden de magnitud alcanzado por los parámetros del balance hídrico en 1981 y 1982 (isoyetas de la figura 28), años cercanos a la normal, y constituyen por lo tanto valiosos elementos de referencia para establecer comparaciones con los años subsiguientes o con las estaciones de larga duración situadas a proximidad.

Mediocre al inicio, la calidad de las medidas obtenidas en la red de observación de las precipitaciones mejoró en gran medida cuando algunos lectores que no satisfacían fueron reemplazados y algunos pluviómetros fueron sustituidos por pluviógrafos. Los valores observados son entonces en general de una confiabilidad razonable y se prestan a los tratamientos estadísticos habituales.

Para llevar a buen término las medidas de hidrografía, se construyó un abrigo de madera cerca de la estación climatológica. A pesar de las condiciones bastante rústicas (el respeto a la tradición de los hidrólogos del ORSTOM así lo imponía), se instauró una vigilancia de casi todos los instantes durante la estación lluviosa excepcional de 1983 (isoyetas de la figura 29). Es así como se efectuaron numerosas medidas de caudal, 65 en la estación de la cuenca principal (6 de ellas superiores a 20 m³/s) y 28 en la de Las Guabas, permitiendo establecer curvas de calibración de excelente precisión en aguas bajas y medianas. En cuanto a la calibración en aguas altas, se puede considerar que es aceptable, pues un levantamiento topográfico preciso de las huellas de crecida permitió estimar, con un margen razonable de error, el caudal pico de las dos crecidas fuertes observadas el 28 de febrero y el 11 de marzo de 1983:

- río Las Guabas a.j. Banchal:
H = 1,90 m y Q = 42 m³/s el 11.03.83;

- río Banchal d.j. Las Guabas:
H = 2,14 m y Q = 110 m³/s el 28.02.83
H = 3,40 m y Q = 320 m³/s el 11.03.83

Las observaciones en la red limnigráfica son buenas en su conjunto aunque hay que lamentar:

- por una parte, no haber podido instalar nuevamente la estación de Las Guabas después de su destrucción; solo se dispone de un registro de un período corto, por lo tanto poco representativo y en todo caso inutilizable para el estudio de las crecidas;
- por otra, que el abandono prematuro de la vigilancia de la cuenca, a fines de mayo de 1983, haya tenido repercusiones en el funcionamiento del limnógrafo del río Banchal y se haya traducido en una inexistencia de datos hidrométricos en junio y julio.

2.3. Aguas altas y relaciones entre las lluvias y la escorrentía

Pese a su consistencia, se debe insistir en el carácter estimativo de los resultados presentados cuando se trata de una cuenca vertiente que, como la del Banchal, tiene un tamaño importante y un relieve acentuado. Gracias a un estudio de la distribución espacial de las lluvias, se pudo constatar en efecto que la repartición espacial de los aguaceros es de las más heterogéneas. Para un mismo evento, las lluvias pueden tener formas, duraciones e intensidades muy variables, lo que por cierto se refleja en los hidrogramas resultantes: en su gran mayoría son complejos y, cuando no lo son, casi siempre se debe a que la crecida es producto de precipitaciones localizadas.

A continuación se presenta un cuadro que resume las principales características de los hidrogramas simples cuyo pico de crecida máxima supera los 40 m³/s. Los parámetros correspondientes son bien conocidos y no requieren una explicación particular, salvo tal vez en lo que respecta a IH, que no es otra cosa que un índice de humedad tradicional calculado en secuencia a partir de una ecuación exponencial que tiene en cuenta a la vez el total acumulado de las precipitaciones y su anterioridad.

Para permitir un mejor análisis de las relaciones entre lluvias y escurrimientos superficiales, fue necesario utilizar crecidas complejas después de separar los escurrimientos

Fecha	Pm (mm)	IH	Le (mm)	Ke (%)	Lr (mm)	Kr (%)	Ts (h-min)	Tb (h-min)	Qo (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	Qr (m ³ /s)	Kf
03/01/83	22,7	38,8	2,7	12	2,06	9,1	1h15	5h50	2,2	41,9	39	2,5
27/01/83	15,7	30,7	2,2	14	1,77	11,2	0h15	4h50	3	66	63	3,9
16/02/83	12,2	38,1	3	24	2,47	20,3	0h45	3h00	0,7	86,4	83	2,3
11/03/83	43,2	56,1	13	30	12,6	29,1	1h10	3h40	2,3	324	319	1,9
23/03/83	29,7	59,3	5,9	20	4,97	16,7	1h55	4h00	5,8	135	125	2,3

Cuadro 14 - Río Banchal d.j. Guabas (156 km²) - Características de algunas crecidas simples

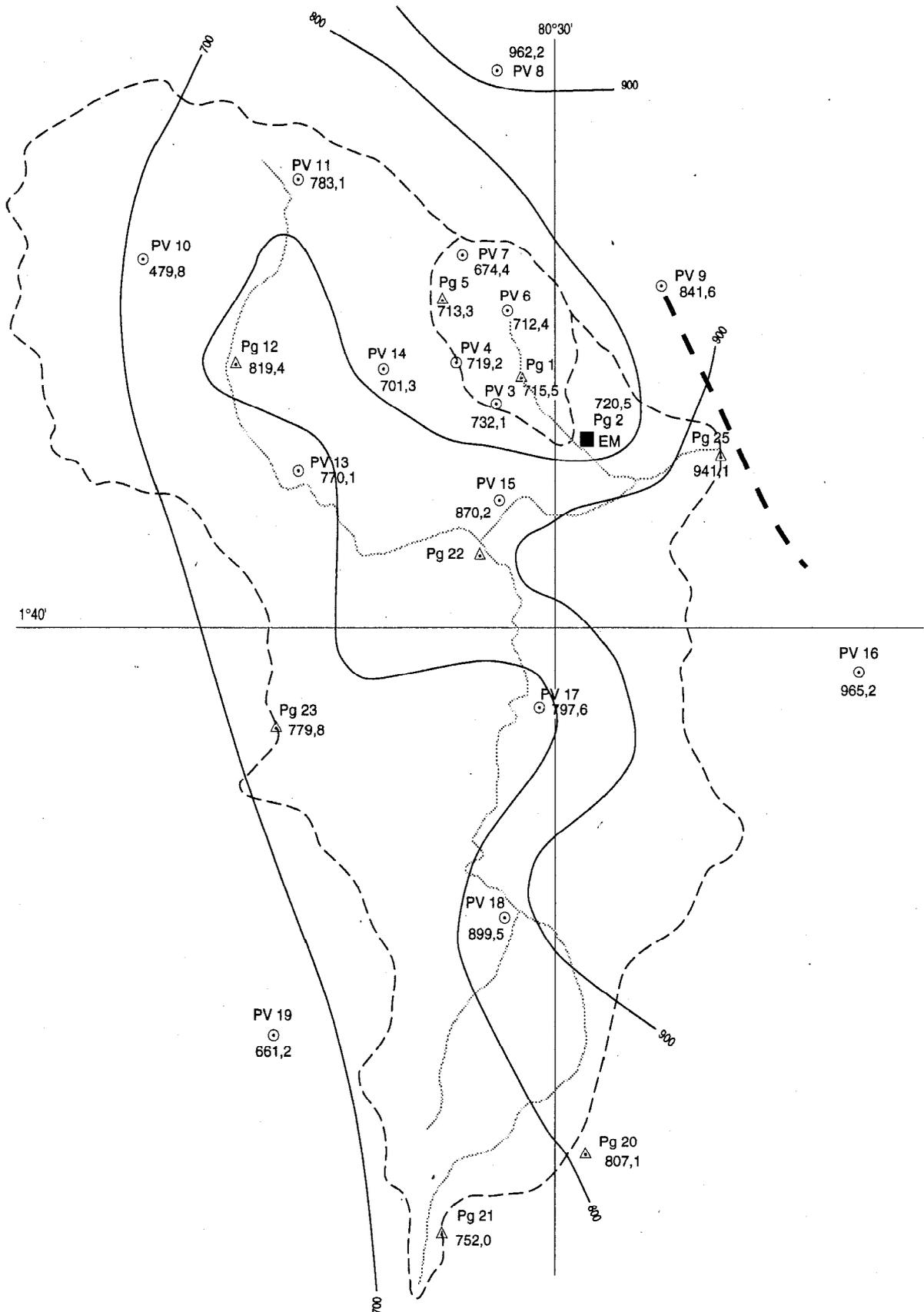


Fig. 28 - Cuenca vertiente representativa del río Banchal - Isoyetas 1982

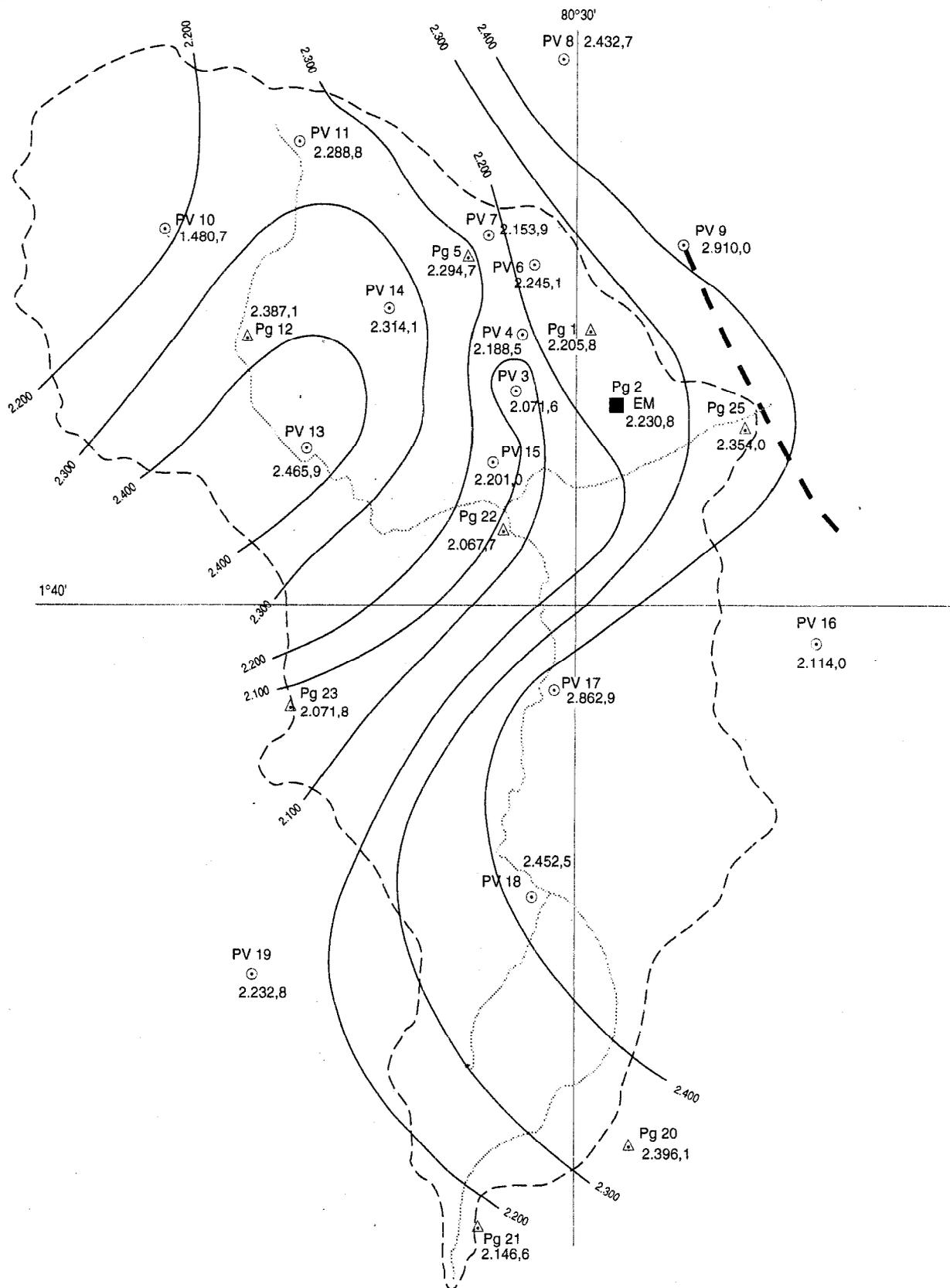


Fig. 29 - Cuenca vertiente del río Banchal - Isoyetas 1983

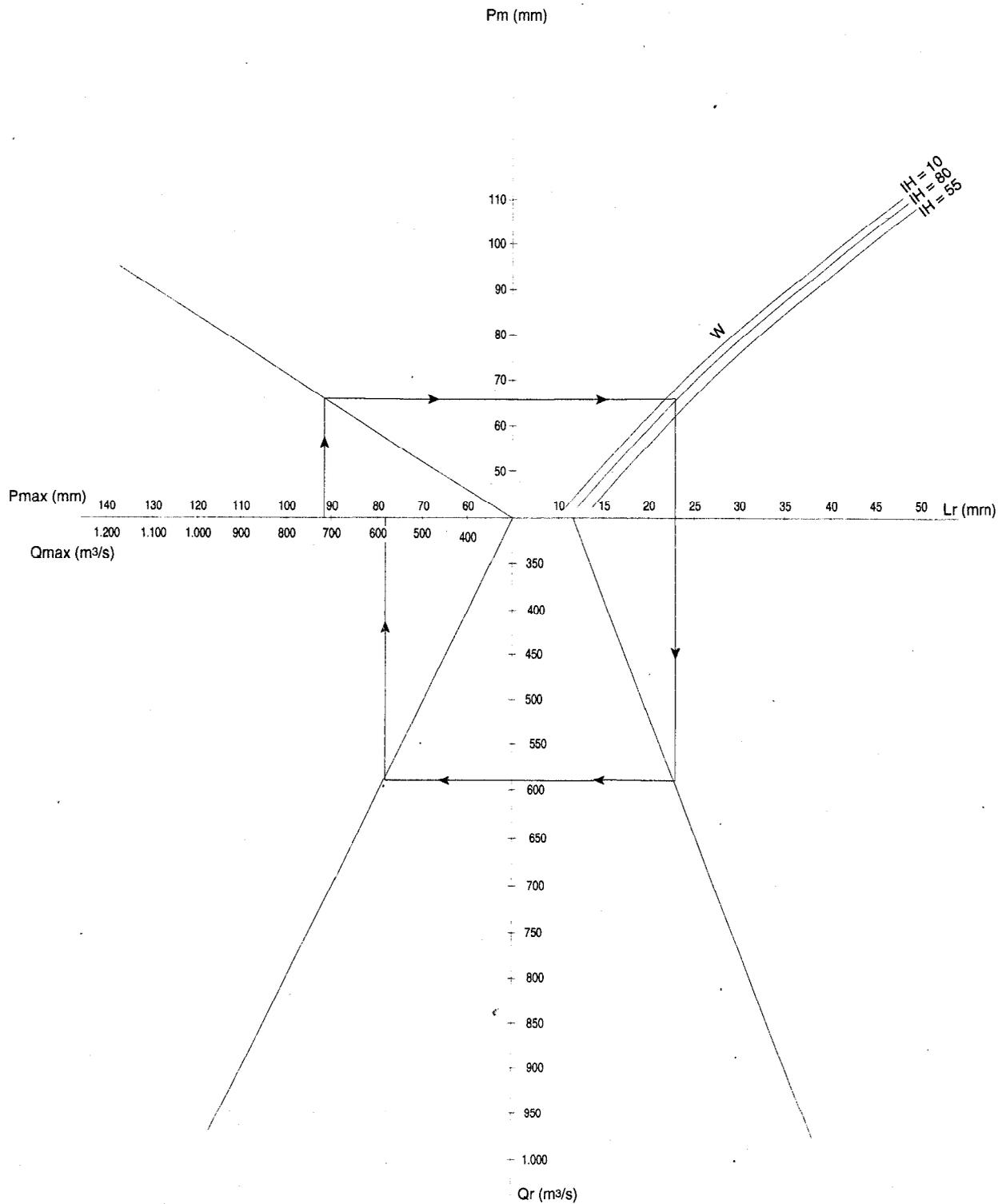


Fig. 30 - Cuenca representativa del río Banchal
Estudio de las crecidas y de las relaciones lluvia-escorrentía

e individualizar las precipitaciones correspondientes. Los valores así obtenidos, extremadamente coherentes, permitieron ampliar sustancialmente la muestra disponible y conferirle la representatividad necesaria y suficiente para el establecimiento, con una precisión aceptable, de las relaciones $P_{max}/P_m/L_r$ (ponderado por IH)/ Q_r/Q_{max} resumidos gráficamente en el ábaco de vocación práctica de la figura 30.

3. CUENCA VERTIENTE REPRESENTATIVA DEL RÍO TINTO

Representativa de toda la faja litoral comprendida entre el cabo San Lorenzo y la frontera peruana, la cuenca del río Tinto está situada en el corazón de la península de Santa Elena, entre 2° 22' y 2° 28' de latitud Sur y 80° 24' y 80° 31' de longitud Oeste. Con una pluviosidad anual que no supera los 500 mm y probablemente inferior a 100 mm en ciertos lugares, es posiblemente la región más árida del Ecuador. Hay que agregar que esas alturas de lluvia anuales, ya bastante bajas, sufren una irregularidad interanual y estacional excepcional y que son afectadas por una preocupante tendencia a la baja desde hace varios decenios (ver análisis abordado en el artículo V).

Se comprende toda la importancia de la elección de esa cuenca, cuando se sabe que los suelos de la península de Santa Elena son ricos y que el único obstáculo para un desarrollo agrícola sostenido es la falta de agua. Hecho notable, la población rural de la zona se incrementa o disminuye al ritmo de los eventos de El Niño: aumenta sistemáticamente después de los episodios lluviosos, cuando los reservorios naturales o artificiales al llenarse permiten una actividad agrícola temporal, pero fructuosa. Es así como centenares de familias, que vinieron a instalarse en 1983 ó 1984 a la salida y en la periferia del embalse El Azúcar, abandonaron ese sitio solamente cinco años más tarde, cuando este estaba totalmente seco; como último recurso, habían incluso cultivado los perímetros situados aguas arriba de la represa, allí donde los sedimentos estaban aún húmedos y subsistía una delgada napa freática.

Los estudios fueron realizados con el PRONAREG, contraparte habitual, y con el INERHI que es el instituto encargado de manejar el conjunto de los recursos hídricos a nivel nacional. Sin embargo, como dicho instituto depende del Ministerio de Agricultura y Ganadería, el sector que privilegia es el del agua destinada a la agricultura. La importancia de su presupuesto, muy superior a la partida global de los fondos asignados al MAG, se explica por el hecho de que toma a su cargo la totalidad de estudios de factibilidad (tanto los referentes a las infraestructuras hidro-agrícolas como los relativos a la instalación de perímetros regados) al tiempo que asume los gastos de construcción de las obras requeridas. Para ese

organismo estatal, cuyo objetivo prioritario era el desarrollo de las regiones secas mediante proyectos de agricultura regada a partir de reservorios, tales como los contemplados en Salanguillo o en San Vicente, las investigaciones emprendidas en la cuenca vertiente del río Tinto eran por lo tanto de gran interés. Se debe agregar también que respondían a una voluntad manifiesta de los responsables políticos, la de dar nuevamente al sector silvo-agro-pastoral una importancia que había perdido un tanto después del inicio de la explotación de las riquezas petroleras de la región amazónica.

Aunque algunos pluviógrafos fueron instalados en abril de 1979, se puede considerar que la obtención de datos se inició verdaderamente en noviembre de 1980.

3.1. Equipamiento de la cuenca (figura 31)

a) *Red hidrométrica*: El río Tinto es un afluente del Zapotal, curso de agua de flujo intermitente que drena una superficie del orden de los 1.000 Km². La estación hidrométrica principal H1, alimentada por una cuenca de 69,3 Km², fue instalada bajo un puente de la carretera Guayaquil-Salinas a una altura de 45 m.s.n.m. El relieve general es moderado (clase R4), salvo en la parte aguas arriba que alcanza 420 m.s.n.m. en la loma Ánimas, punto culminante de la región. La cobertura vegetal, característica de las zonas áridas, está constituida principalmente de ipomeas asociadas a cactus; se observa sin embargo la presencia de amplias extensiones herbáceas (de origen ¿antrópico?) en las partes bajas y, en los altos relieves, se destaca la existencia de *Bursera Graveolens* (palo santo), testimonio probable de una cobertura antigua mucho más densa relacionada con un clima más húmedo (según el botánico Charles Huttel). La estación hidrométrica, construida a nivel del puente de carretera, fue equipada con una escala limnimétrica de 0-4 m y un limnógrafo de flotador de rotación diaria colocado el 28 de enero de 1982. Para efectuar la medición de los caudales, se construyó, bajo el arco central, un vertedero de hormigón de pared gruesa de 7,8 m de ancho y de forma triangular. Su punto bajo estaba situado a 0,4 m del fondo del lecho natural y sus paredes laterales tenían una pendiente del 5 por ciento. Por otro lado, se acondicionaron los dos arcos laterales para que constituyan, de cada lado del vertedero, un control horizontal de igual altura en caso de crecida muy grande.

Para apreciar mejor las relaciones entre las características físicas de la zona, las lluvias y la escorrentía, en caso de que esta última fuera limitada, se instaló igualmente una estación (H2) en la quebrada Cunquinllique. Ella controlaba una subcuenca de 4,8 Km² y estaba equipada con una escala limnimétrica de 0-4 m y con un limnógrafo con flotador de rotación diaria. Para efectuar las medidas de caudal, se colocó un pequeño vertedero

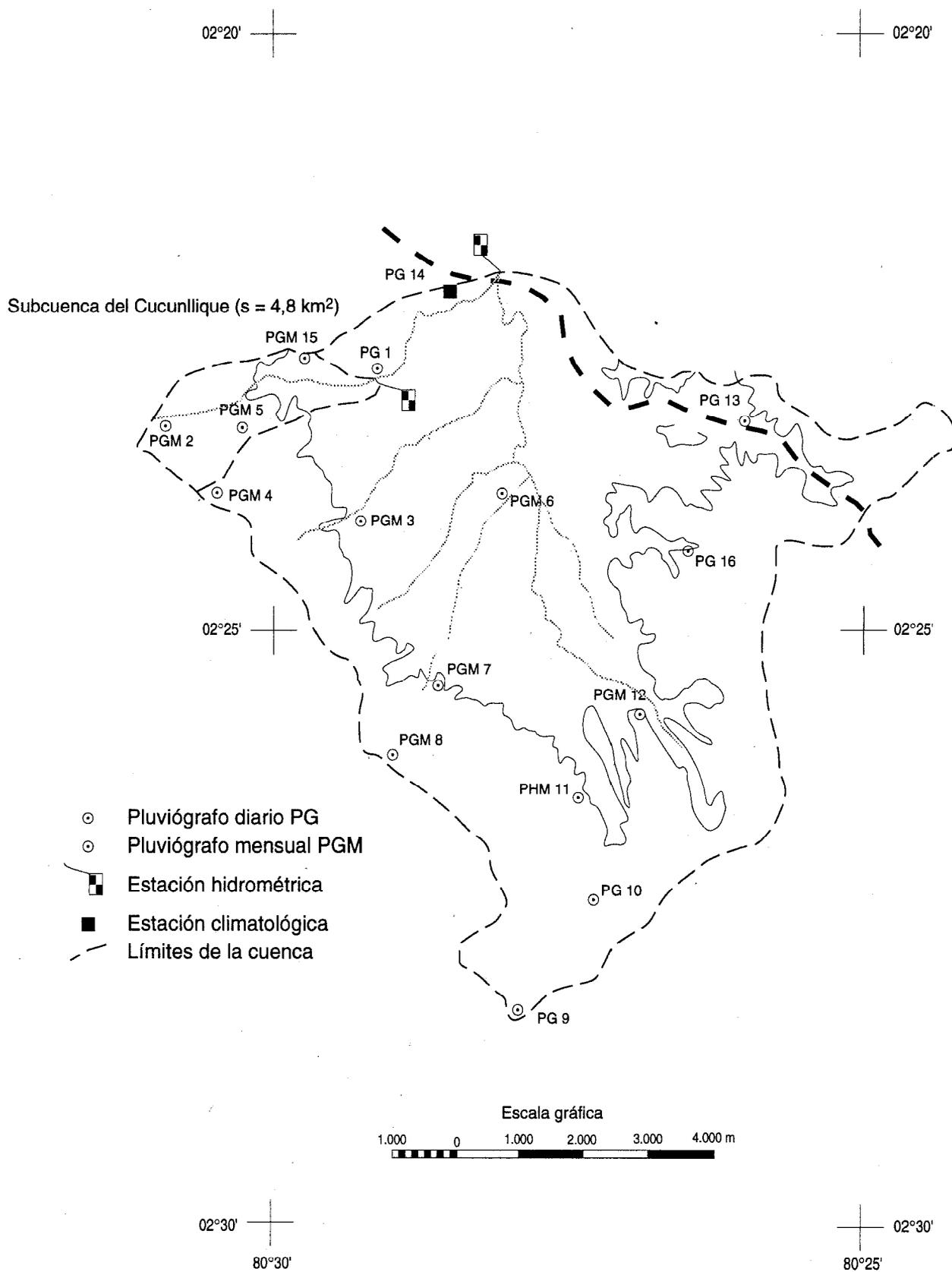


Fig. 31 - Cuenca vertiente del río Tinto (S = 69,3 Km²) - Mapa de base y equipamiento

Parshall (Qmax de 25 l/s) prolongado lateralmente por paredes cuyas pendientes correspondían más o menos a las de las orillas naturales (5,8 por ciento en la orilla izquierda y 4,5 por ciento en la derecha), todo coronado por una pasarela de aforo de 10 m de ancho, sostenida por tres pilares y anclada en el dique de la orilla izquierda que soportaba al limnógrafo.

En ambos casos, los trabajos se realizaron sin mayor problema puesto que, hay que recordarlo, los ríos estaban secos desde varios años atrás. La estación H1, gracias a buenos márgenes de seguridad que respondían al optimismo premonitorio con el que había sido realizada, funcionó satisfactoriamente a pesar de ciertos problemas, muy comprensibles, de sedimentación. La estación H2 en cambio fue completamente destruida en cuanto se produjeron las primeras crecidas de 1983 y no pudo ser reconstruida sino a fines de 1984.

b) Red climatológica: Ya en abril de 1979, se comenzó a equipar una estación climatológica cerca de la estación hidrométrica H1, a 50 m.s.n.m., 02° 22' 07" de latitud Sur y 80° 28' 29" de longitud Oeste. Estaba destinada especialmente a estimar los factores condicionantes de la evaporación y la evapotranspiración. Terminada en noviembre de 1981, estaba equipada con un abrigo meteorológico que comprendía termómetros, psicrómetros y termohigrógrafo, un heliógrafo de tipo Campbell, una veleta a 10 m de altura, una tanque de evaporación clase A completado con un anemómetro totalizador, un pluviómetro y un pluviógrafo diario (Pg 14) de sifón.

c) Red pluviométrica: Pese al elevado costo que implicaba, la ausencia total de población en la cuenca impuso la instalación de una red compuesta exclusivamente de pluviógrafos. Las medidas eran levantadas por observadores que se desplazaban a pie o en bicicleta, pero solo numerosas visitas de mantenimiento y de control, efectuadas desde Quito, pudieron garantizar su buen funcionamiento.

Originalmente, en abril de 1979, se había procedido a la instalación de 4 pluviómetros, red provisional que no funcionó sino algunos meses y cuyos datos no son utilizables debido a la mala calidad de las observaciones y a la pura y llana desaparición de los aparatos. Se debe entonces postergar el origen de la red al 22 de noviembre de 1980, cuando entraron en funcionamiento 7 pluviógrafos semanales y 2 pluviómetros. En septiembre y en noviembre de 1981, los pluviógrafos semanales fueron reemplazados por registradores de rollos de duración mensual y los pluviómetros por pluviógrafos de rotación diaria. La red definitiva comprendía entonces 16 pluviógrafos (5 de ellos situados en la pequeña cuenca de Cucunllique), 7 diarios y 9 mensuales.

3.2. Operación de la red

De manera general, se puede adelantar que el aislamiento, el aislamiento, la ausencia de población en la zona estudiada, la inexistencia de caminos transitables y de telecomunicaciones, la falta de vigilancia permanente por parte de un hidrólogo y finalmente el aspecto aleatorio que reviste la aparición de una crecida después de varios años de estiaje absoluto, son elementos que, incluso tomados separadamente, limitan ya en gran medida la probabilidad de obtención de datos hidrológicos consistentes. La convergencia de todos esos factores en la cuenca vertiente del río Tinto permite apreciar en su justo valor la buena calidad de las observaciones y de las mediciones que fueron efectuadas, pues se debe subrayar la seriedad que fue el denominador común de todos los trabajos de campo, se trate ya sea de la colocación y el mantenimiento de los registradores, de la construcción de las estaciones, de la recolección de las observaciones o de la medida de los caudales durante la campaña 1982-1983.

Sin embargo, al iniciarse las investigaciones, los obstáculos eran numerosos, ante todo porque a los factores limitantes evocados se agregaban consideraciones ligadas a la actitud del personal que intervenía, muy similar a la señalada en el caso de la cuenca del Banchal. En segundo término, el personal local que trabajaba en la cuenca fue objeto de una elección forzada entre los miembros de las dos únicas familias que vivían en las cercanías, la una en el recinto de Sucre, dos personas de edad, y la otra en Olmedo, una pareja y tres niños; las inquietudes eran entonces legítimas puesto que para efectuar la recolección de los datos y proceder al cambio de diagramas de los registradores gráficos, los dos observadores, sometidos a horarios difíciles, debían recorrer la cuenca varias horas al día, a veces en bicicleta y casi siempre a pie.

De manera un tanto inesperada, los cursos teóricos (en Quito) y la capacitación « sobre la marcha » (en el campo, durante la instalación de los aparatos y la construcción de las estaciones) dispensados por los hidrólogos del ORSTOM, parecen haber suscitado el interés y la motivación suficientes como para que, en cuanto se anunció la llegada de El Niño 1982-1983, el personal técnico de Guayaquil se movilizara inmediatamente. Dicho personal asumió luego el seguimiento de las mediciones y los controles periódicos con la frecuencia y el rigor requeridos, puesto que, del 4 de enero al 27 de julio de 1983, realizó la mayoría de 66 aforos, 12 de ellos entre 30 y 80 m³/s. Paralelamente, después de una primera corrección de las carencias reveladas por el total fracaso de la red de pluviómetros instalada en 1979, pero sobre todo a costa de largas jornadas de aprendizaje, la calidad del trabajo efectuado por los dos observadores evolucionó de manera satisfactoria, desde el punto de vista

tanto de la calificación técnica como de la seriedad con que se cumplieron las tareas cotidianas.

Ciertamente, algunas observaciones o medidas no siempre tienen la precisión deseada, especialmente en hidrometría. Entre las fuentes de error relativas a las medidas de caudal, se pueden citar aquellas inherentes a la multiplicidad de operadores, a los transportes sólidos muy importantes y a las grandes variaciones de altura limnimétrica durante un mismo aforo. En cuanto a los registros, un número afortunadamente limitado de limnigramas es difícilmente interpretable: anotaciones poco realistas de la fecha, de la hora o de la cota limnimétrica, o incluso mal funcionamiento del limnógrafo cuando el pozo del flotador estaba taponado por falta de limpieza entre las crecidas. Tales deficiencias, en definitiva menores, no afectaron el buen nivel de confiabilidad general que puede atribuirse a la voluminosa información recogida.

3.3. Estudio de las crecidas y las relaciones lluvias-escorrentía

Los primeros aguaceros que pueden atribuirse a El Niño tuvieron lugar en octubre de 1982 (7 días de lluvia que totalizaban 7,8 mm — media en la cuenca —); es por esa razón que se prefirió utilizar, en lugar del año calendario, un recorte octubre-septiembre que permitía comparar los años observados entre sí. Un rápido examen comparativo de las figuras 32 (isoyetas 1981-1982: P = 24,3 mm) y 33 (isoyetas 1982-1983: P = 2.691,1 mm) ilustra bien el impacto de El Niño a nivel anual; da también una idea de la elevada recurrencia de los eventos hidrológicos derivados, algunas de cuyas características se indican a continuación:

- el escurrimiento fue permanente del 2 de enero al 20 de octubre, es decir durante 9 meses y 18 días;
- a partir del 13 de julio, fecha de la última crecida, se observa un decrecimiento exponencial de los caudales, agotamiento puro proveniente de la descarga de las napas acuíferas;
- durante el período que va de enero a fines de julio, se observaron algunos valores verdaderamente excepcionales:
 - lámina total escurrida de 945 mm, es decir un coeficiente de escurrimiento del 37,2 %;

- lámina escurrida mensual promedio de 135 mm (máximo de 245 mm en abril) ;

- en marzo, un coeficiente de escurrimiento máximo que alcanzó el 55,9 %.

Del 2 de enero al 13 de julio se registraron 69 crecidas en la estación principal H1 (recuérdese que la estación H2 desapareció completamente el 25 de enero) y, para proceder a la calibración del modelo global lluvias-caudales, se escogieron 4 crecidas de tendencia unitaria entre los 48 hidrogramas simples observados. Todas corresponden a aguaceros elevados, relativamente cortos, bien repartidos en el conjunto de la cuenca; la del 22 de febrero dio lugar al mayor caudal pico observado durante el período estudiado: 116 m³/s, es decir 1,7 m³/s/Km².

El cuadro presentado a continuación resume los principales valores característicos calculados a partir de los hidrogramas de crecida seleccionados.

Después de haber fijado en 30 mm el valor estándar de la lámina de escurrimiento superficial (valor compatible con las 4 crecidas utilizadas y por cierto superado por otros hidrogramas complejos), se estableció el hidrograma característico de escurrimiento superficial (figura 34) procediendo de manera tradicional, por centrado de los picos y cálculo de las medias de los caudales después de haberlos ponderado por un factor de corrección de lámina. Los parámetros de ese hidrograma son los siguientes:

- tiempo de subida $t_s = 3h00'$
- tiempo de base $t_b = 10h30'$
- volumen de escurrimiento superficial
 $V_r = 2.080 \times 10^3 \text{ m}^3$
- lámina de escurrimiento superficial
 $L_r = 30 \text{ mm}$ (valor seleccionado)
- caudal máximo de escurrimiento superficial
 $Q_r = 146 \text{ m}^3/\text{s}$
- caudal medio $Q_m = 55 \text{ m}^3/\text{s}$
- coeficiente de forma $K_f = 2,65$.

Con miras a definir las relaciones lluvia-escorrentía, se utilizó la totalidad de crecidas simples para buscar los vínculos existentes entre los parámetros de forma (t_s/t_b , K_f/t_b y Q_r/K_f), los diversos parámetros de los escurrimientos superficiales (Q_{max}/Q_r , Q_r/L_r) y finalmente entre estos últimos y ciertos parámetros de las precipitaciones

Fecha	Pm (mm)	IH	Le (mm)	Ke (%)	Lr (mm)	Kr (%)	Ts (h-min)	Tb (h-min)	Qo (m ³ /s)	Qmax (m ³ /s)	Qr (m ³ /s)	Kf
23/02/83	74,1	63,5	30	41	24,3	32,8	2h37	10h07	0,2	116	110	2,4
21/04/83	47,3	94,5	19	41	14,5	30,6	2h30	9h50	4,3	75	68	1,74
24/04/83	56,6	152	17	30	13,1	23,1	2h11	6h06	2,9	81	72	1,74
02/05/83	74,7	115	25	34	20,9	28,1	1h55	12h55	2	69	66	2,11

Cuadro 15 - Río Tinto - Valores característicos de cuatro crecidas de tendencia unitaria

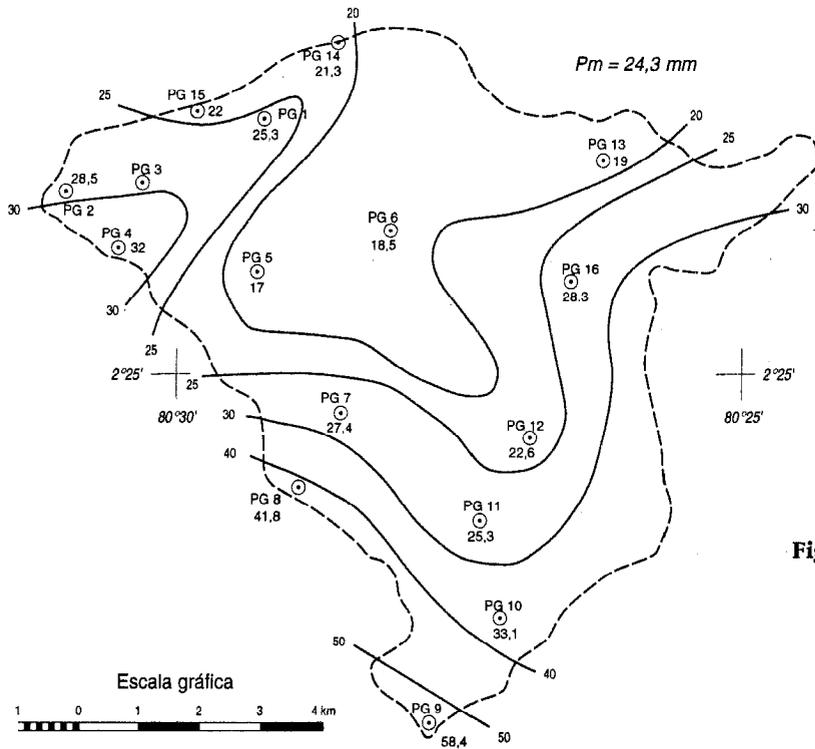
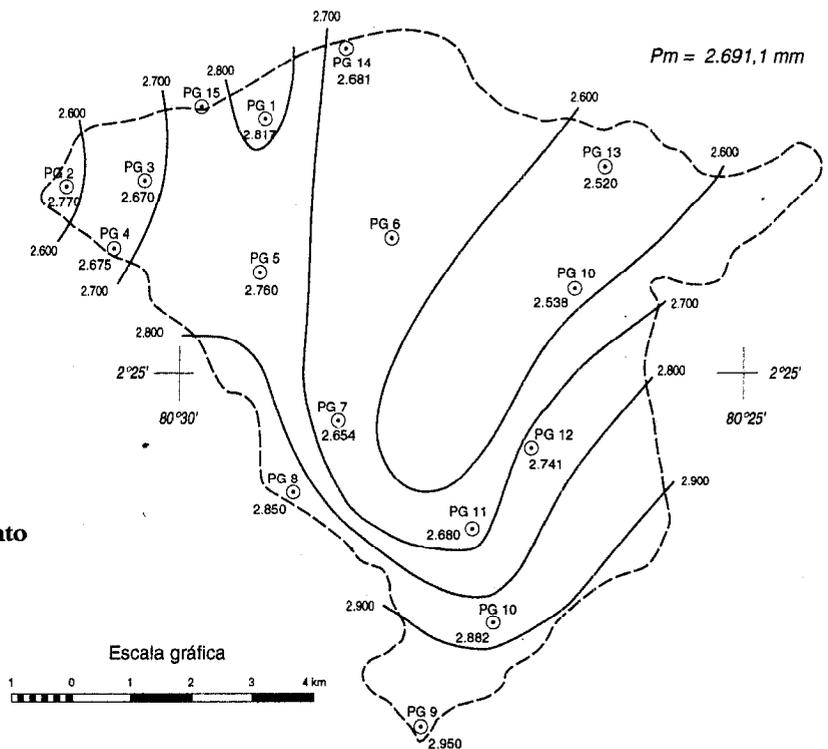
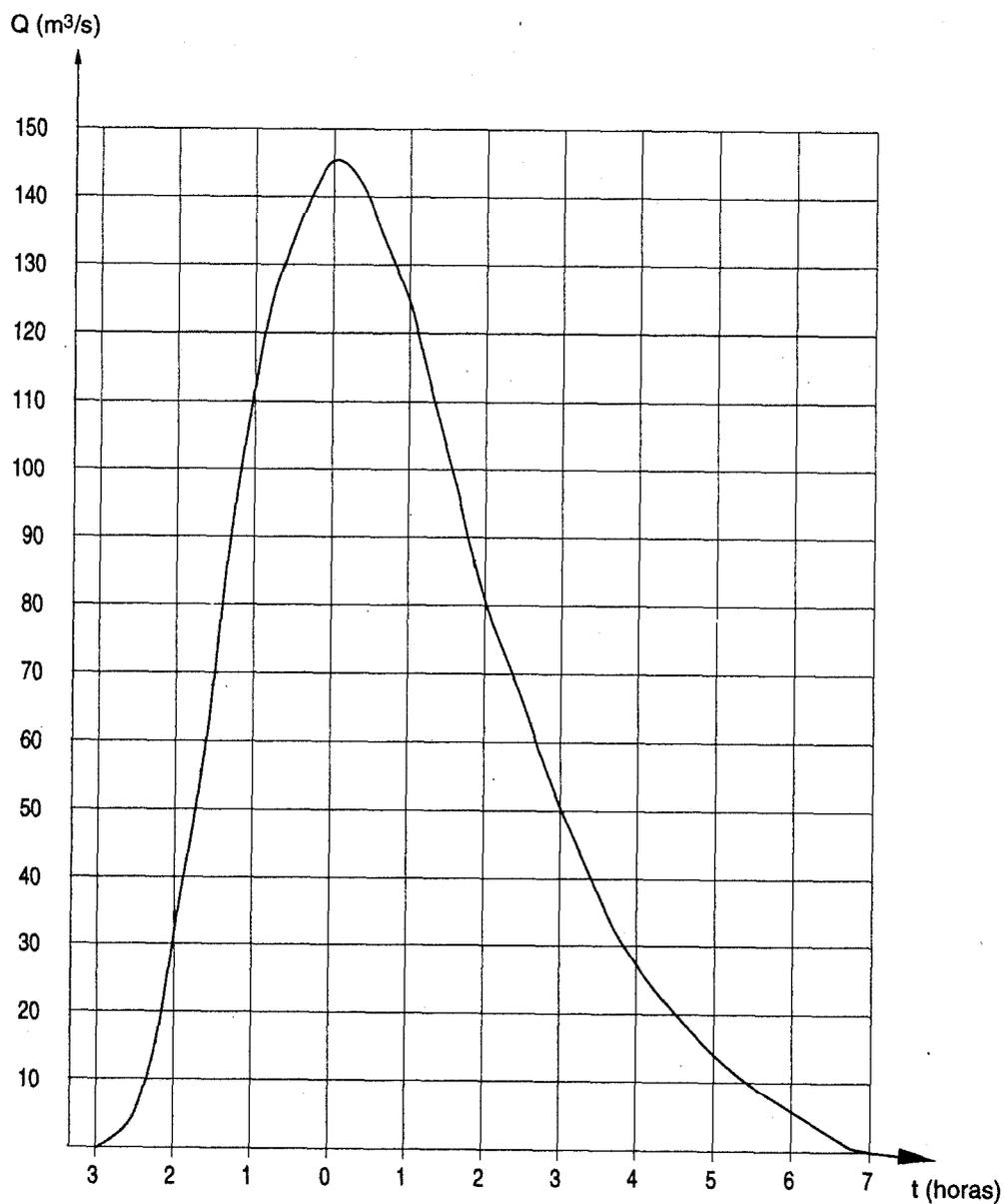


Fig. 32 - Cuenca vertiente del río Tinto (isoyetas anuales 1981-1982)

Fig. 33 - Cuenca vertiente del río Tinto (isoyetas anuales 1982-1983)





$T_m = 3h00'$ $Q_{max} = 146 \text{ m}^3/\text{s}$
 $T_b = 10h30'$ $Q_m = 55,0 \text{ m}^3/\text{s}$
 $V_r = 2.079 \cdot 10^3 \text{ m}^3$ $K_f = Q_{max}/Q_m = 2,65$
 $L_r = 30 \text{ mm}$

Fig. 34 - Cuenca del río Tinto
Hidrograma estándar

que los provocaron (Lr/Pm, Pm/Px). A continuación se presentan brevemente los resultados obtenidos.

La primera relación buscada fue aquella que une las láminas de escurrimiento superficial con las precipitaciones medias en la cuenca. Se obtuvo una ecuación lineal con un coeficiente de correlación altamente significativo:

$$Lr = 0,288 Pm - 2,29 \text{ en mm, con } r = 0,92$$

Esta relación no es válida sino en el intervalo 30-90 mm de lluvia promedio en la cuenca, y por lo tanto para lluvias que son en la región de frecuencia inferior a la mediana.

Un intento de mejoramiento haciendo intervenir el índice de humedad IH no dio resultados convincentes, lo cual es por cierto ilustrado por el gráfico de la figura 35. Asimismo, la consideración de las intensidades registradas en diferentes pluviógrafos (en 15 min, 30 min y

una hora) no mejoró considerablemente el ajuste y fue por lo tanto descartada.

Las demás relaciones que se establecieron son las siguientes:

$$Pm = 0,72 Px + 1,2 \text{ en mm}$$

(Px definido en el capítulo 1, acápite 5)

$$Qmax = 0,80 + 1,11 Qr \text{ en m}^3/\text{s, con } r = 0,98$$

$$Qr = 10,5 Lr^{0,7} \text{ en m}^3/\text{s y Lr en mm}$$

En definitiva, todas estas relaciones permitieron elaborar un modelo gráfico global de buena calidad (figura 35) que une los eventos pluviométricos individuales a los escurrimientos superficiales resultantes de ellos. Instrumento esencialmente práctico, útil para el establecimiento de las normas de construcción de las obras civiles y de acondicionamiento agrícola, responde a las expectativas de numerosos encargados del ordenamiento del territorio.

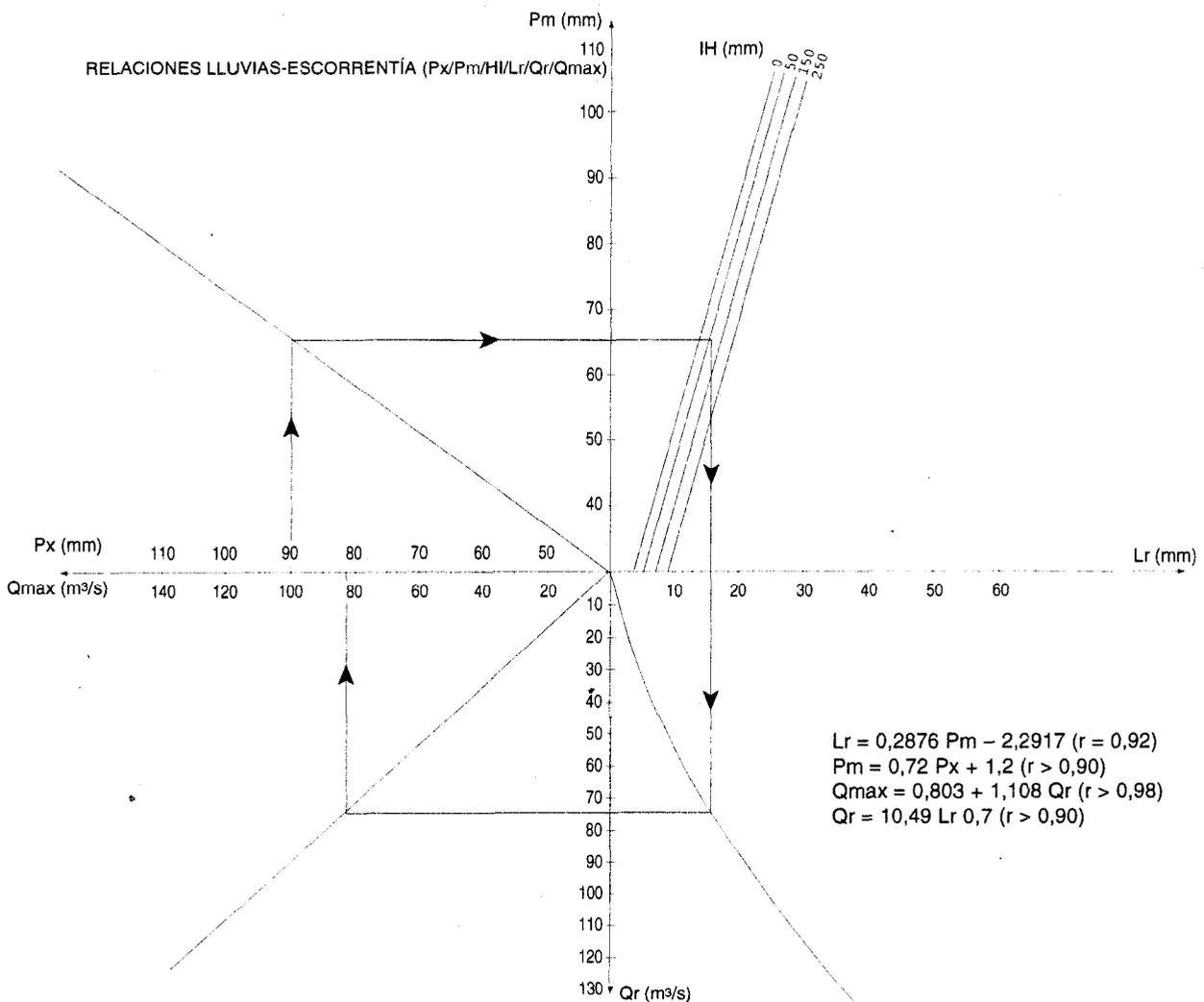


Fig. 35 - Cuenca del río Tinto - Estudio de las crecidas

ARTÍCULO VII

LOS REGÍMENES HIDROLÓGICOS ECUATORIANOS

Pierre Pourrut, Gustavo Gómez

I. Factores condicionantes de los regímenes hidrológicos y de las características de las redes hidrográficas

Los cursos de agua están estrechamente ligados al contexto geográfico: relieve, naturaleza y grado de alteración de las rocas, clima, cobertura vegetal, todo se combina para constituir los rasgos distintivos de su hidrología. Cada uno es la resultante global y sutil de las características de la región que drena, nada refleja mejor que ellos el conjunto de realidades climáticas, orográficas, geológicas y biogeográficas que caracterizan a su cuenca hidrográfica.

Dada la diversidad que, en el Ecuador, caracteriza a sus principales factores condicionantes (ver artículo II), se puede esperar encontrar redes hidrográficas de formas y densidades muy variadas. Los regímenes hidrológicos son igualmente múltiples y, a menudo, únicamente la parte alta de alimentación permite la individualización de procesos simples; en efecto, más aguas abajo, los fenómenos registrados casi nunca son representativos del lugar en donde se observan puesto que son entonces el fruto de la integración de diferentes regímenes unitarios de las zonas atravesadas aguas arriba.

II. Clasificación de los regímenes hidrológicos y descripción de las principales características de las redes hidrográficas

Como Arlery y Guilemet lo señalaron con gran justicia « *para tener una utilidad práctica, una clasificación no puede sino partir de datos simples o al menos fácilmente accesibles, para desembocar en un marco a la vez suficientemente general (para permitir comparar los regímenes que tienen varios rasgos en común) y sin embargo bastante detallado (para distinguir en él a los regímenes diferenciados únicamente por algunas características más o menos importantes)* ». Pese al factor limitante

que constituye la dificultad de definir regímenes hidrológicos que no sean compuestos en la parte baja de los ríos, la clasificación propuesta se esfuerza en seguir de la mejor manera este sabio consejo dictado por la experiencia.

Es así como, una vez adaptada al caso específico del Ecuador, la clasificación del régimen de los cursos de agua propuesta por Pardé permitió distinguir una cantidad razonable de grandes clases de regiones hidrológicas. Recordemos que esta clasificación se basa en dos criterios más o menos correlacionados, siendo el primero la naturaleza y el origen de las aguas altas (pluviales, nivales, glaciares o mixtas) y el segundo la simplicidad o la complejidad de la distribución mensual de los caudales a lo largo del año (regímenes simples con un solo máximo que refleja un solo modo de alimentación, regímenes mixtos bajo la influencia de varios modos de alimentación y regímenes complejos que corresponden a las influencias muy diversas observadas aguas abajo).

A continuación se realiza la descripción de las principales características de nueve grandes clases de redes hidrográficas y regímenes hidrológicos representados en la figura 36.

1. RÉGIMEN PLUVIAL TROPICAL SEMI-HÚMEDO DE LA REGIÓN LITORAL

Abarca las altas colinas de Mache, la cuenca de Muisne, los altos relieves dominantes del Manabí septentrional (cordilleras de Jama, Coaque y Chundul), la depresión central de Chone-Portoviejo, la cordillera sur y la vertiente occidental del río Daule (cerros de Colanche). Aunque las pluviometrías anuales disminuyen de Norte a Sur y de Este a Oeste, alcanzando 2.000 mm al extremo noreste, mientras que son inferiores a 500 mm a todo lo largo de la franja costera meridional, presentan una característica común: su irregularidad interanual. Es así como el coeficiente de variación interanual K3 (relación entre las lluvias de frecuencias decenales húmeda y seca) es superior a 3 y puede alcanzar 5. Una de las

causas de esta variabilidad es sin duda alguna el fenómeno del Niño cuyas elevadas precipitaciones son responsables de crecidas en ocasiones catastróficas (ver artículos V y VI) y constituyen el principal agente de la morfología de los valles pues determinan una acelerada erosión y una esporádica pero muy rápida evolución de los perfiles transversales y longitudinales de los ríos.

Los regímenes son de tipo tropical con un máximo único centrado en el mes de marzo en el caso de los ríos que fluyen hacia el Oeste; el máximo es un tanto más tardío, en abril, en el caso de aquellos que fluyen hacia el Este. Los valores mínimos se observan en diciembre y son a menudo cercanos al estiaje absoluto dada la ausencia total de precipitaciones.

Los módulos anuales, que pueden ser cercanos a 30 l/s/Km² en la parte alta de las cordilleras, disminuyen progresivamente al acercarse al litoral en donde la mayoría de pequeños cursos de agua ya no tienen sino un flujo intermitente, sus valores son siempre inferiores a 10 l/s/Km². Para conocer mejor las características hidrológicas de los escurrimientos y las relaciones que unen a las lluvias con el escurrimiento superficial, se instaló una cuenca representativa en el río Banchal, afluente del río Paján. Dicha cuenca, de 155 Km², permitió obtener resultados importantes cuando las elevadas precipitaciones consecutivas a El Niño de 1982-1983 (cercanas a los 2.500 mm mientras que la pluviometría anual es del orden de los 800 mm). Los resultados se presentan en el artículo VI, pero no está por demás recordar algunos de los principales valores observados:

- la lámina de agua escurrida anual llegó a los 835 mm, es decir un coeficiente de escurrimiento del 37 % ; la escorrenría más elevada fue observada de enero a julio y la lámina de agua escurrida alcanzó entonces 710 mm, superando el coeficiente de escurrimiento el 44 %;

- se registraron 50 crecidas durante los seis primeros meses del año; 3 de ellas tuvieron un caudal pico superior a 100 m³/s, observándose el máximo el 11 de marzo: 320 m³/s, es decir más de 2 m³/s/Km².

Es interesante observar el importante papel que juega la geología regional en sostener los caudales de estiaje mientras que las lluvias son reducidas o inexistentes en verano. Es el caso del río Ayampe, cuyo flujo permanente tiene su origen en la pluviosidad mucho más elevada de su cuenca superior, situada en la cordillera Chongón-Colonche. Una densa red de fracturas favorece la infiltración y constituye un camino privilegiado para las aguas lluvia que, por la carga hidráulica, alimentan sin cesar la parte aguas abajo de la cuenca. La vegetación mucho más verde de la baja llanura aluvial da la impresión errónea de contar con una pluviosidad más elevada que la de las zonas circundantes.

2. RÉGIMEN PLUVIAL TROPICAL MUY HÚMEDO DE LA REGIÓN SEPTENTRIONAL

Atañe a la cuenca de Borbón-Valdez, las vertientes noroccidentales y la alta cuenca meridional (ríos Quinindé y Blanco) del río Esmeraldas. La pluviometría es muy elevada, superior a 3.000 mm y puede superar los 5.000 mm en ciertos años; está bien repartida a todo lo largo del año con un máximo relativo de febrero a abril y un mínimo relativo de septiembre a diciembre.

A pesar de la falta de datos, pues las medidas efectuadas son aún insuficientes como para establecer las relaciones altura/caudal, se puede adelantar que los módulos específicos son importantes, del orden de 80 l/s/Km², y que los estiajes son muy sostenidos, sobrepasando siempre los 20 l/s/Km².

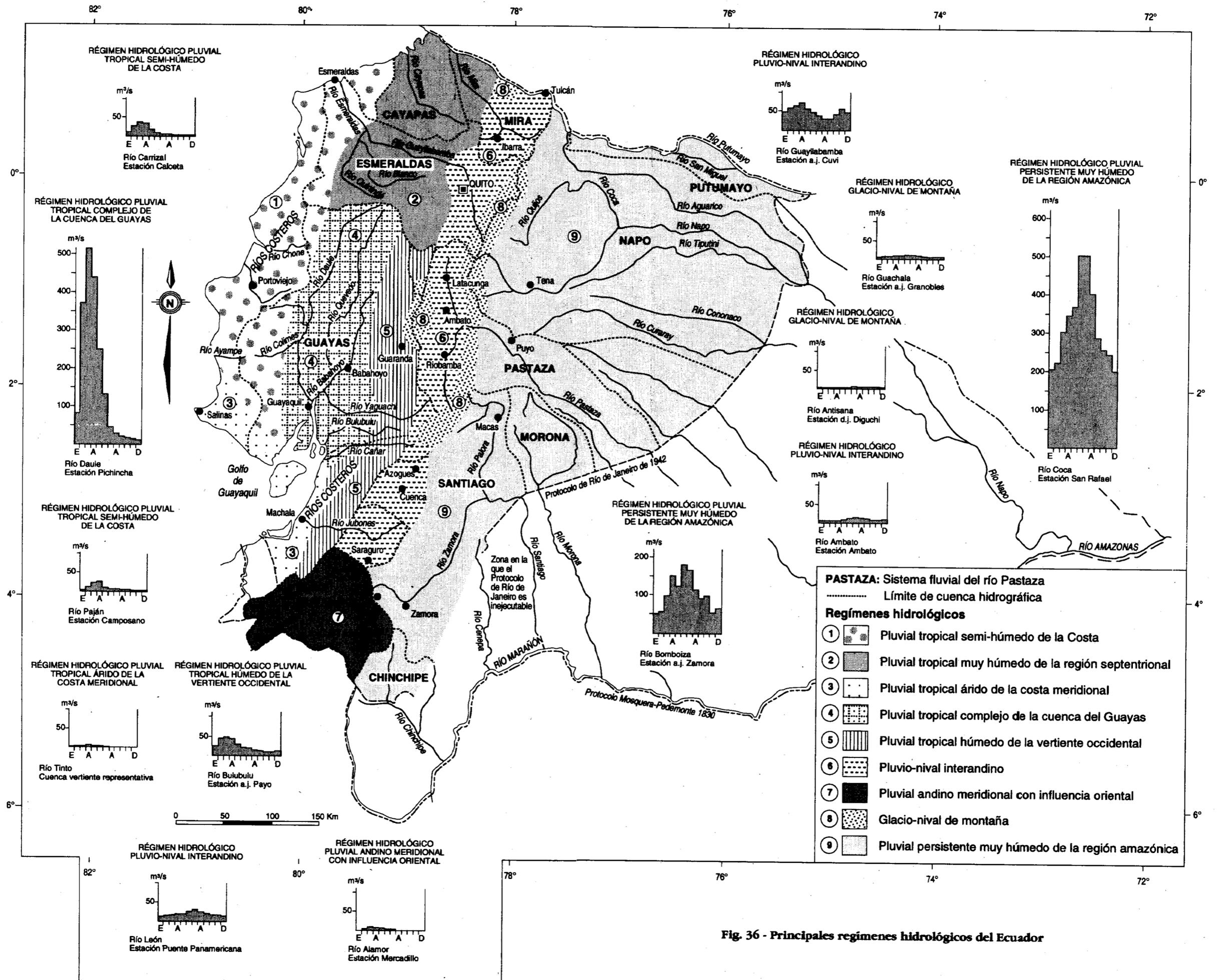
El lecho de los ríos, bien marcado en el flanco occidental de la cordillera, se hace cada vez más meandri-forme al acercarse a la llanura costera en donde reina una vegetación sumamente densa. Al llegar a la zona marítima, rica en manglares, los cursos de agua empiezan a divagar y se observan numerosos fenómenos de mezcla e intercambio durante el período de aguas altas.

Se debe insistir en la alta deficiencia de la información hidrológica, debida a la densidad insuficiente de la red y a la calidad a menudo criticable de algunos datos de observación disponibles. Los pocos resultados cuantificados indicados anteriormente provienen de datos dispersos y, por el momento, no es posible presentar una serie completa de caudales que correspondan a una sola estación hidrométrica.

3. RÉGIMEN PLUVIAL TROPICAL ÁRIDO DE LA COSTA MERIDIONAL

Reina en el borde litoral del Sur de la provincia de Manabí, la península de Santa Elena, la isla Puná y la franja costera de la provincia de El Oro.

La altura pluviométrica anual es siempre inferior a 500 mm, apenas del orden de 100 mm en la península de Salinas, y el sistema fluvial tiene un flujo exclusivamente temporal. Los ríos pueden permanecer secos durante varios años seguidos y únicamente los fuertes aguaceros, generalmente resultantes de fenómenos de El Niño, provocan algunos escurrimientos esporádicos. Se pudo obtener una excelente estimación de sus principales características gracias a la instalación de la cuenca vertiente representativa del río Tinto (69,3 Km²) que precedió a las precipitaciones y escurrimientos superficiales verdaderamente excepcionales provocados por El Niño de 1982-1983. Como esta situación fue analizada en los artículos V y VI de este libro, se ruega al lector remitirse a ellos para mayor información. Aquí se presentan solo algunas indicaciones que permiten hacerse una idea global del régimen hidrológico verdaderamente particular de la región y de la elevada recurrencia



de ciertos eventos. Como ejemplo, el siguiente cuadro presenta la serie de lluvias mensuales del ENSO 1982-1983 observadas en Salinas.

La comparación de estos datos con la serie anteriormente disponible (por lo tanto, sin incluirlos) mediante el ajuste de las leyes de distribución mejor adaptadas, Galton en el caso de las lluvias anuales y Pearson III en el caso de las lluvias mensuales, muestra frecuencias extremadamente raras. He aquí una estimación de los períodos de retorno:

- superior a varios miles de años para la totalidad del período (un año entero), si se admite una distribución unimodal;
- comprendidos entre 500 y 1.000 años para los meses de mayo y junio;
- comprendidos entre 100 y 250 años para el mes de enero, abril y julio.

En lo que respecta a las precipitaciones diarias, 33 de ellas fueron superiores o iguales a la lluvia anual calculada anteriormente, 8 superiores a la lluvia decenal y

2 a la lluvia centenal (222,6 mm el 14 de mayo de 1983 y 157,0 mm el 6 de abril de 1983).

Siendo estas lluvias excepcionales, ocurre lo mismo con los escurrimientos que fueron continuos del 2 de enero al 20 de octubre de 1983. De enero a julio (de las 69 crecidas observadas, la última se produjo el 12 de julio), la lámina escurrida alcanzó los 945 mm lo que corresponde a un coeficiente de escurrimiento promedio del 37 % (fue superior al 50 % en marzo y abril). Los caudales pico superaron tres veces los 100 m³/s y el mayor, registrado el 22 de febrero, alcanzó 116 m³/s, es decir más de 1,6 m³/s/Km², lo que es notablemente elevado para una cuenca de ese tamaño. La frecuencia de esos escurrimientos es cercana a la estimada para las precipitaciones de Salinas.

Se debe señalar también que las fuertes inundaciones observadas en la parte meridional de la región abarcada por este régimen no son provocadas por precipitaciones locales sino que se originan en las lluvias de la parte alta de las grandes cuencas; es el caso de los ríos Jubones y Balao.

1982			1983										
O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	año	
11,8	1,4	6	402,2	198,2	304,8	606,8	734,4	501,2	66,2	0	0	2.833,2	

4. RÉGIMEN PLUVIAL TROPICAL COMPLEJO DE LA CUENCA DEL GUAYAS

La cuenca del río Guayas está atravesada por ríos originarios de la alta cuenca septentrional, tales como el Daule y el Quevedo, cuyo régimen se ve muy alterado por los escurrimientos laterales provenientes de la cordillera costanera y en particular de la cordillera Occidental. Después de una estación seca muy marcada de mayo a noviembre, los caudales aumentan a partir de diciembre y alcanzan su máximo en marzo y abril. Contrariamente a lo observado en la franja litoral, el origen diversificado de los flujos contribuye a reducir la irregularidad interanual que sigue siendo sin embargo bastante elevada puesto que los valores del coeficiente K3 se sitúan entre 2 y 4.

La morfología de los ríos, muy marcada en la parte aguas arriba, se hace meandriforme en la parte baja en donde, al producirse crecidas importantes, se observan entre esteros numerosos fenómenos de mezcla e intercambio de agua, debido a la débil pendiente y por la existencia de canales de riego. Los ríos provenientes de la cordillera Occidental son casi todos los años responsables de fuertes crecidas que provocan daños de importancia en las infraestructuras viales y agrícolas. Las

medidas temporales de emergencia adoptadas, como el levantamiento de las orillas, se revelan siempre muy precarias y a menudo ineficaces; debido al estrechamiento de las secciones, contribuyen por el contrario a aumentar las velocidades de flujo. Tarde o temprano, deberá contemplarse un ordenamiento territorial global de estas zonas.

5. RÉGIMEN PLUVIAL TROPICAL HÚMEDO DE LA VERTIENTE OCCIDENTAL

Este régimen concierne la vertiente exterior de la cordillera Occidental, en particular los ríos Angamarca, Prieto, Chanchán, Bulubulu y Cañar, es decir la zona que recibe de frente el impacto de las masas de aire caliente y húmedo de origen oceánico, reforzadas por aquellas que se estancan habitualmente sobre la llanura del Guayas. Al elevarse tales masas, el enfriamiento consecutivo al proceso de expansión adiabática determina su condensación y provoca precipitaciones importantes, en especial entre los 500 y 1.500 m.s.n.m. Los totales pluviométricos anuales, que son superiores a los 2.000 mm y pueden sobrepasar localmente los 4.000 mm, se concentran en un período único de enero a abril. Asociadas a las fuertes pendientes, las lluvias diarias sumamente

elevadas (más de 100 mm para la frecuencia anual, 150 mm para la frecuencia decenal y 200 mm para la centenal) generan crecidas muy violentas cuyos caudales pico pueden superar los 3 m³/s/Km² en cuencas del orden de los 100 Km². Los volúmenes escurridos son entonces considerables y, al ser frenados aguas abajo por las pendientes más moderadas y sobre todo por obras inadecuadas, provocan casi todos los años serias inundaciones de consecuencias a menudo catastróficas.

6. RÉGIMEN PLUVIO-NIVAL INTERANDINO

Este régimen abarca todos los escurrimientos nacidos en el callejón interandino y las hoyas de la zona interandina hasta un límite sur constituido por los macizos de Saraguro. Conciernen a un gran número de ríos de características muy diferentes, tales como el Guayllabamba, el Cutuchi, el Ambato, el Chambo y el Paute. Según la altura y las condiciones geográficas, los cursos de agua reciben aportes de distinto origen, glacio-nival o provenientes de las precipitaciones y, en la mayoría de casos, desde aguas arriba hacia aguas abajo, están sometidos a influencias sucesivas muy diversas que se traducen en un régimen complejo. Se pueden sin embargo individualizar:

- regímenes de tipo pluvial que presentan dos máximos situados en marzo-abril (preponderancia de las precipitaciones provocadas por las masas de aire oceánico) y en noviembre (predominio de las lluvias producidas por las masas de aire amazónico). La importancia relativa de los picos depende del relieve que condiciona en gran parte las posibilidades de penetración del aire húmedo;

- regímenes sometidos a la influencia preponderante de la fundición de las nieves y los glaciares, caracterizados por un solo máximo situado generalmente en el mes de julio. Se debe destacar que de manera aparentemente contradictoria, es este el régimen que reina en los valles secos interandinos de la región central. En efecto, mientras que los grandes volcanes cercanos juegan un papel de pantalla que reduce considerablemente la pluviosidad anual (generalmente inferior a los 500 mm), los ríos que atraviesan estas depresiones tienen un régimen glacio-nival cuyos mayores caudales coinciden con el período más seco; solo excepcionalmente son alimentados por los torrentes de la zona cuyos flujos no son sino intermitentes. Un ejemplo típico de ello ofrece el río Ambato cuya escorrentía proviene en su mayor parte de la fundición de los hielos del volcán Chimborazo;

- al Sur de 2°30', un régimen de tipo pluvial en el que inciden considerablemente las masas de aire amazónico cuando la topografía se presta a ello, por ejemplo en el caso de los ríos Paute o León. Se trata en realidad de una zona de transición, tanto hacia el Sur como hacia el Este.

Dadas las sucesivas fases de la orogénesis andina, algunas de las cuales son recientes, los ríos están lejos

de haber alcanzado su perfil de equilibrio; los lechos son por regla general bien marcados, las pendientes longitudinales pronunciadas y los procesos erosivos muy desarrollados (extraordinaria sedimentación del embalse del Paute). Para abandonar el valle interandino, como es el caso del río Guayllabamba hacia el océano Pacífico o del río Pastaza hacia la Amazonía, han cavado gargantas muy profundas que forman sitios privilegiados para la instalación de represas hidroeléctricas.

7. RÉGIMEN PLUVIAL ANDINO MERIDIONAL CON INFLUENCIA ORIENTAL

En la región andina meridional, caracterizada por su altura y su relieve moderados, las dos cordilleras han perdido su individualidad. Los extensos valles que se abren hacia las zonas litorales (valles de los ríos Puyango y Catamayo) y hacia la cuenca amazónica (valles de los ríos Zamora y Chinchipe) facilitan intercambios de todo tipo y el régimen observado es muy distinto al que reina más al Norte. Su característica principal es una irregularidad interanual muy marcada, consecuencia directa de su estrecha dependencia del régimen de los vientos que puede a veces privilegiar la influencia oriental hasta anular la de origen oceánico. La situación geográfica y la orientación de las cuencas vertientes de alimentación constituyen entonces criterios esenciales.

Los regímenes presentan habitualmente dos máximos centrados en febrero-marzo y julio-agosto, situándose el estiaje hacia fines del año calendario. Los valores de los máximos así como el período que los separa son generalmente función de la distancia entre las cuencas y las dos zonas de influencia, pero, ciertos años, sucede que se observa un pico único proveniente exclusivamente de precipitaciones de origen amazónico.

Contrariamente a la región nor-andina, los ríos se acercan más a su perfil de equilibrio, las pendientes son menos fuertes y los valles más amplios.

8. RÉGIMEN GLACIO-NIVAL DE MONTAÑA

El régimen glacio-nival de montaña reina en las tierras frías y los páramos, por encima de los 3.500-4.000 m.s.n.m., en los lugares en que las cuencas hidrográficas de ríos como el Pita, el Tambo o el Antisana se extienden hasta la cima de volcanes elevados. La fundición de los glaciares (el límite de las nieves perpetuas se sitúa a 4.800 m.s.n.m. aproximadamente) constituye la base permanente de la alimentación de los cursos de agua cuyo caudal recibe esporádicamente los aportes provenientes de precipitaciones en estado sólido, nieve o granizo.

Es un régimen cuyo máximo único está situado en julio, en el caso de los ríos que fluyen hacia el callejón interandino, y en agosto, en el de los cursos de agua de la vertiente oriental, períodos que en ambos casos corresponden a los meses de máxima insolación. Dado el

modo de alimentación glacial, los flujos presentan características especiales, siendo las tres principales:

- un pico diario de crecida situado en la tarde, que corresponde a las aguas provenientes de la fundición de los glaciares al momento de la máxima insolación-temperatura (generalmente hacia las 13:00);

- una gran regularidad de los flujos puesto que el caudal de base es sostenido e importante, lo que es ilustrado por el valor muy bajo, inferior a 2, del coeficiente de regularidad intermensual (relación entre los caudales promedio del mes más fuerte y del mes más débil);

- crecidas de forma muy aplanada porque los aguaceros no son muy fuertes y tienen intensidades generalmente bajas (se observa un gradiente pluviométrico negativo por encima de los 3.500-3.800 m.s.n.m. y es frecuente que la pluviosidad anual en las vertientes occidentales sea inferior a 1.000 mm) por una parte, y porque el retraso debido a la fusión de las precipitaciones en estado sólido contribuye a distribuir mejor los aportes en el tiempo, por otra.

Pese a las pendientes muy fuertes de la cuenca alta, la erosión es limitada; la morfología de los valles de la red hidrográfica es entonces menos acentuada de lo que se podría pensar y los lechos son relativamente poco marcados. Por otro lado, la existencia de numerosas barreras transversales, coladas de lava o morrenas glaciares, se traduce en la presencia de lagos o de zonas pantanosas que contribuyen a la regulación de los flujos.

9. RÉGIMEN PLUVIAL PERSISTENTE MUY HÚMEDO DE LA REGIÓN AMAZÓNICA

Este régimen atañe a la vertiente andina oriental, los relieves subandinos, el piedemonte y las zonas periandinas.

Aunque la pluviometría de los valles bajos abrigados de los ríos Palora y Zamora es relativamente menor, de alrededor de 2.000 mm, esta región recibe en su conjunto precipitaciones muy elevadas que alcanzan los 6.000 mm cerca del volcán Reventador. Las lluvias están bien distribuidas a todo lo largo del año, salvo una ligera disminución de diciembre a febrero. Es la razón por la cual, pese a la sustancial diferencia de relieve existente entre el flanco externo, el pie de la cordillera Real y la llanura baja, se puede considerar que en la región reina un solo régimen hidrológico. Los módulos específicos anuales, muy elevados, superiores a 50 l/s/Km² y frecuentemente cercanos a los 100 l/s/Km², presentan un máximo único en junio-julio y un mínimo en diciembre-

enero; se caracterizan por una gran regularidad interanual (coeficiente K3 inferior a 1,6).

A todo lo largo del flanco oriental de la cordillera Real y de las zonas de piedemonte, tales como el cono de deyección del río Pastaza, los ríos han cavado profundas y abruptas gargantas. En la ruptura de pendiente, desembocan en extensas llanuras arenosas (es el caso de la zona agrícola de Shushufindi, rica en sedimentos de origen volcánico provenientes de la alta cordillera) en donde divagan antes de fluir por amplios valles pantanosos.

III. Conclusión

Se escogieron ciertas estaciones hidrométricas, representativas de cada una de las clases descritas anteriormente. Los valores característicos y los módulos a ellas asociados se presentan en el cuadro 16. Por otro lado, los histogramas de la figura 36 ilustran la distribución mensual de los caudales observados en esas mismas estaciones.

Finalmente, con miras a cuantificar todos los aportes de la red hidrográfica ecuatoriana, se procedió a una estimación de los volúmenes escurridos anuales. Con una imprecisión probable del 30 %, se obtuvieron los siguientes resultados:

- hacia el océano Pacífico: 110 billones de m³ por año;
- hacia la cuenca amazónica: 290 billones de m³ por año.

Lo anterior da un panorama de la gran diversidad de los regímenes hidrológicos y de la gran heterogeneidad de la repartición espacial de los recursos hídricos superficiales que están condicionados por la pluralidad de condiciones físico-climáticas. Si bien esa pluralidad presenta ventajas ciertas, puede también dar lugar a serias dificultades.

Es así como, gracias al relieve muy contrastado y a la abundancia de los caudales, los ríos ofrecen un formidable capital hidroeléctrico: la capacidad lineal bruta fue estimada en 36,5 GW a nivel nacional. A fines de 1988, la potencia instalada era de 1,7655 GW, es decir 173 W por habitante, y la energía producida durante el año había alcanzado 5.915 GWh, es decir 580 KWh por habitante.

En cambio, estas mismas condiciones geográficas son la causa de uno de los problemas más graves que el Ecuador debe afrontar, el de la erosión de las tierras cultivables. Para dar una idea de su amplitud, se estimó que en el medio agrícola de la región andina, la degradación específica promedio es del orden de 1.000 T/Km²/año y que puede alcanzar 6.000 T/Km²/año en algunos casos (evaluación de G. De Noni y M. Viennot, ORSTOM/DNA).

Régimen hidrológico	Río	Estación	Superficie de la cuenca (km ²)	Módulos mensuales en m ³ /s												módulo anual		Observaciones
				E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	m ³ /s	l/s/km ²	
pluvial-tropical semi-húmedo de la región costanera	Carrizal Paján	CALCETA CAMPOSANO	546	11,3	26,7	35,3	33,7	16,9	6,85	2,96	2,31	1,66	1,24	0,806	0,732	11,7	21,4	fluye hacia el Oeste fluye hacia el Este
			529	1,47	9,25	20,5	22,1	7,18	4,51	3,48	1,53	1,26	0,61	0,44	0,31	7,74	14,6	
pluvial tropical muy húmedo de la región septentrional																	> 50	insuficiencia de las series observadas
pluvial tropical árido de la costa meridional	Tinto	cuenca vertiente representativa	69,3	1,24	4,27	4,91	6,6	4,22	2,92	0,914	0,006	0,004	0	0	0	2,09	30,2	año 1983 (Niño muy intenso)
pluvial tropical complejo de la cuenca del Guayas	Daule	PICHINCHA	4.320	80,9	371	514	437	246	130	44,8	28,0	19,0	16,9	13,1	14,6	177	41,0	régimen puro de la cuenca alta
pluvial tropical húmedo de la vertiente andina occidental	Bulubulu	a.j. PAYO	687	24,5	41,1	45,4	41,6	26,9	17,6	11,7	8,22	5,8	4,96	4,3	6,82	20,4	29,7	
pluvio-nival interandino	Guayllabamba	a.j. CUVI	4.190	47,1	58,9	62,7	71,7	55,6	47,3	38,9	30,0	31,9	40,8	56,3	47,8	49,1	11,7	régimen tipo-
	Ambato	AMBATO	715	6,45	6,77	6,61	6,91	7,57	11,5	13,8	10,6	8,15	5,82	5,82	6,3	8,03	11,2	de predominio glacial
	León	PUENTE PANAMERICANA	566	11,9	13,2	14,8	16,9	17,3	23,4	27,5	21,5	17,4	12,9	12,1	8,92	16,6	29,3	de predominio oriental
pluvial andino meridional con influencia oriental	Alamor	MERCADILLO	61	0,8	3,14	6,1	4,55	2,45	1,48	1,01	0,76	0,16	0,52	0,46	0,46	1,84	30,2	régimen tipo
glacio-nival de montaña	Guachalá	d.j. DIGUCHI	142	1,65	1,69	1,82	2,18	2,38	2,88	3,11	2,65	2,45	2,42	2,1	1,9	2,27	16	vertiente oriental
		a.j. GRANOBLES	411	5,83	6,19	6,56	7,11	6,83	10,3	10,9	8,4	6,76	5,47	6,41	5,8	7,21	17,6	vertiente interandina
pluvial persistente muy húmedo de la región amazónica	Coca Bomboiza	SAN RAFAEL	3.950	205	222	303	345	368	504	506	404	289	256	245	202	320	81,0	región norte
		a.j. ZAMORA	1.390	50,7	54,0	96,5	151	124	180	167	115	93	99,1	54,5	65,8	97,7	70,3	región sur

Cuadro 16 - Valores característicos de las estaciones hidrométricas representativas de los diversos regímenes hidrológicos

A manera de conclusión

A lo largo de estas páginas hemos visto dibujarse una imagen del Ecuador que no conocíamos. Los autores, sumamente encariñados con el país que los acogió, necesitaron largos años de estudios e investigación, de trabajo y de pasión para descubrir sus elementos. No es muy común tener entre sus manos el fruto, modesto aparentemente, de un esfuerzo tan largo. Pero, tranquilicémonos, El agua en el Ecuador ha sido extraído de una voluminosa literatura científica cuya abundancia se refleja en las referencias bibliográficas de esta obra.

La base de conocimientos establecidos que describe esta síntesis dio origen a programas específicos que se realizan sucesivamente en el Ecuador en el marco de los acuerdos de cooperación entre los equipos del ORSTOM y los del PRONAREG del Ministerio de Agricultura, o los de grandes institutos como el INERHI o el INAMHI. P. Pourrut evocaba ya este aspecto de la repercusión del trabajo básico cumplido tan pacientemente: « Hoy en día se sabe que esta fase de la regionalización agraria PRONAREG/ORSTOM fue un éxito. El análisis factorial de los parámetros tomados en cuenta, por una parte, y la superposición cartográfica de las potencialidades y de la división administrativa cantonal (necesaria para que el Estado realice sus intervenciones), por otra, permitieron individualizar ciertas zonas homogéneas que presentaban problemáticas agrícolas diversas, las ZAPI ». Es sobre tal principio que el INERHI y el ORSTOM desarrollaron, desde 1987, como contribución al Plan Nacional de Riego, el estudio del funcionamiento del riego tradicional en los Andes ecuatorianos. En ese programa de investigación en cooperación para el desarrollo, que finalizó en 1993, la hidrología, la agronomía y la socioeconomía se unieron para analizar y modelizar el funcionamiento del espacio regado, a fin de simular su posible evolución.

P. Pourrut también ha lamentado que el trabajo de actualización de la información pluviométrica no haya podido realizarse debido a un excesivo retraso en

la depuración primaria de las observaciones y a una insuficiente confiabilidad de los datos recogidos a lo largo del último decenio. El INAMHI y el ORSTOM desarrollan actualmente un programa de investigación sobre las inundaciones y sequías en el Ecuador, cuyo objetivo inmediato es optimizar y modernizar la red hidrometeorológica y complementar la red de alerta y prevención de los fenómenos hidrometeorológicos extremos en el país.

La presente síntesis pretende ser útil, es decir utilizable, para los actores del desarrollo. Para ello, los autores asumieron el riesgo considerable de sacrificar a veces el rigor científico de su procedimiento, en materia de estadísticas por ejemplo, efectuando linearizaciones necesariamente atrevidas, para expresar, pese a las incertidumbres y de la manera más inteligente posible, fórmulas que establezcan órdenes de magnitud indispensables para el planificador. ¿Riesgo irreflexivo? En lo absoluto. Se habrá podido apreciar la prudencia manifestada por los autores en algunos de estos artículos, mediante insistentes observaciones en cuanto a la precisión de los resultados presentados. Pero riesgo que se debe saber correr, sean cuales fueren los sinsabores, para aportar en el momento oportuno y en su campo de experiencia, una contribución apreciable al conocimiento de los factores geográficos de la hidrología y del clima.

Los principales resultados en hidroclimatología presentados no apuntan a satisfacer esta curiosidad del espíritu, por más científica que sea. Se trata del agua, de las manifestaciones naturales de sus carencias y sus excesos en el contexto físico de este país andino, se trata del agua en el marco histórico, socio-lógico y humano del Ecuador.

Frédéric Moniod
ex-Presidente de la Subcomisión
Hidrología del ORSTOM

Bibliografía

- ACOSTA SOLÍS, M., 1968. *División fitogeográfica y formaciones geobotánicas del Ecuador*, Casa de la Cultura Ecuatoriana.
- ACOSTA SOLÍS, M., 1975. *Bases ecológicas para clasificar áreas fitogeográficas*, IPGH.
- ALULEMA, R.; CRUZ, R.; OJEDA, F.; NOUVELOT, J.-F.; POURRUT, P.; RUIZ, G., 1986. *Proyecto acuífero de Quito. Informe final*. MAG-PRONAREG-EMAP-Q-INNERHI-ORTSOM, Quito.
- ARLÉRY, R.; GRISOLLET, H.; GUILMET, B., 1973. *Climatologie - Méthodes et pratiques*, Gauthier Villars, París.
- Atlas del Mundo*, 1982, Jeune Afrique y Banco Central del Ecuador, Quito.
- BALDIT, A. Les éléments météorologiques du climat, in *Traité de climatologie* de M. PIÉRY.
- BLANDÍN LANDÍVAR, C., 1977. *El clima y sus características en el Ecuador*, IPGH.
- BOULET, J.; LE GOULVEN, P.; POUPON, H., 1984. Metodologías aplicadas, in *Estudio integrado del Altiplano cundiboyacense*, Ediciones IGAC, Bogotá, 437 p., 17 fig., 20 cuadros, 9 anexos.
- BRUNET-MORET, Y., 1979. Homogénéisation des précipitations, in *Cahiers ORSTOM*, serie Hydrologie, Vol. XVI, nº 3 y 4, p. 147-170.
- CADIER, E.; POURRUT, P., 1979, Inventaire et détermination des données nécessaires à l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans le cadre d'une planification globale des ressources naturelles renouvelables. L'expérience de l'Équateur, in *Cahiers ORSTOM*, serie Hydrologie, Vol. XVI, nº 3 y 4, p. 171-207.
- CAÑADAS CRUZ, L., 1983. *El mapa bioclimatológico y ecológico del Ecuador*, MAG-PRONAREG-Banco Central del Ecuador.
- CADIER, É.; CRUZ, R.; POURRUT, P. & al., *Estudio hidrometeorológico e hidrogeológico preliminar*.
- de las cuencas de los ríos Pastaza, Chimbo y Chanchán, 1976, PRONAREG-ORSTOM, 3 Vol.
 - de las cuencas de los ríos Cañar, Paute y del Sur ecuatoriano, 1976, PRONAREG-ORSTOM, 3 Vol.
 - de las cuencas de los ríos Esmeraldas y del Norte ecuatoriano, 1977, PRONAREG-ORSTOM, 3 Vol.
 - de las cuencas del río Guayas, de los ríos de la Península y de Manabí, 1978, PRONAREG-ORSTOM, 2 Vol.
 - del Nor y Centro-Oriente de la región amazónica ecuatoriana, 1980, PRONAREG-ORSTOM, 1 Vol.
- CRUZ, R.; LEIVA, I.; NOUVELOT, J.-F.; POURRUT, P. & al., 1988. *Cuenca representativa del río Banchal. Memoria técnica*, informe interno MAG-ORSTOM, Quito
- DE NONI, G.; POURRUT, P.; VIENNOT, M. 1986. *Analyse de l'impact du Niño 1982-1983 sur le milieu morphodynamique instable de l'Équateur*, ponencia en el Coloquio « Climat et risques naturels », París, 5 y 6 de junio de 1986.
- DUBREUIL, P.; GUISCAFRÉ, J., 1971. Planification du réseau hydrométrique minimal, in *Cahiers ORSTOM*, serie Hydrologie, Vol. VIII, nº 2.
- GIRARD, G.; LAMACHÈRE, L.; VÉLEZ, 1985. *Aquifère de Quito - Modèle mathématique de gestion*, CIG, ENSMP-ORSTOM, París.
- HIEZ, G., 1977. L'homogénéité des données pluviométriques, in *Cahiers ORSTOM*, serie Hydrologie, Vol. XIV, nº 2, p. 129-172.
- Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI), 1961-1982, *Anuarios meteorológicos*, nº 1 a 22.
- LE GOULVEN, P.; GARCÍA, R., 1980. *Proposición metodológica de un estudio climatológico para el desarrollo, ejemplo del Altiplano cundiboyacense*, IGAC, Bogotá, 15 p. poligr.
- LE GOULVEN, P.; RUF, T.; RIBADENEIRA, H., 1987. *Méthodologie générale et détails des opérations du projet INNERHI-ORSTOM*. INNERHI-ORSTOM, Quito, 06/87, 91 p. + anexos (francés, español).
- LE GOULVEN, P., 1987. *Caracterización climática, metodología de la operación D3*, INNERHI-ORSTOM, Quito, 20 p. poligr.
- LE GOULVEN, P., 1988. *El vector YBM, resumen metodológico; programas V1, V2, V3, manual del usuario*, INNERHI-ORSTOM, Quito, 10/88, 14 p.
- LE GOULVEN, P.; SEGOVIA, A.; ALEMÁN, M., 1988. *Banque des données climatiques mensuelles (pluie, évaporation, température, insolation, humidité relative, vent) pour l'ensemble du réseau (un peu plus de 900 stations)*.
- LE GOULVEN, P.; ALEMÁN, M.; OSORNO, I., 1988. *Homogeneización y regionalización pluviométrica por el método del vector regional*, ponencia V Congreso Ecuatoriano de Hidráulica, Quito, 23-26/11/88, p. 59-83, (español, francés).
- LE GOULVEN, P.; ALEMÁN, M., 1990. *Logiciel CLIMAN (Climatic Monthly Analysis) de traitement des données contenues dans la banque climatique, écrit en langage FORTRAN*.
- NARANJO, P., 1981. *El clima del Ecuador*, Casa de la Cultura Ecuatoriana, Quito.
- NOUVELOT, J.-F., 1982. *Normas pluviométricas propuestas para el Ecuador*, PRONAREG-ORSTOM, Quito.
- NOUVELOT, J.-F., 1981. *Estudio hidrológico de cuencas vertientes de pequeñas y medianas áreas no equipadas de una red pluviométrica*, informe interno inédito, MAG-ORSTOM, Quito.
- NOUVELOT, J.-F.; POURRUT, P., 1984. El Niño. Phénomène océanique et atmosphérique. Importance en 1982-1983, in *Cahiers ORSTOM*, serie Hydrologie, Vol. XXI, nº 1, 1984-1985, p. 39-67.
- NOUVELOT, J.-F.; POURRUT, P.; BURBANO, F.; CRUZ, R., VILLACRÉS, H., & al, 1987. *Estudios hidrológicos de la cuenca representativa del río Tinto (Guayas)*. MAG-INNERHI-ORSTOM, Quito.
- PHILANDER, S.G.H. *El Niño southern oscillation phenomema*, NOAA/Geophys., fluid dynam. labo., Princeton University.
- POURRUT, P., 1983. Los climas del Ecuador. Fundamentos explicativos, in *Documentos de investigación*, nº 4, CEDIG-IPGH-ORSTOM, Quito, p. 8-43.
- POURRUT, P., 1982. Clima, in *Atlas del mundo*, Jeune Afrique y Banco Central del Ecuador, p. 17-20.
- POURRUT, P., 1986. Algunas consideraciones acerca de los fenómenos climáticos extremos observados en el Ecuador, Actas del Coloquio Ecuador 86, *Revista Cultura*, Vol. VIII, nº 24, Banco Central del Ecuador, Quito.

- POURRUT, P.; ARANYOSSY, J.-F., 1988. Nappe aquifère de Quito (Équateur) : caractéristiques générales, réponse à l'exploitation et perspectives, in *Hydrologie continentale*, Vol. III, n° 1, p. 41-56.
- POURRUT, P.; LEIVA, I., 1989. Las lluvias de Quito : características generales, beneficios y problemática, in *Estudios de Geografía*, Vol. II, Quito
- POURRUT, 1992. ENSO en Équateur : incidence sur les pluies, les écoulements et le milieu, resumen extenso, Simposio « Paleo Enso Records », Lima, p. 235-262.
- TRAVAGLIO, M., 1988. *Étude de l'abatement des pluies*, informe interno inédito.
- WIRTKY, K., 1979. El Niño, in *La Recherche*, n° 106, p. 1211-1220.

Abreviaciones y siglas utilizadas

BURGEAP: *Bureau d'Études de Géologie Appliquée*
(Oficina de Estudios de Geología Aplicada)

CEDEGE: Centro de Estudios para el Desarrollo de la
Cuenca del Guayas

CREA: Centro de Reconversión Económica del
Azuay, Cañar y Morona Santiago

CRM: Centro de Rehabilitación de Manabí

DAC: Dirección de Aviación Civil

DGH: Dirección General de Hidrocarburos

DGGM: Dirección General de Geología y Minas

DNA: Dirección Nacional Agrícola

EMAP-Q: Empresa Municipal de Agua Potable - Quito

EN, ENSO: El Niño

IGM: Instituto Geográfico Militar

IMQ: Ilustre Municipio de Quito

INAMHI: Instituto Nacional de Hidrología y
Meteorología

INCRAE: Instituto de Colonización de la Región Ama-
zónica Ecuatoriana

INECEL: Instituto Ecuatoriano de Electrificación

INERHI: Instituto Ecuatoriano de Recursos
Hidráulicos

INGALA: Instituto Nacional Galápagos

IPGH: Instituto Panamericano de Geografía e Historia

Contenido

	página		página
ÍNDICE	iii	III. Las grandes clases de climas del Ecuador	21
PRESENTACIÓN	v	1. Región costanera	21
PREÁMBULO	vii	2. Región andina	21
A MANERA DE INTRODUCCIÓN	ix	3. Región amazónica	23
		4. Región insular.....	23
Artículo I		Artículo IV	
ESTUDIOS HIDROCLIMATOLÓGICOS: MARCO, CRÓNICA Y ASPECTOS METODOLÓGICOS SUCINTOS	1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y REGIONALIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES EN EL ECUADOR	27
I. Lugar del hidrólogo en el contexto de los estudios realizados por el ORSTOM en cooperación con el Ecuador	1	I. Normas pluviométricas aplicables en el Ecuador	
II. Estudios específicos	1	1. Objetivo y metodología	27
III. Breves referencias metodológicas relativas al inventario inicial de los recursos hídricos	2	2. Alturas pluviométricas anuales	28
IV. Conclusión	6	2.1. Zonificación de las pluviometrías	28
		2.2. Relaciones entre alturas pluviométricas anuales medias y medianas.....	32
Artículo II		2.3. Estimación de las alturas pluviométricas anuales de frecuencia rara	33
FACTORES CONDICIONANTES DE LOS REGÍMENES CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS	7	2.4. Estimación de los totales pluviométricos anuales de una frecuencia cualquiera ..	33
I. Consideraciones generales	7	2.5. Precisión de los resultados	34
II. Descripción de los agentes responsables de los regímenes hidroclimáticos	8	3. Alturas pluviométricas diarias.....	34
1. La latitud y la longitud	8	3.1. Zonificación de las lluvias diarias	34
2. El relieve y las condiciones geográficas	8	3.2. Relaciones entre alturas pluviométricas diarias y anuales de igual frecuencia	37
3. El océano Pacífico y las corrientes oceánicas.....	9	3.3. Observaciones sobre la precisión de los resultados y la forma de las distribuciones.....	41
III. Modo de acción de los factores que condicionan los regímenes hidroclimáticos	9	4. Intensidades pluviométricas	41
1. Papel de la latitud y de la longitud	9	4.1. Método empleado	41
2. Papel del relieve	11	4.2. Síntesis de los resultados del estudio de las intensidades.....	52
3. Papel del océano Pacífico y de las corrientes oceánicas.....	11	II. Regionalización mensual de las precipitaciones en el Norte ecuatoriano	
IV. Conclusión: acción de conjunto de los diferentes factores	12	1. Problemática	
		1.1. Marco general del estudio	55
Artículo III		1.2. La equidad hidrológica y su importancia	55
CLIMA DEL ECUADOR		1.3. Regionalización climática preliminar (necesidad y objetivos).....	55
I. Introducción	13	2. Metodología	
II. Valores de algunos de los principales elementos climáticos	14	2.1. Estudios anteriores y red.....	56
1. Duración anual de la insolación	14	2.2. Zonas pseudo-proporcionales y vectores representativos.....	56
2. Las temperaturas	14	2.3. Programa CLIMAN	56
3. Las precipitaciones	14	2.4. Clima y altitud	57

3. Aplicación a la cuenca del Mira	
3.1. Características generales.....	57
3.2. Homogeneización de las series pluviométricas.....	58
3.3. Relaciones lluvia-altitud.....	60
3.4. Regionalización.....	61
4. Los vectores y su utilización en el proyecto INERHI-ORSTOM	
4.1. Regionalización de la ETP.....	64
4.2. Cálculo de las necesidades actuales.....	64
4.3. Estimación de las necesidades futuras..	64
4.4. Modelo lluvia-caudal.....	65
4.5. Cálculo de los recursos disponibles en las tomas.....	65
5. Otras utilidades posibles	
5.1. Diagnóstico de la red.....	65
5.2. Clasificación y caracterización climática.....	65
III. Conclusiones.....	66

**Artículo V
ANOMALÍAS Y FENÓMENOS CLIMÁTICOS
EXTREMOS**

I. Aspectos climáticos generales específicos al Ecuador.....	67
II. El fenómeno El Niño	
1. Descripción, causas y efectos.....	67
2. El Niño 1982-1983.....	69
III. Decrecimiento de las precipitaciones en la región litoral.....	73
IV. Conclusiones.....	76

**Artículo VI
ESTIMACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS
SUPERFICIALES DE AGUAS ALTAS Y
ANÁLISIS DE LAS RELACIONES
LLUVIA-ESCORRENTÍA.....**

I. Evaluación de las aguas altas en las estaciones de la red.....	78
II. Estudios de las aguas altas realizados en cuencas vertientes representativas o experimentales.....	81
1. La hoya de Quito.....	83
1.1. Equipamiento de la cuenca.....	83
1.2. Operación de las redes.....	85
1.3. Efecto de la urbanización y relación entre las lluvias y el escurrimiento superficial.....	87
2. Cuenca vertiente representativa del río Banchal.....	88
2.1. Equipamiento de la cuenca.....	90
2.2. Operación de la red.....	90

2.3. Aguas altas y relaciones entre las lluvias y la escorrentía.....	92
3. Cuenca vertiente representativa del río Tinto.....	96
3.1. Equipamiento de la cuenca.....	96
3.2. Operación de la red.....	98
3.3. Estudio de las crecidas y las relaciones lluvias-escorrentía.....	99

**Artículo VII
LOS RÉGIMENES HIDROLÓGICOS
ECUATORIANOS**

I. Factores condicionantes de los regímenes hidrológicos y de las características de las redes hidrográficas.....	103
II. Clasificación de los regímenes hidrológicos y descripción de las principales características de las redes hidrográficas.....	103
1. Régimen pluvial tropical semi-húmedo de la región litoral.....	103
2. Régimen pluvial tropical muy húmedo de la región septentrional.....	104
3. Régimen pluvial tropical árido de la costa meridional.....	104
4. Régimen pluvial tropical complejo de la cuenca del Guayas.....	105
5. Régimen pluvial tropical húmedo de la vertiente occidental.....	105
6. Régimen pluvio-nival interandino.....	106
7. Régimen pluvial andino meridional con influencia oriental.....	106
8. Régimen glacio-nival de montaña.....	106
9. Régimen pluvial persistente muy húmedo de la región amazónica.....	107
III. Conclusión.....	107

A MANERA DE CONCLUSIÓN.....

BIBLIOGRAFÍA.....

ABREVIACIONES Y SIGLAS UTILIZADAS.....

CONTENIDO.....	115
LISTA DE FIGURAS.....	117
LISTA DE CUADROS.....	118
LISTA DE MAPAS.....	118

Lista de figuras

		página			página
Figura 1 -	Esquema de las principales corrientes marinas del océano Pacífico	10	Figura 19 -	Portoviejo: valores anuales, medias móviles, tendencia	75
Figura 2 -	Posición habitual de la corriente de Humboldt y del Frente Ecuatorial.....	10	Figura 20 -	Guayaquil: valores anuales, medias móviles, tendencia.....	75
Figura 3 -	Red de referencia y zonificación pluviométrica	26	Figura 21 -	Milagro: valores anuales, medias .. móviles, tendencia.....	76
Figura 4 -	Alturas pluviométricas anuales (zonas nº 1, 2 y 3) — ábacos.....	35	Figura 22 -	Variación del coeficiente de escurrimiento superficial en función de la superficie, de la permeabilidad de la cuenca y de las precipitaciones anuales	80
Figura 5 -	Alturas pluviométricas anuales (zonas nº 4, 5 y 6) — ábacos.....	36	Figura 23 -	Variación del caudal máximo de crecida en función del coeficiente de escurrimiento superficial y de la superficie de la cuenca.....	80
Figura 6 -	Alturas pluviométricas diarias (zonas nº 1, 2 y 3) — ábacos.....	39	Figura 24 -	Variación del caudal de base en función del caudal máximo de crecida, de la permeabilidad de la cuenca y de las precipitaciones anuales	80
Figura 7 -	Alturas pluviométricas diarias (zonas nº 4, 5 y 6) — ábacos.....	40	Figura 25 -	Red de observación hidrometeorológica y lluvias anuales en Quito	84
Figura 8 -	Quito-Observatorio (curvas altura-frecuencia; altura-duración-frecuencia). Zona nº 3: estimación de las constantes para el cálculo de las intensidades (ábaco)	43	Figura 26 -	Aguaceros y crecidas del 30 de agosto de 1983	89
Figura 9 -	Estimación de las constantes para el cálculo de las intensidades	53	Figura 27 -	Cuenca vertiente representativa del río Banchal. Mapa de base y equipamiento	91
Figura 10 -	Cuenca del Mira - Oro-hidrografía. Estaciones pluviométricas y meteorológicas	58	Figura 28 -	Cuenca vertiente representativa del río Banchal. Isoyetas 1982	93
Figura 11 -	Homogeneización de series cronológicas	59	Figura 29 -	Cuenca vertiente representativa del río Banchal. Isoyetas 1983.....	94
Figura 12a -	Cuenca del Mira. Parte nor-este. Relaciones lluvia-altitud.....	60	Figura 30 -	Cuenca vertiente representativa del río Banchal. Estudio de las crecidas y de las relaciones lluvia-escorrentía	95
Figura 12b -	Cuenca del Mira. Parte oeste y sudeste. Relaciones lluvia-altitud.....	61	Figura 31 -	Cuenca vertiente del río Tinto. Mapa de base y equipamiento	97
Figura 13 -	Cuenca del Mira. Isoyetas promedio anuales. Zonas pluviométricas pseudo-proporcionales	63	Figura 32 -	Cuenca vertiente del río Tinto (Isoyetas anuales 1981-1982).....	100
Figura 14 -	Cuenca del Mira. Repartición estacional de las precipitaciones en las 8 regiones pseudo-proporcionales	64	Figura 33 -	Cuenca vertiente del río Tinto (Isoyetas anuales 1982-1983)	100
Figura 15 -	Alturas pluviométricas anuales. 1965-1978	72	Figura 34 -	Cuenca vertiente del río Tinto Hidrograma estándar.....	101
Figura 16 -	Alturas pluviométricas anuales. El Niño, octubre de 1982 - septiembre de 1983.....	72	Figura 35 -	Cuenca vertiente del río Tinto Estudio de crecidas	102
Figura 17 -	Quito: valores anuales, medias móviles, tendencia.....	74	Figura 36 -	Principales regímenes hidrológicos del Ecuador.....	entre 104 y 105
Figura 18 -	Machala: valores anuales, medias móviles, tendencia	74			

Lista de cuadros

	página		página
Cuadro 1 - Insolación	14	Cuadro 10 - Características del riego	
Cuadro 2 - Temperatura del aire	15	en el Mira.....	59
Cuadro 3 - Totales pluviométricos mensuales (mm) — 1964-1978.....	20	Cuadro 11 - Coeficientes de correlación estaciones - vectores	62
Cuadro 4 - Principales características generales de los climas del Ecuador	22	Cuadro 12 - Estaciones de estudio de las crecidas	82
Cuadro 5 - Alturas pluviométricas anuales (mm).....	29	Cuadro 13 - Características de las crecidas	82
Cuadro 6 - Alturas pluviométricas anuales (mm).....	31	Cuadro 14 - Río Banchal d.j. Guabas. Caracterización de algunas crecidas simples.....	92
Cuadro 7 - Alturas pluviométricas diarias (mm).....	38	Cuadro 15 - Río Tinto. Valores característicos de cuatro crecidas de tendencia unitaria	99
Cuadro 8 - Intensidades y alturas pluviométricas en 24 estaciones pluviográficas.....	44-51	Cuadro 16 - Valores característicos de las estaciones hidrométricas representativas de los diversos regímenes hidrológicos	108
Cuadro 9 - Constantes para el cálculo de las intensidades y alturas pluviométricas (en mm)	54		

Lista de mapas

	página
Módulos específicos anuales.....	4
Isotermia anual (período 1964 - 1973)	18
Pluviometría anual (período 1965 - 1978).....	19
Repartición de los principales climas	24

1. *J. León V., A.L. Moya, P. Peltre (coordinadores),*
FLUJOS GEOGRAFICOS EN EL ECUADOR:
intercambios de bienes, personas e información

1. *El pan que comemos es estadounidense*
J. Peltre-Wurtz
2. *Flujos de productos alimenticios y mercados en el Ecuador*
A. L. Moya
3. *Flujos de la madera en el Ecuador*
J. Lucero; T. Quintana
4. *Flujos portuarios en el Ecuador*
B. Carrera
5. *Espacios demográficos y redes migratorias*
D. Delaunay
6. *Los intercambios internacionales del Ecuador: su significación geopolítica*
M. Portais

2. *Pierre Peltre (coordinador),*
RIESGOS NATURALES EN QUITO:
lahares, aluviones y derrumbes del Pichincha y del Cotopaxi

1. *La catástrofe del Nevado del Ruiz. ¿Una enseñanza para el Ecuador? El caso del Cotopaxi*
R. D'Ercole
2. *Las lluvias de Quito: características generales, beneficios y problemática*
P. Pourrut; I. Leiva
3. *Quebradas y riesgos naturales en Quito, período 1900-1988*
P. Peltre

3. *Henry Godard (coordinador),*
CRECIMIENTO DE QUITO Y GUAYAQUIL:
estructuración, segregación y dinámica del espacio urbano

1. *El medio físico de Quito*
M. A. Fernández de Castro
2. *Los hospitales de Quito: caracterización histórico-geográfica*
C. Hermida Bustos; M. E. Castelo
3. *La red bancaria quiteña: evolución y migración geográficas (1950-1987)*
P. Cazamajor d'Artois; H. Godard
4. *Estructura y dinámica de los centros de Quito y de Guayaquil*
H. Godard
5. *Quito, Guayaquil: ensayo sobre la arquitectura contemporánea (1950-1988)*
M. S. Bock
6. *La influencia de los materiales de construcción importados sobre la arquitectura de Guayaquil*
J. Salomón Hurtado
7. *La permanente debilidad del poder municipal: el caso de Guayaquil*
G. Villavicencio Loor
8. *La tenencia de la tierra urbana en Guayaquil*
M. Rojas

4. *Patricia Mothes (coordinadora),*
**EL PAISAJE VOLCÁNICO DE LA SIERRA ECUATORIANA:
geomorfología, fenómenos volcánicos y recursos asociados**

1. *El volcanismo Plio-Cuaternario en los Andes del Ecuador*
Minard L. Hall y Bernardo Beate
2. *El paisaje interandino y su formación por eventos volcánicos de gran magnitud*
Patricia Mothes y Minard Hall
3. *Evaluación de los peligros volcánicos y su mitigación en la República del Ecuador*
Christa von Hillebrandt
4. *Suelos volcánicos en el Ecuador*
José Espinosa
5. *Posibles aplicaciones de las rocas volcánicas y piroclásticas en el Ecuador*
Halina Lachowics
6. *La Geotermia: conceptos generales, aplicaciones y estado actual en el Ecuador*
Bernardo Beate
7. *Naturaleza y Geografía ecuatoriana como elemento a considerarse en el desarrollo de una reserva de recursos*
Juan Black y Cecilia Solís

5. *Freddy López (coordinador),*
**GEOGRAFÍA AGRARIA:
esbozos de la problemática agraria en el Ecuador**

1. *¿"Agribusiness" estímulo del desarrollo?: el caso de la economía lechera en los Andes ecuatorianos*
Toni Breuer
2. *Big Boss, los vencidos y los compadres: etnografía del poder y de la contestación en una gran plantación agrícola (región de Santo Domingo de los Colorados)*
Charles-Édouard de Suremain
3. *Los sistemas agrícolas de Alchipichí-Puëllaro*
Mario E. Andino E.
4. *Ensayo de análisis histórico, social y económico de la cangahua en el Ecuador*
Georges de Noni, Germán Trujillo, Marc Viennot
5. *Sistemas de producción y regionalización del proceso agropecuario nacional*
Gustavo Sotalín Q.

6. *René Marocco (coordinador),*
**EL CONTEXTO GEOLÓGICO DEL ESPACIO FÍSICO ECUATORIANO
neotectónica, geodinámica, volcanismo, cuencas sedimentarias, riesgo sísmico**

1. *La Neotécnica. Ejemplos en el Ecuador*
Alain Lavenu
2. *Paleosismicidad de la ciudad de Quito (Ecuador) a través del análisis de la paleolicuación cuaternaria*
Víctor Hugo Pérez, et al.
3. *Tefrostratigrafía holocénica de los volcanes principales del valle interandino, Ecuador*
Minard L. Hall y Patricia A. Mothes
4. *Los conglomerados El Morro: hacia su redefinición*
Jorge Toro Alava y René Marocco
5. *Las cuencas sedimentarias, un aporte al conocimiento de una cadena montañosa*
René Marocco
6. *El uso de la teledetección en geología: alcances y límites*
Gérard Laubacher
7. *El proyecto de reducción del riesgo sísmico en la ciudad de Quito*
H. Yepes, et al.

EL AGUA EN EL ECUADOR

Editor científico:
Pierre Pourrut
(ORSTOM)

No existe en el Ecuador recurso más importante que el agua

La presente síntesis resume un enorme trabajo de inventario y análisis regional realizado a partir de 1975 por equipos de investigadores y técnicos del MAG, del INERHI, del INAMHI y del ORSTOM (Francia).

Su primera ambición es presentar un texto de referencia para hidrólogos y geógrafos, profesionales o estudiantes y para el público culto en general.

Su otro propósito es dar a conocer los avances de las investigaciones sobre el papel de los agentes responsables de problemas hídricos o climáticos específicos.

1. *Estudios hidroclimatológicos: marco, crónica y aspectos metodológicos.*
2. *Factores condicionantes de los regímenes climáticos e hidrológicos.*
3. *Clima del Ecuador.*
4. *Análisis estadístico y regionalización de las precipitaciones en el Ecuador.*
5. *Anomalías y fenómenos climáticos extremos.*
6. *Estimación de los escurrimientos superficiales de aguas altas y análisis de las relaciones lluvia-escorrentía.*
7. *Los regímenes hidrológicos ecuatorianos.*

Con este séptimo volumen, la Corporación Editora Nacional, el Colegio de Geógrafos del Ecuador y el *Institut Français de Recherche Scientifique Pour le Développement en Coopération* (ORSTOM) prosiguen la colección «Estudios de Geografía» que da cuenta de los significativos avances investigativos desarrollados en esta disciplina y en disciplinas afines en nuestro país, especialmente por los miembros del Colegio de Geógrafos y el ORSTOM.