

## 第5章 地下水ポテンシャル

### 5.1 水理地質解析

#### (1) 帯水層の分類と水理特性

##### (a) 帯水層の分類

調査対象地域では、過去の調査の地質分類に従って帯水層の分類を行なっている。本調査でも、これに従い、地質分類を帯水層の分類とする。既往調査結果に基づき、帯水層の分類と単純化した特徴を表 5-1 に示す。

表 5-1 調査対象地域における帯水層区分

時代区分		地層名	岩層	一般的透水性
第四紀	完新世	沖積層	粘土、シルト、砂、砂礫	高～低
	更新世	Terraza 層	粘土、砂質粘土、砂	中～低
		Sabanna 層	粘土、砂質粘土、砂	中～低
		Tilata 層	固結砂礫、固結砂、固結シルト、固結粘土	高
第三紀	漸進世	Usme 層	粘土岩	低
	始新世	Regadera 層	砂岩、礫岩、粘土岩	低
		Bogotá 層	粘土岩、シルト岩、砂岩	中～低
	暁新世	Cacho 層	砂岩、礫岩	高
		Guaduas 層	粘土岩、頁岩	中～低
白亜紀		Guadalupe 層群	砂岩、シルト眼、頁岩	高～低
		Chipaque 層	頁岩、砂岩	中～低

##### (b) 帯水層の性状

ボゴタ平原の帯水層は、大きく3つ帯水層に区分されている。即ち、第四紀帯水層、第三紀帯水層および白亜紀帯水層である。これら3つの地層は透水性層と不透水層の複雑な互層であり、帯水層となる地層は透水性の地層に限られている。また、帯水層の大部分は、地表に露出している涵養部分を持っているため、不圧帯水層と被圧帯水層の両者の性質を持っている。

##### 第四紀層帯水層

現在、ボゴタ平原に存在する井戸から大量に揚水されている地下水は、主に Savana 層中に介在する砂礫層の中の地下水である。第四紀層は粘土質な地層が主体であるが、その中に含まれた砂層および礫層が部分的に帯水層を形成している。これらの砂層や礫層は、層厚や連続性に乏しく、また、様々な深度に分かれて存在しているものと推定される。また、それぞれの砂層・礫層が異なる地下水位を持っており、井戸で観測される地下水位は、通常は異なる地下水位が合成されたものと考えられることができる。

##### 第三紀層

第三紀層は主に粘土質な地層が主体であるが、その中に介在する小規模な砂礫層が帯水層となっている。しかし、この帯水層は規模が小さいため、大規模な地下水開発の対象とは成り難い。

##### 白亜紀層

白亜紀層は Guadalupe 層群と Chipaque 層からなる。このうち、Guadalupe 層群には透水性の砂岩層が介在し、帯水層として優れている。一方、Chipaque 層は主に頁岩からなる。Guadalupe 層群は以下に示す3つの層で構成されている。即ち、a) Labor Tierna 層、b) Plaeners 層および c) Renisca Dura 層である。

3つに区分された Guadalupe 層群の中で、最も上位に位置する Labor Tierna 層は、主に透水性の砂岩で構成されており、帯水層として優れている。一方、中位に位置する Plaeners 層は不透水性の頁岩からなり、帯水層として期待できない。最も下位に位置する Arenisca Dura 層は砂岩・頁岩の互層であり、Labor Tierna 層よりも透水性が劣る。したがって、Guadalupe 層群の中で、最も上位に位置する Labor Tierna 層が地下水開発の対象として期待され、次いで Arenisca Dura 層が期待される。

##### (c) 水理地質構造

調査対象域の水理地質構造は調査地域の複雑な地質構造に強く支配され、帯水層の分布・連続性は、褶曲構造・断層の存在に影響されている。第四紀帯水層、第三紀帯水層、白亜紀帯水層ともに被圧帯水層

を形成していると考えられる。第四紀層の表層部分には不圧帯水層が存在しうるが、その規模は小さい。第四紀層の主要帯水層となっている Savana 層および Tilata 層の砂礫質な部分は、不透水性の部分に挟まれているため、その地下水は被圧状態となっている。

一方、第三紀層と Guadalupe 層中に存在する帯水層（砂質部分）も、上位に厚く堆積した不透水性の地層によって、その地下水は強く被圧されている。第四紀帯水層、第三紀帯水層、白亜紀帯水層ともにその自然地下水位は GL-20m ~ GL-50m 程度と推定されており、各帯水層の分布深度は大きく異なるが、その自然地下水位は似通っている。これは3つの帯水層の間に水理的連続性があることを示している。

**(d) 地下水涵養メカニズム**

**第四紀層および第三紀層地下水涵養メカニズム**

第四紀帯水層は、山麓堆積物、平地部分、河川流路を通じて地下水の涵養を受けている可能性が高い。地表面から浸透した雨水が土壌を浸透し、不透水性の地層を通過して地下深部に存在する帯水層に到達しているものと推定される。

**白亜紀層地下水涵養メカニズム**

白亜紀層はボゴタ平原の外周部分に山地を形作っているが、ボゴタ平原の中央部ではこれらの地層は褶曲・断層によって地下深部に潜りこんでいる。したがって白亜紀層の主要な涵養域はボゴタ平原を取り囲んでいる外周山地部分であり、山地部で涵養された地下水は帯水層内をボゴタ平原の深部に向かって流動しているものと推定される。また、第三紀層、第四紀層の分布域の一部でも地表で降雨から涵養された地下水が第四紀層、第三紀層を通じて白亜紀層へ浸透していると推定される。

**(e) 帯水層パラメータ**

調査対象地域において過去に実施された揚水試験結果の中から、信頼性の高いと判断される試験結果を用いて帯水層パラメータの分析を行なった。その結果を以下に示す。

**第四紀層の水理パラメータ**

揚水試験結果による第四紀層の揚水量、比湧出量、透水量係数、透水係数、貯留係数は広い範囲に分布し、その分布はすべて対数正規分布で近似できる。また、比湧出量と透水量係数は高い相関をもち、この関係を用いて比湧出量から透水量係数の概略推定が可能である。表 5-2に揚水試験結果をまとめて示す。

**Guadalupe の水理パラメータ**

揚水試験結果による Guadalupe 層の、揚水量、比湧出量、透水量係数、透水係数、貯留係数は広い範囲に分布し、その分布はすべて対数正規分布で近似できる。また、比湧出量と透水量係数の相関はあまり高くない。表 5-2に揚水試験結果をまとめて示す。

**表 5-2 帯水層の水理パラメータ**

パラメータ	第四紀帯水層		Guadalupe 層	
	範囲	代表的値	範囲	代表的値
揚水量 (m <sup>3</sup> /day)	30 - 1500	150 - 250	50 - 7000	150 - 1000
比湧出量 (m <sup>3</sup> /day/m)	1 - 500	4 - 30	1 - 1000	10 - 120
透水量係数 (m <sup>2</sup> /day)	1.5 - 250	4 - 15	1 - 1000	15 - 150
透水係数 (m/day)	0.01 - 10.0	0.15 - 1.0	0.05 - 10.0	0.5 - 1.0
貯留係数 (-)	10 <sup>-7</sup> - 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-5</sup> - 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-9</sup> - 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-7</sup> - 10 <sup>-3</sup>

**(2) 水理地質図の作成**

本調査において、各種調査の結果を総合し GIS によって水理地質図を作成した。GIS によって作成した項目は、「帯水層の分布」、「帯水層の地下水位分布」、「帯水層の地下水涵養量分布」、「既存井戸の分布」、「帯水層の水理特性（透水係数、貯留係数）分布」、「地下水の水質分布」、その他である。

## 5.2 水収支解析と地下水涵養

水収支解析の目的は、ボゴタ平原における地下水涵養量を推定することである。水収支解析の実施に当たっては、既往水収支解析結果を分析・検討し、CAR、EAAB が所有する水文・気象データを利用した。水収支解析のアウトプットとして地下水涵養量を推定し、この地下水涵養量は地下水シミュレーションの入力データとして利用された。

### 5.2.1 水収支解析

#### (1) 水収支の計算法

流域からの流出量と降雨量の算出過程を図 5-1に示す。この算出過程に従って説明を行なう。

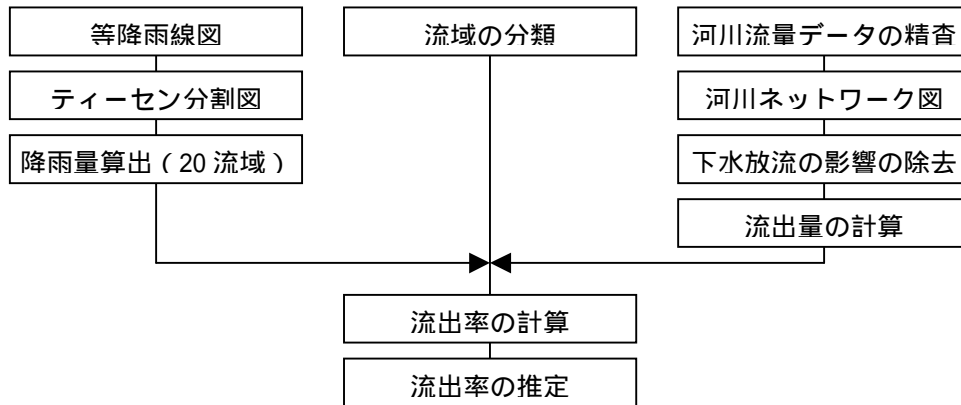


図 5-1 流出率算出過程

#### (2) 流域の分類

河川への流出は基本的に山地部で発生するという仮定のもと、各流域の地形特性(山地と平地の面積比率)と流出率には強い相関関係が成り立つものと考え、20 流域を山地/平地の比率により3つのグループに分類した(図 5-2参照)。河川流量データが適用できず流出量が算出できない流域は、同じグループに属する流域の流出率を適用するものとする。

表 5-3 流域の分類

グループ1	山地の比率が高い。主に支流域。河川データには開発の影響は少ない。
グループ2	山地と平地の比率は半々程度。農業地帯の支流域。河川データには灌漑取水の影響が大きい。
グループ3	平地の比率が高く、ボゴタ川の本流域。河川データには下水放流、上水への取水、灌漑用水取水の影響が大きい。

#### (3) 降雨量の算出

長期雨量観測結果から調査域の年等雨量線図を作成した。この等降雨線図から各流域の年降雨量を算出した。調査域全域の降雨量分布を図 5-4に示す。降雨量はグループ-1 の支流域が高く、Tujenlito 流域で年間平均降雨量は 941mm で最大となる。また、南西部を中心にした平地部で低く、Subachoque(1) 流域で 600mm と最低の値を示す。

#### (4) 河川ネットワーク図の作成

河川ネットワーク図を作成して流量データをプロットした。これをもとにボゴタ川の観測流量を上流から下流の Alcachin 観測所までプロットした(図 5-3参照)。この図から、ボゴタ川の流量には Tibitoc 浄水場への取水の影響、ボゴタ市街における下水放流の影響が強いことが読みとることができる。

#### (5) 下水放流の影響

下水放流の影響はボゴタ川(Bogotá(3)、Bogotá(4)流域)とTujenlito川で大きく、流出データから求めた見かけの流出量からその量を差し引く必要がある。下水の発生量は上水供給量の80%と仮定した。また、下水放流の配分は市街地の面積比率から、Bogotá(3)流域で79%、Bogotá(4)流域で9%、Tujenlito流域で12%とした(ただし、Tujenlito流域の面積当たりの給水量は他に比べ半分と仮定した)。下水放流の大半を占める Bogotá(3)流域を対象にボゴタ川の区間流量データおよび上水供給量を併せてプロットしてこの流域からの真の流出量を求めた。表 5-4にその結果を示す。

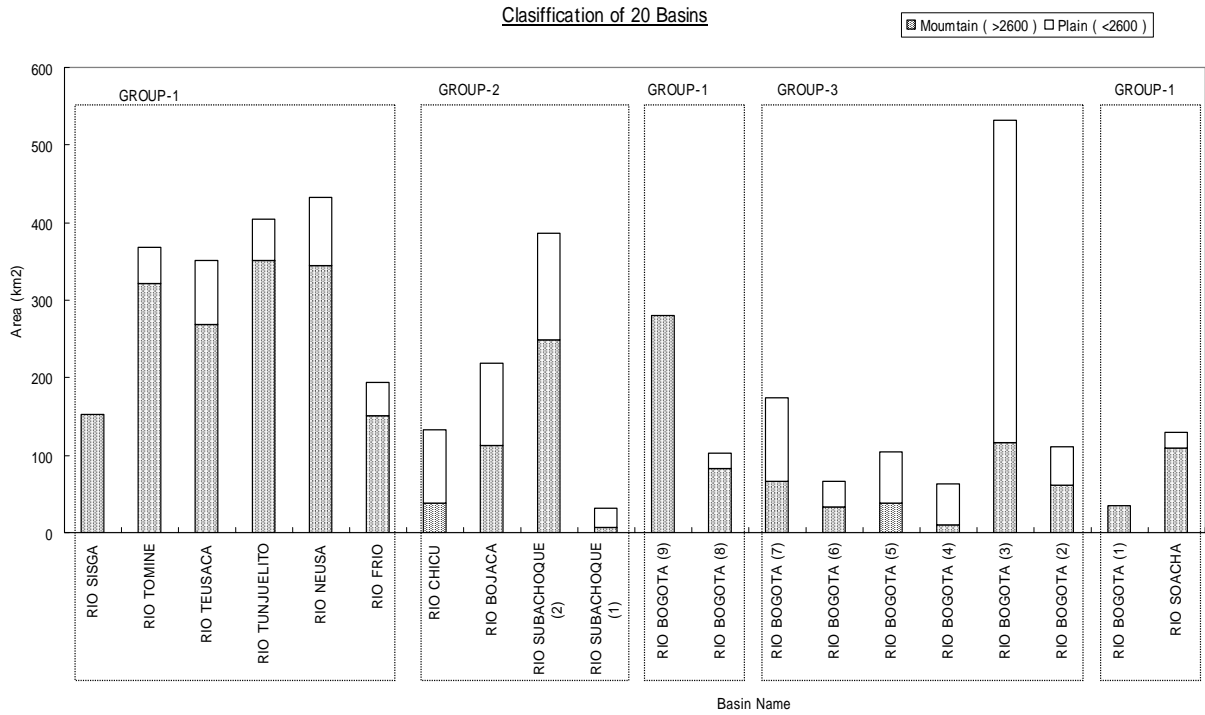


図 5-2 グループ別の地形特性 (山地/平地面積比率)

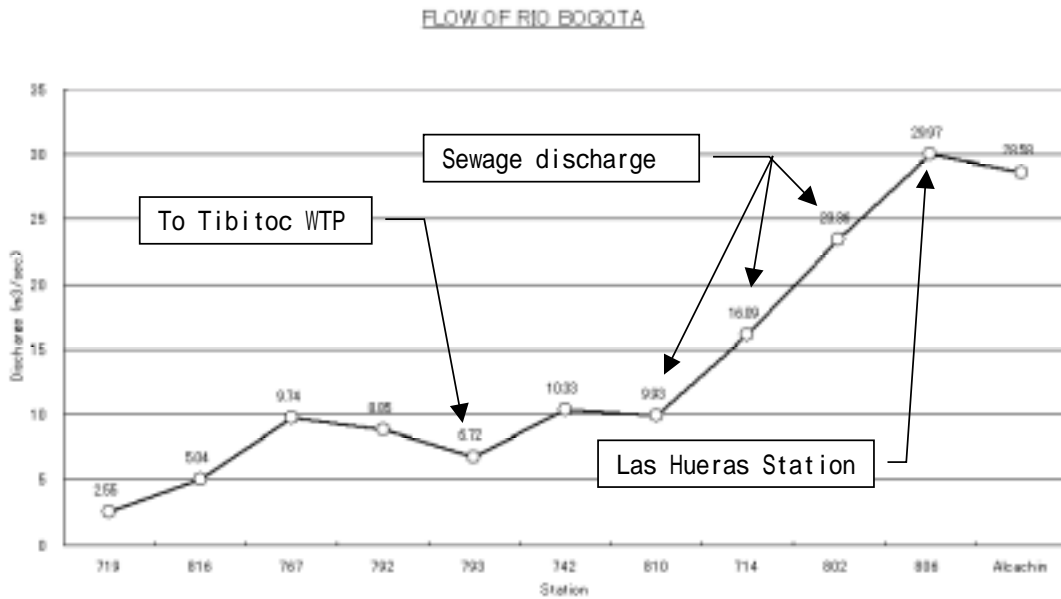


図 5-3 ボゴタ川流量曲線

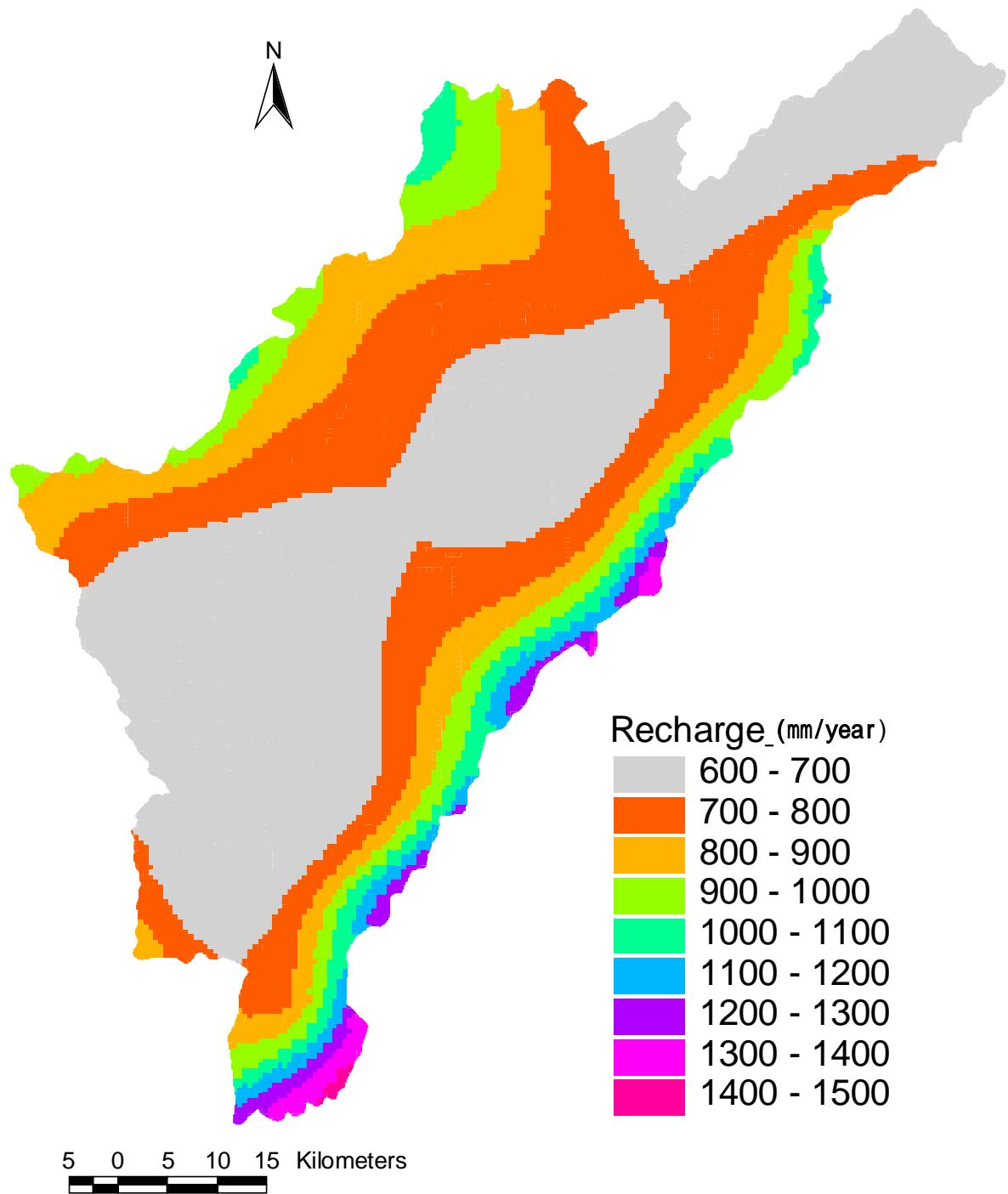


図 5-4 調査地域の年降雨量分布

表 5-4 下水放流量

流量データの適用期間： 1973年-1999年		
平均上水供給量： 12.8 m3/sec		
放流下水量	合計	10.24 m3/sec
	Bogotá(3)流域	8.09 m3/sec
	Tujenlito 流域	1.23 m3/sec
	Bogotá(4)流域	0.93 m3/sec
見かけの流出量	Bogotá(3)流域	13.15 m3/sec
	Tujenlito 流域	4.94 m3/sec
真の流出量	Bogotá(3)流域	5.06 m3/sec
	Tujenlito 流域	3.71 m3/sec

(6) 観測データがある流域の流出率の計算

各グループで流域ごとに得られた観測値から流域の流出率を計算し表 5-5に示す。グループ 2 と 3 は適用できる流量データが少なく、流出率が求められた流域は少ない。また Tujenlito 流域、Bogota(3)流域については見かけの流出率と、下水放流の影響を除いた実際の流出率を併記した。

表 5-5 流量データから求めた流出率

グループ	流域名	流出率
グループ - 1	RIO SIGSA	40.0%
	RIO TOMINE	34.0%
	RIO TUNJUELITO	30.7% (40.9%)
	RIO NEUSA	21.5%
	RIO BOGOTÁ (9)	39.9%
グループ - 3	RIO BOGOTÁ (5)	20.0%
	RIO BOGOTÁ (3)	41.0% (107.6%)

( ) 内数値は見かけの流出率

(7) 観測データがない流域の流出率の推定

流量観測データが少ないため流出率を算定できない流域に関して、地形特性が類似した他の流域の流出率を適用し流出率を推定した。

<グループ - 1>

グループ - 1 に属する観測所の流出率を図 5-5にプロットした。流域面積が小さいと流出率にばらつきが多いが流域面積が増えるに従い、流出率はある一定の値に落ち着く傾向が見られる。

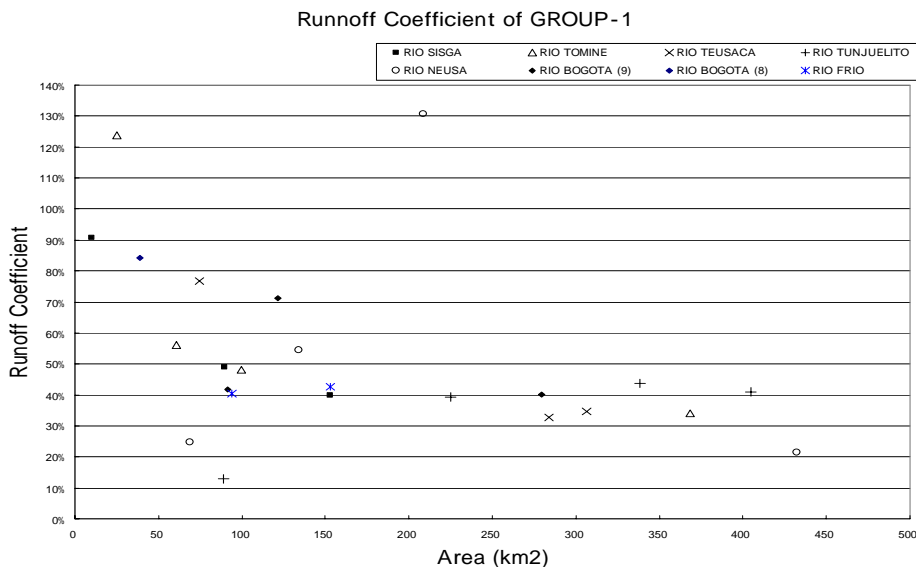


図 5-5 グループ-1の流出率

Approximate Curve of Runoff Coefficient in GROUP-1

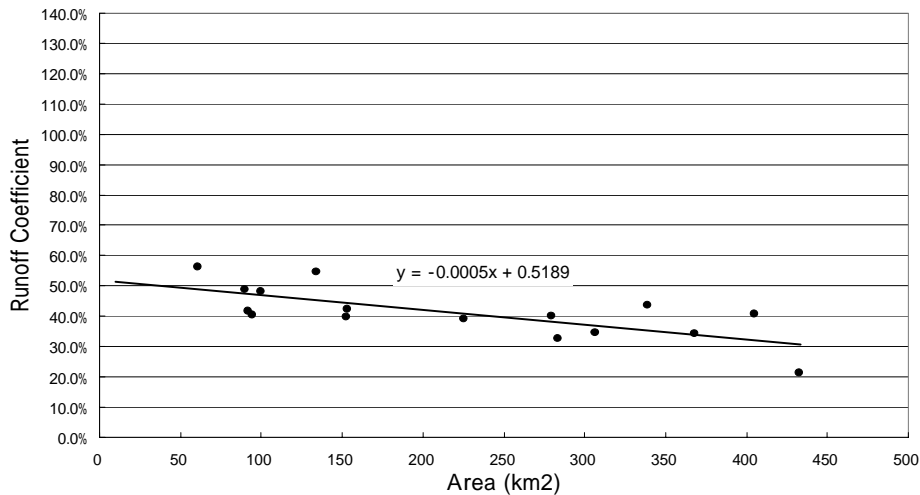


図 5-6 グループ-1 の流出率近似曲線

表 5-6 グループ-1 の流出率

Basin	Runoff Coefficient		
	Station Data	Approximate Formula $Y=-0.0005x+0.5183$	Applied Value
Sisga	39.8%	44.2%	39.8%
Tomine	34.2%	33.4%	34.2%
Teusaca	-	34.2%	34.2%
Tunjelito	30.7%(40.9%)	31.6%	30.7%
Neusa	21.5%	30.2%	30.2%
Frio	-	42.1%	42.1%
Bogota(9)	40.0%	37.9%	40.0%
Bogota(8)	-	46.7%	40.0%
Bogota(1)	-	50.1%	50.1%
Muna	-	45.4%	45.4%

<グループ - 2、3>

グループ - 2 と 3 は平地の面積比率が高い。表流水の流出は主に山地部で起こり、平地部での流出率は小さく流域面積に対する流出率変化もわずかであると考えられる。したがって平地部の流出率は流域面積に対して一定と仮定しグループ - 2 と 3 に属する流域の流出率を求めた。流出率算出の方法は以下の通りである。

観測流量データから流出率が求められたのは、Bogotá(3)流域と Bogotá(5)流域だけである。流出率が未知の流域に対して、流域の類似性に基づき上記 2 つの流域の流出率を適用した。

Bogotá(3)流域の面積は大きく、ボゴタ川を境に東側と西側では流域の状況が全く異なると判断し、流域を東側と西側の 2 つに分割(Bogotá(3)-E、Bogotá(3)-W)、それぞれの流出率を求めた。

グループ - 2 の Bojica 流域と Subachoque 流域は流域内を山地部と平地部に分け、山地部にはグループ - 1 で求めた近似式を適用し、平地部には Bogotá(5)流域の流出率 20%を採用した。

最終的に求められたグループ - 2 と 3 に属する流域の流出率は表 5-7 の通りである。なお、Bogotá(3)-E、Bogotá(3)-W、Bojiaca 流域、Subachoque(2)流域の流出率計算の詳細を図 5-7に示す。

表 5-7 グループ - 2 と 3 流域の流出率

	流域名	流出率	算出根拠
グループ - 2	RIO CHICU	20.0%	Bogotá(5)流域の値を採用
	RIO BOJACA	32.9%	図-7 計算による
	RIO SUBACHOQUE (2)	32.2%	図-7 計算による
	RIO SUBACHOQUE (1)	20.0%	Bogotá(5)流域の値を採用
グループ - 3	RIO BOGOTÁ (7)	20.0%	Bogotá(5)流域の値を採用
	RIO BOGOTÁ (6)	20.0%	Bogotá(5)流域の値を採用
	RIO BOGOTÁ (5)	20.0%	観測流量データから算出
	RIO BOGOTÁ (4)	41.0%	Bogotá(3)流域の値を採用
	RIO BOGOTÁ (3)-E	48.5%	図-7 計算による
	RIO BOGOTÁ (3)-W	20.0%	Bogotá(5)流域の値を採用
	RIO BOGOTÁ (2)	20.0%	Bogotá(5)流域の値を採用

最終的に求められた全流域の流出量を表 5-8に示す。

表 5-8 調査域の河川流出量

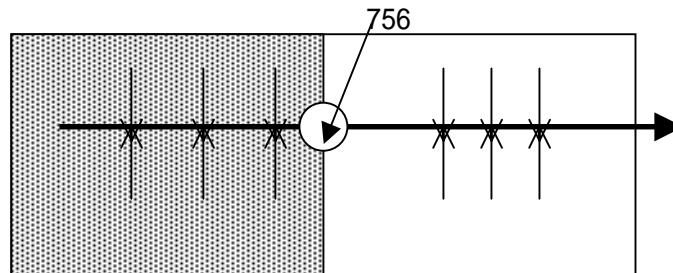
流域名	降雨量 (mm)	流出率 (%)	流出量 (m <sup>3</sup> /s)	流域名	降雨量 (mm)	流出率 (%)	流出量 (m <sup>3</sup> /s)
SISGA	913	40.0%	1.77	BOGOTÁ (8)	725	40.0%	0.95
TOMINE	873	34.0%	3.47	BOGOTÁ (7)	730	20.0%	0.80
TEUSACA	896	34.2%	3.42	BOGOTÁ (6)	772	20.0%	0.32
TUNJUELITO	941	30.7%	3.71	BOGOTÁ (5)	705	20.0%	0.47
NEUSA	850	30.2%	3.52	BOGOTÁ (4)	713	41.0%	0.58
FRIO	838	42.1%	2.18	BOGOTÁ (3)-E	770	48.5%	4.36
CHICU	752	20.0%	0.63	BOGOTÁ (3)-W	624	20.0%	0.65
BOJACA	755	32.9%	1.72	BOGOTÁ (2)	618	20.0%	0.44
SUBACHOQUE (2)	833	32.2%	3.28	BOGOTÁ (1)	722	50.1%	0.41
SUBACHOQUE (1)	600	20.0%	0.12	MUNA	727	45.4%	1.35
BOGOTÁ (9)	719	39.9%	2.54	-	-	-	-
平均	年間降雨量=802mm, 流出率=33.7%, 年間流出量=36.69 m <sup>3</sup> /s。ただし、ボゴタ平原出口の流量は、取水量と還元量を考慮すると、30.73 m <sup>3</sup> /s。また、域内発生 のボゴタ平原出口流量は、域外分の下水還元量を差し引いた 24.57 m <sup>3</sup> /s となる。 <灌漑・給水取水量: 16.20 m <sup>3</sup> /s> 灌漑等: 11.10 m <sup>3</sup> /s、上水取水: 5.10 m <sup>3</sup> /s <下水還元量: 10.24 m <sup>3</sup> /s> 域内分: 4.08 m <sup>3</sup> /s、域外分: 6.16 m <sup>3</sup> /s						



**Runoff Coefficient Estimation**

in Bojaca, Subachoque(2), Bogotá(3) basins

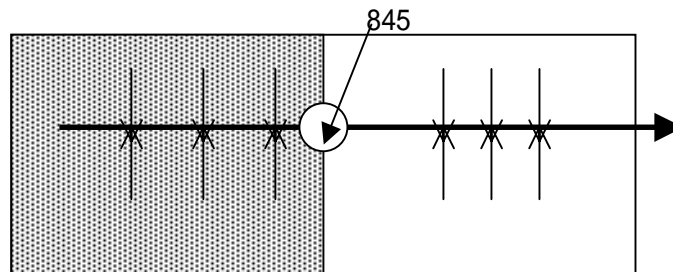
**Rio Bojica Basin:**



Runoff coefficient

47% (mountain) 20% (plain) **32.9%(total)**

**Rio Subachoque(2) Basin:**

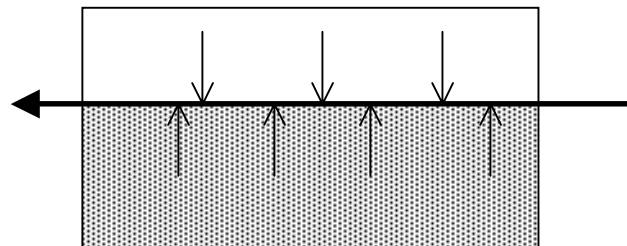


Runoff coefficient

41% (mountain) 20% (plain) **32.2%(total)**

**Rio Bogotá(3) Basin:**

Rio Bogotá(3) -W



Runoff coefficient

	Rio Bogotá(3)-E	
	Rio Bogotá(3)-W	20% (plain)
	Rio Bogotá(3)-E	<b><u>48.5%</u></b>
	Rio Bogotá(3) Total	41.4%

図 5-7 Bojaca、Subachoque(2)、Bogotá(3)流域の流出率算定

## 5.2.2 地下水涵養量

### 地下水涵養量を算定する基礎式

調査対象地域の地下水は、山地・丘陵部、平地部、河川において降雨から涵養され、徐々に地下深部の帯水層に浸透していくものと推定される。本調査では地下水涵養量を水収支解析によって求めた。今回使用した水収支式を下に示す。

$$P - ETR + (D_2 - D_1) + (G_1 - G_2) - U = \Delta S_s + \Delta S_w + \Delta H_s \quad (1) \text{式}$$

ここで、

P :	降雨量 (mm)
ETR :	実蒸発散量 (mm)
G <sub>1</sub> :	流域への表流水流入 (mm)
G <sub>2</sub> :	流域からの地表水流出 (mm)
D <sub>1</sub> :	流域への地下水流入 (mm)
D <sub>2</sub> :	流域からの地下水流出 (mm)
U :	流域における水消費 (mm)
ΔS <sub>s</sub> :	表流水貯留の増加 (mm)
ΔS <sub>w</sub> :	地下水貯留の増加 (mm)
ΔH <sub>s</sub> :	土壌水分の増加 (mm)

地表に到達した降雨が土壌に浸透し、土壌の水不足を補ったのち、一部分は直接流出となり、また一部分は地下水涵養となるという仮定に基づき、上記式を用いて地下水涵養量を推定する。(1)式は各仮定によって簡略化され、また年平均の地下水涵養量を求める場合は、(1)式は最終的に以下ようになる。

$$\text{年間地下水涵養量 (mm/年)} = P - ETR - (D_2 + G_{2-\text{baseflow}}) \quad (2) \text{式}$$

ただし

P	: 年間降雨量 (mm/年)
ETR	: 年間実蒸発散量 (mm/年)
(D <sub>2</sub> + G <sub>2-baseflow</sub> )	: 年間河川流出量 (mm/年)

(2)式左辺の年間合計値は年間あたり地下水浸透量を直接的示すものと考えられる。本解析では(2)式を用いて年間地下水涵養量を推定した。

### 水収支の計算位置および期間

水収支解析はボゴタ平原内の全流域を対象として実施した。使用した気象データや水文データは大部分が CAR の気象・水文観測所のデータであり、5年～30年間のデータが集積されている。地下水涵養量の算定は長期間の年平均値を使用して実施した。

### 流域の降雨量(P)の算定

流域の年平均降雨量の分布は図 5-4示すとおりである。年降雨量の平均値は 802mm である。

### 流域の河川流出量の算定 (D<sub>2</sub> + G<sub>2-baseflow</sub>)

流域の河川流出量は水文解析の結果の年平均流量を使用した。

### 可能蒸発散量(ETP)の算定

可能蒸発散量は実蒸発散量を推定するに当たってのベースとなる。可能蒸発散量は直接的に測定することが極めて困難であり、通常は気象データを用いて各種の推定式によって推定する。ボゴタ平原において過去の調査で数多く使用された推定式は、Penman – Monteith 式、Hargreaves 式、Turc 式の 3 式である。本調査では、調査地域内の 7 地点を選び上記 3 式による可能蒸発散量とパン蒸発量とを比較した。その結果、Turc 法はパン蒸発量と最も高い相関をもつことが判明した。しかし、3 式の適用性に関してはその評価が確定していないため、本調査では、パン蒸発量から直接的に可能蒸発散量を推定する方法を採用した。パン蒸発量の値から可能蒸発散量を推定する方法は広く用いられており、本調査地域においてはこの方法が最も確実であると判断した。本調査地域で使用されているには Class-A パン蒸発計であり、この蒸発量の約 70% が可能蒸発量と近似できる。パン蒸発量観測所の分布に対しテーセン分割を適用し、流域ごとの年パン蒸発量をテーセン法で算出し、その 70% の値を流域ごとの年可能蒸発散量

とした。その結果を図 5-8示す。

### (6) 実蒸発散量(ETR)の推定

実蒸発散量は、降雨量、可能蒸発散量、土壌水分の関数である。特に、蒸発散比（実蒸発散/可能蒸発散）は、降雨量、可能蒸発散量、土壌水分と強い関係を持っている。本調査では土壌のモデル計算によって蒸発散比を降雨量、可能蒸発散量、土壌水分の関数として表し、次にその関数を調査地域に適用して実蒸発散量を求めた。

#### モデル計算に使用したデータ

表-1 に示す CAR 観測地点における日降雨量と日パン蒸発量をモデル計算に使用した。表 5-9に示すように使用した大部分のデータは 1991 年～1998 年の 8 年間のデータである。

表 5-9 観測所一覧

CAR 観測地点	観測年度	CAR 観測地点	観測年度	CAR 観測地点	観測年度
Checua	1991-1997	Neusa	1991-1998	Dona Juana	1991-1992 1994-1998
Guatavita	1991-1997	Primavara	1991-1998	Barrancas	1991-1997
Guymaral	1991-1998	Ramada	1991-1998	Sisga	1993-1997
Iberia	1991-1998	Tabio	1991-1996	Tisquesusa	1991-1998
Muna	1991-1998	Venecia	1991-1997	-	-

#### モデル計算に使用した土壌パラメーター

モデル計算では代表的な 3 種類の土壌タイプを設定した。この設定値は FWO のデータに基づいている。

表 5-10 土壌の蒸発散可能水量

土壌タイプ	圃場揚水量 - シオレ点	土壌厚さ	土壌の最大利用可能水分量
粘土質土壌	180mm/m	× 0.5m	= 90mm
普通土壌	140mm/m	× 0.5m	= 70mm
砂質土壌	100mm/m	× 0.5m	= 50m

#### モデル土壌水分計算

モデル土壌に日降雨量と可能蒸発散量を(ETR)与え、土壌水分計算を行なった。この計算に当たっては、以下の仮定を用いた。

- 土壌計算を日ベースで行なう。
- 土壌水分量が土壌の利用可能水分量を超えた時に、表面流出と地下水流出が発生する。
- その日の可能蒸発散量(ETP)はその日のパン蒸発量×0.7 とする。
- 土壌から発生する最大蒸発散量(ETP<sub>R</sub>)は可能蒸発散量(ETP)×穀物係数(kc)として求める。穀物係数(kc)は調査地域の植生分布と FAO のデータに基づき kc=0.8 とした。
- 土壌水分量が土壌の利用可能水分量を超えた時のみ最大蒸発散(ETP<sub>R</sub>)が生じ、それ以下の場合には下式に従って実蒸発散が生じる。

土壌水分量 > 最大利用可能水量(TAM)	その日の実蒸発散量(ETR) = 最大蒸発散量(ETP <sub>R</sub> )
土壌水分量 < 最大利用可能水量(TAM)	その日の実蒸発散量 = 最大蒸発散量(ETP <sub>R</sub> ) × その日の土壌水分量 ÷ 最大利用可能水分量

#### モデル計算結果

14 個所の観測所の日降雨量と日パン蒸発量を使用して 8 年間のモデル土壌水分計算を日ベースで行なった。また計算に当たって 3 種類の土壌を仮定しそれぞれの土壌について蒸発散比(ETR/ETP)を計算した。この結果、年平均蒸発散比(ETR/ETP)は(年降雨量 ÷ 年可能蒸発散量)および土壌水分量と非常に良い相関を持っていることが判明した。(図 5-9参照)。したがって、平均蒸発散比は年降雨量、年可能蒸発量(ETP)、および土壌の最大保持水量の 3 つを変数として関数近似が可能である。関数形としては以下のものが妥当である。

$$\text{年蒸発散比(ETR/ETP)} = \text{LN}(1.49 \times P^{0.216} \times W^{0.0545})$$

- P : (年降雨量 ÷ 年可能蒸発量)  
 W : 土壌の最大利用可能水分量 (mm)  
 LN( ) : 自然対数

近似の状況を図 5-9に示す。図 5-9に示すようにこの近似式は良い適合性を示している。この近似式を使用することによって、調査地域の降雨量・可能蒸発量・土壌種を考慮した実蒸発散量の推定を行なった。

### (6) 実蒸発散量の分布

前項で求めた年蒸発散比の推定式を用いて、調査対象地域における実蒸発散量を求めた。実蒸発散量の算定に当たっては、年降雨量分布図(図 5-4)、年可能蒸発散量分布図(図 5-8)、および土壌の蒸発散可能量分布図(図 5-10)の3つの図を重さね合わせ、推定式によって年蒸発散可能量を算出した。計算結果の年実蒸発散量分布を図 5-11に示す。なを、土壌の最大利用可能水分量分布図は調査団が作成した土地被覆図を用いて、土地の被覆状況を5つのカテゴリーに分類し、それぞれに土壌の蒸発散可能量を与えた。その作成方法を表 5-11に示す。

表 5-11 土壌の蒸発散可能量分布図

項目	推定方法
土地被覆状況分類	森林、草地・耕作地、裸地、水面、市街地
土壌の最大利用可能水分量	(圃場容水量(mm/m) - シオレ点含水量(mm/m)) × 土壌の厚さ(m) ただし、(圃場容水量 - シオレ点含水量)は以下のように設定した。 ・ 粘土質土: 180(mm/m) ・ 普通土: 140(mm/m) ・ 砂質土: 100(mm/m) また水面では実蒸発散量=可能蒸発散量とした。
土壌の厚さ	調査地域の地形区分に従って、以下のように設定した。 ・ 低平地(標高 2600m 以下)および高平地(標高 2600m 以上)の土壌厚さ 0.4m ・ 山地および丘陵地の土壌厚さ 0.2m

### (7) 地下水涵養量の算定

地下水涵養量は、以下に示す(2)式で算定した。

$$\text{年間地下水涵養量(mm/年)} = P - \text{ETR} - (D_2 + G_{2-\text{baseflow}}) \quad (2)\text{式}$$

ただし

P : 年間降雨量(mm/年)

ETR : 年間実蒸発量(mm/年)

(D<sub>2</sub> + G<sub>2-baseflow</sub>) : 年間河川流出量(mm/年)

(2)式の3つの要素、降雨量(P)、実蒸発量(ETR)、河川流出量(D<sub>2</sub> + G<sub>2-baseflow</sub>)を重ね合わせ式(2)によって地点ごとに地下水涵養量を計算した。その結果を図 5-12に示す。また流域ごとの地下水涵養量を表 5-12に示す。

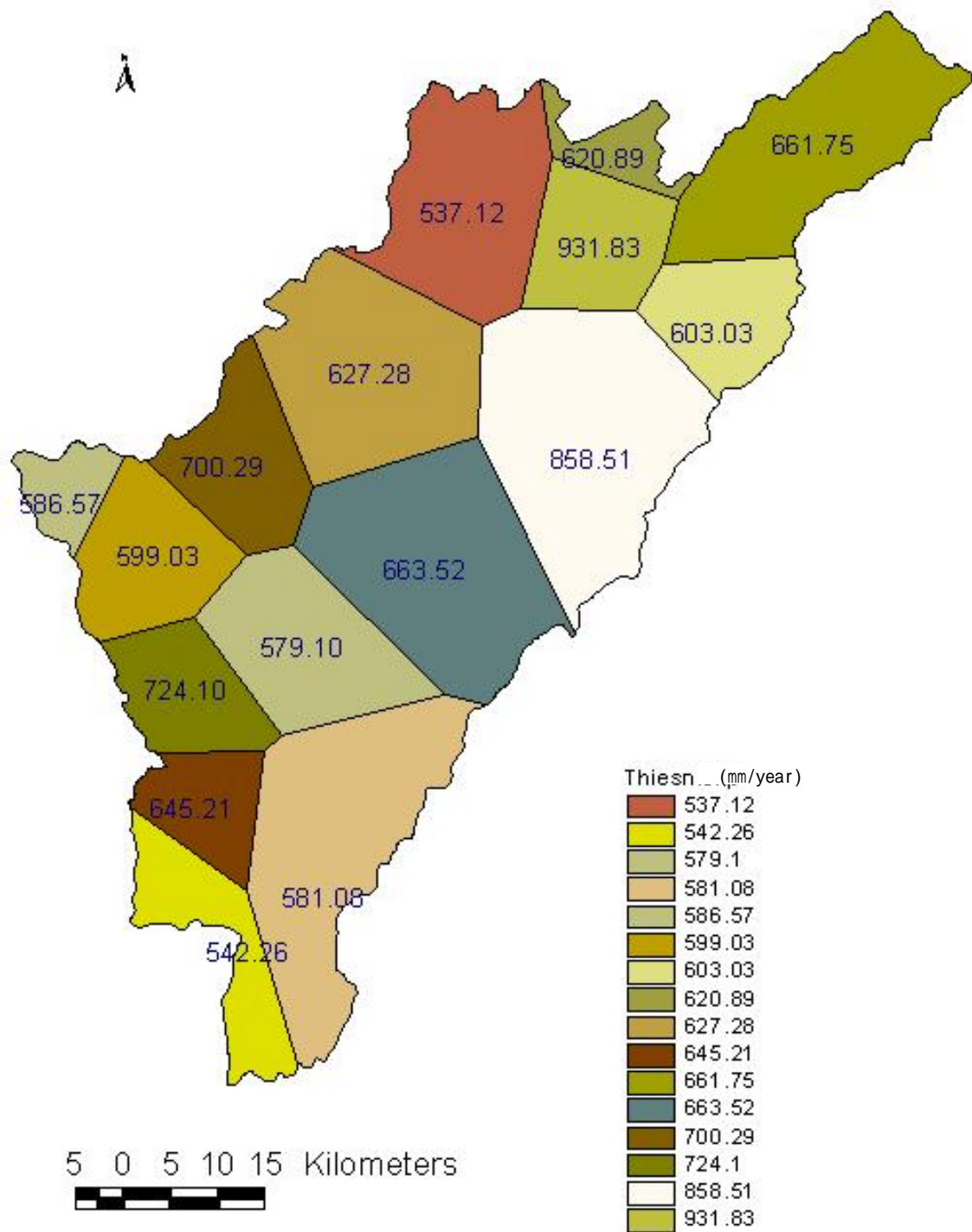


図 5-8 可能蒸発散量分布

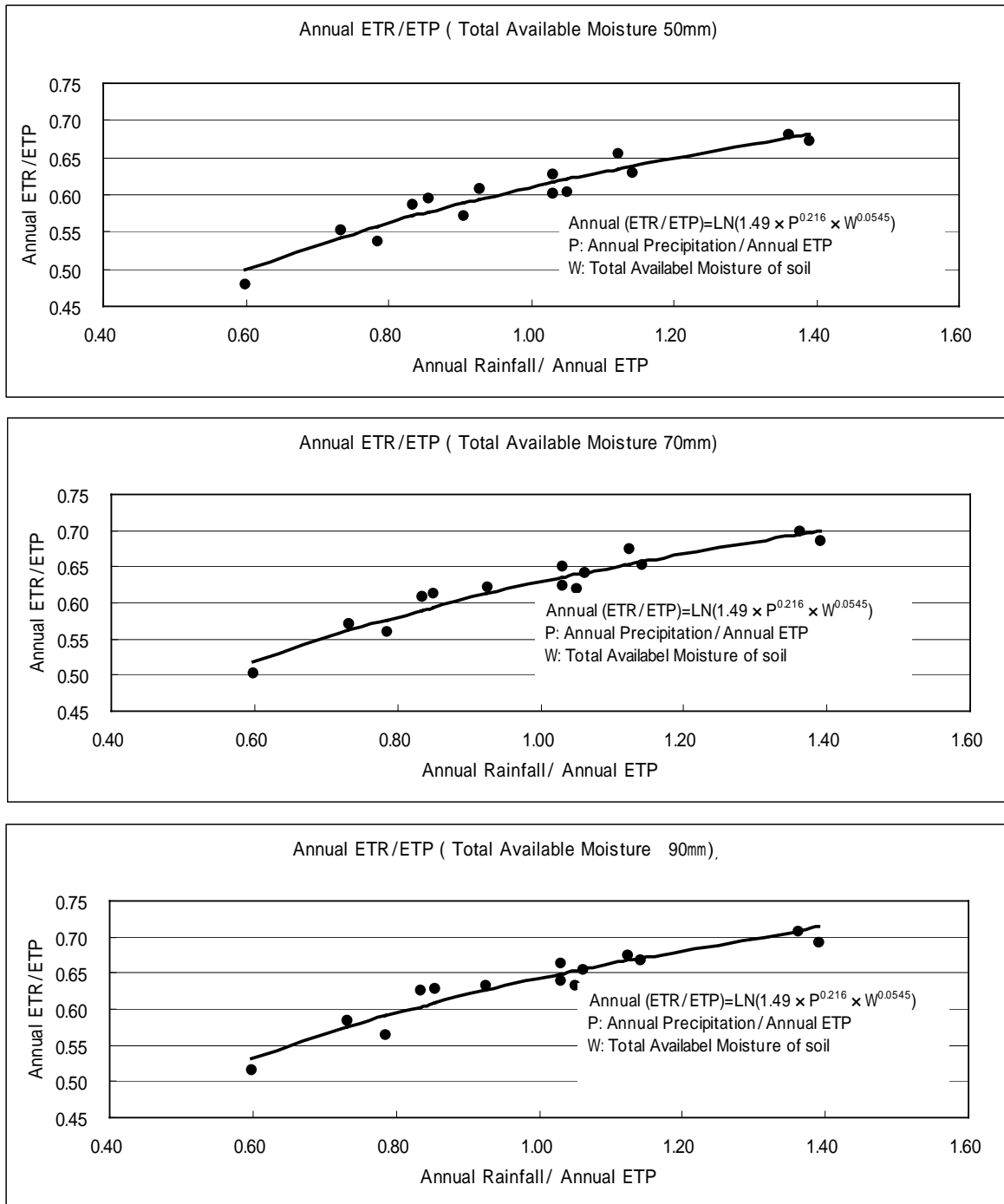


図 5-9 モデル土壌水分計算結果（土壌種ごと）と近似式

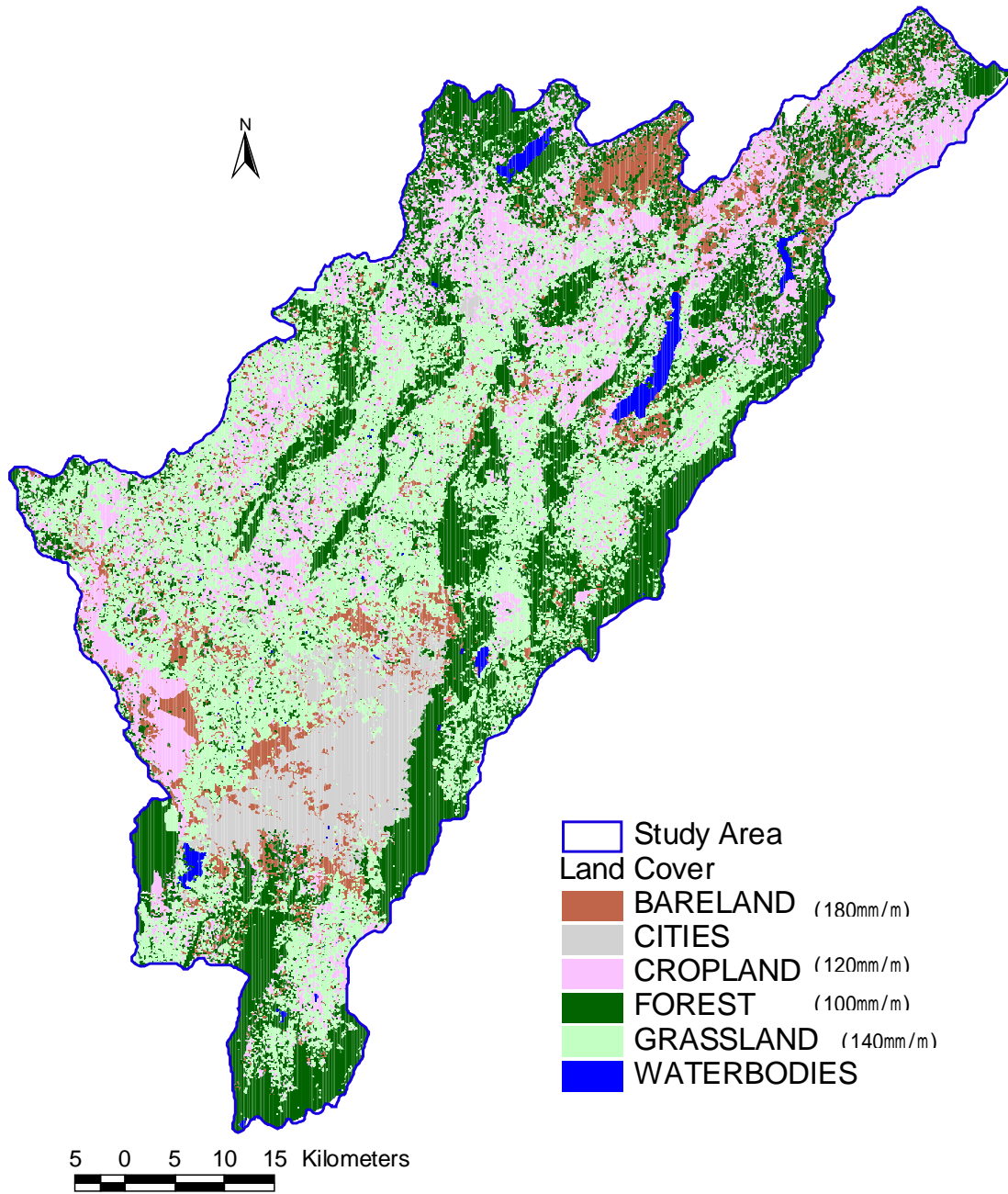


図 5-10 土壌の最大利用可能水分量

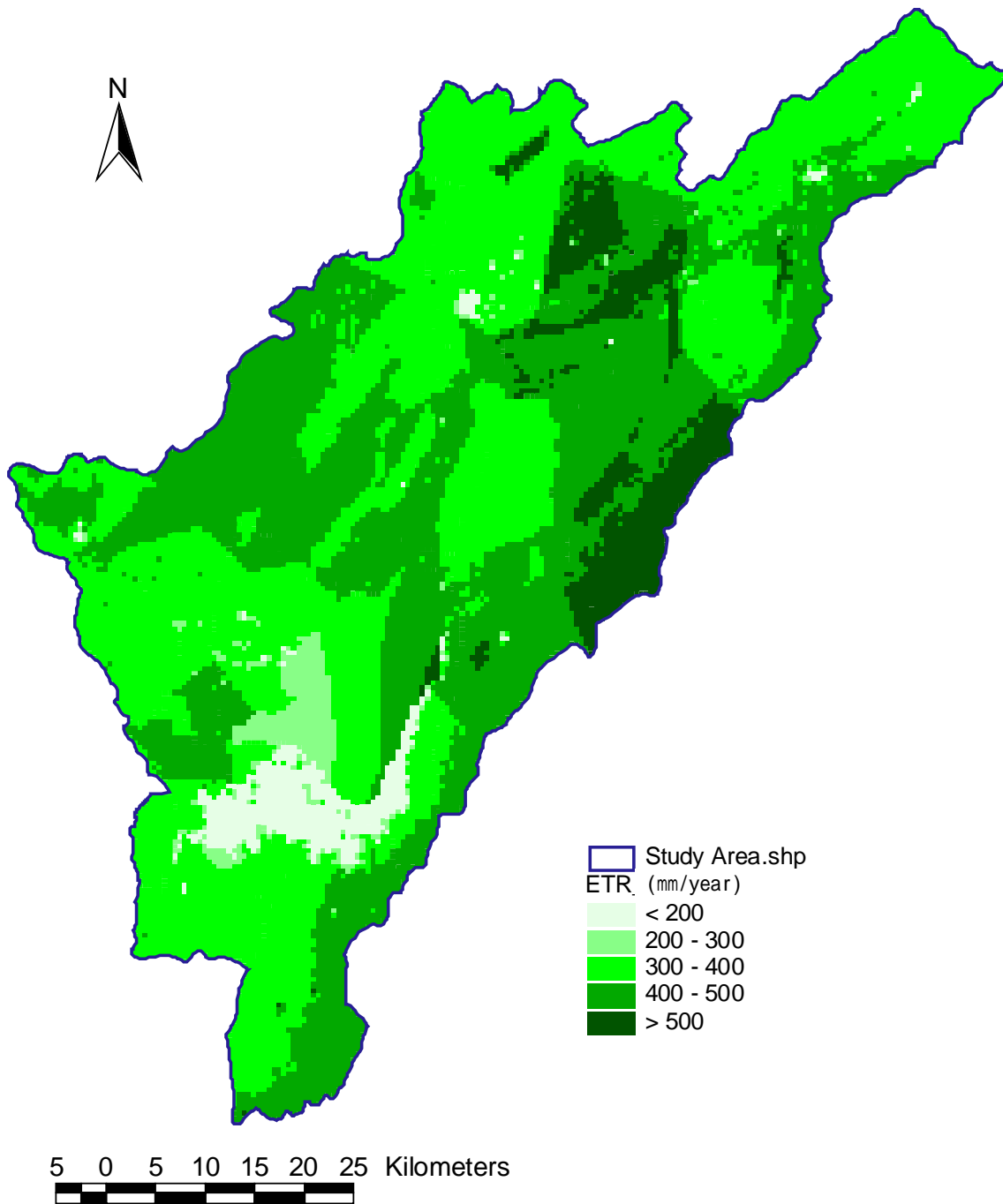


図 5-11 年間実蒸発散量分布



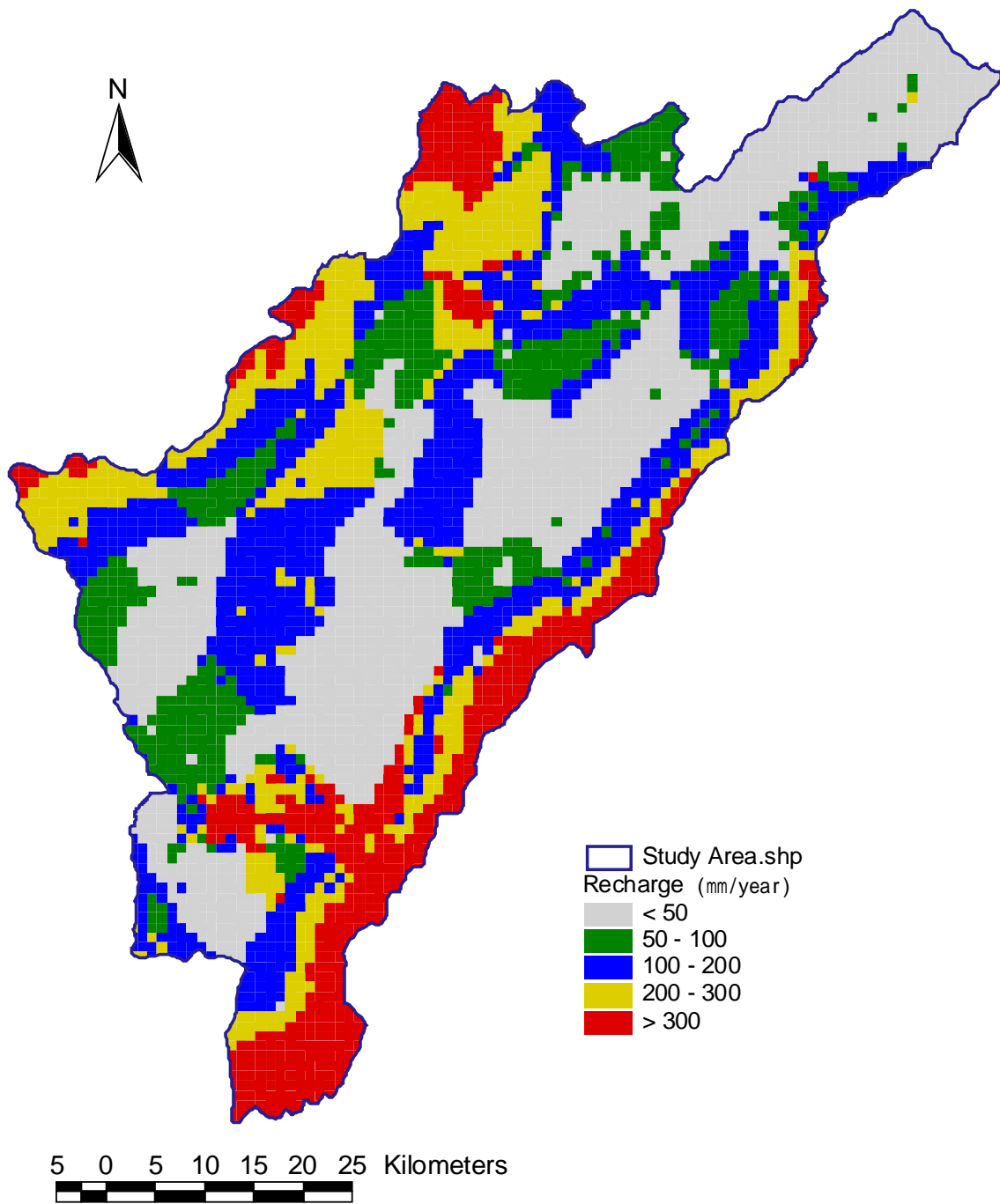


図 5-12 年間地下水涵養量分布

表 5-12 流域ごとの地下水涵養量

流域名	流域面積 (km <sup>2</sup> )	年降雨量 (mm)	年河川流出量 (mm)	年蒸発散量 (mm)	年間涵養量	
					(× 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	(mm)
Bogotá 1-Bogotá 3	35.57	707	270	333	71.0	105
Bogotá 4-Bogotá 6	111.16	727	186	391	34.7	149
Bogotá 7 Bogotá 9	103.46	724	244	418	34.5	62
Bojaca	218.68	755	248	378	28.2	129
Chicu	134.00	751	150	414	25.1	187
Frio	194.08	838	353	385	19.4	100
Neusa	432.35	850	257	406	80.9	187
Sisga	151.96	913	365	405	21.7	143
Muna	128.11	727	330	339	7.49	58
Subachoque 1	31.50	600	120	409	2.23	71
Subachoque 2	385.99	833	268	415	57.9	150
Teusaca	353.36	896	307	423	58.7	166
Tomine	367.79	873	297	467	40.2	109
Tunjuelito	404.47	942	289	323	133	330
合計	4268.69	805	271	391	615	144

ボゴタ市街地が位置する流域 Bogotá(3)E では、以上述べた方法で地下水涵養を求めることができない。ボゴタ市街地では土壌が構造物によって覆われているため、降雨は土壌に浸透することが極めて困難である。したがって、流域 Bogotá(3)E 中のボゴタ市街地部分の水収支および地下水涵養量は以下に示す関係に基づき推定した。

- 降雨量 = 河川流出量 + 蒸発散量
- 地下水涵養量 = 0mm/年

計算結果によると、調査対象地域の地下水涵養の平均値は 144mm/年(6 億 1 千 5 百万 m<sup>3</sup>/年、19.5m<sup>3</sup>/s) となった。

表 5-13 調査地域の地下水涵養量の推定値

対象地域	流域面積 (km <sup>2</sup> )	年間地下水涵養量	
		mm/年	m <sup>3</sup> /s
ボゴタ平原を含む調査対象地域全体	4,268	144	19.5

### (8) 地下水涵養量の感度分析

地下水涵養量の値には土壌の水分特性が大きな影響を持っているが、この値を正確に推定するのは困難である。そこで、土壌の水分特性推定値の相違が地下水涵養量の計算結果に与える影響を評価するために、調査地域の土壌の水分特性の組み合わせを幾つかのパターンに変えて地下水涵養量を計算した。その結果を図 5-13 に示す。図 5-13 によると、土壌の最大利用可能水分量を大きく変化させても、地下水涵養量の値は ±10%程度しか変化しないことが判明した。

### (9) 調査域全体の水収支結果

河川流出量の一部分は取水されて灌漑等に利用されている。この水量は最終的に蒸発散となる。これを考慮し、調査域全体の水収支を最終的に整理したものを表 5-14 に示す。また、この表には、後述する地下水シミュレーションの結果による帯水層の水収支結果も記載されている。

表 5-14 調査域の水収支

項目	mm/年	m <sup>3</sup> /年	全体%	地下水涵養部分の%
・年間降雨量	802	108.5	100.0	-
・年間蒸発散量	430	58.0	53.6	-
・年間河川流出量	228	31.0	28.4	-
・年間地下水涵養	144	19.5	18.0	10.00
- 年間地下水使用量	27	3.7	3.4	18.8
- 調査域への年地下水流入	8	1.1	1.0	5.6
- 調査域からの年地下水流出	125	16.9	15.6	86.8

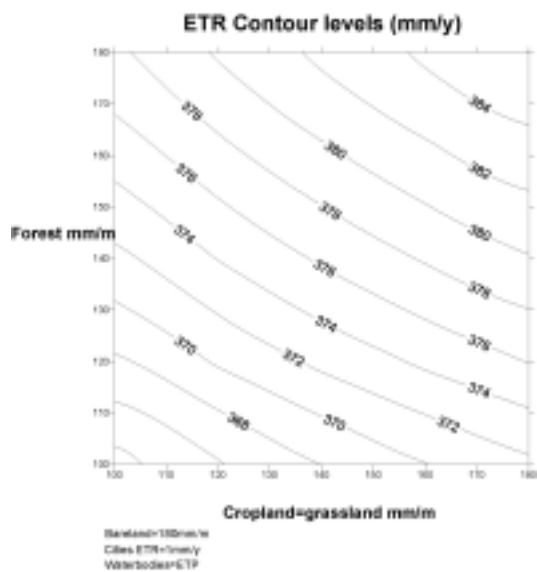
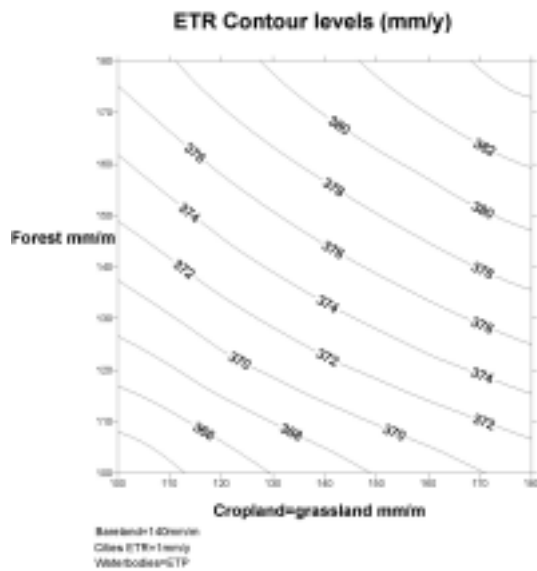
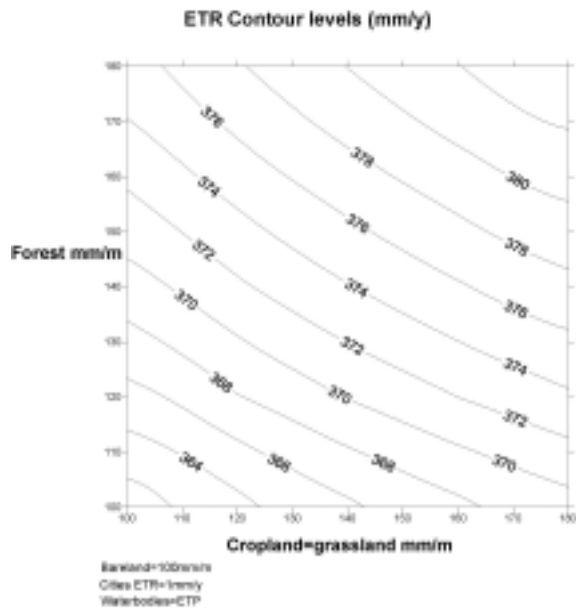


図 5-13 土壌水分変化による地下水涵養量の推定値の変化