

## 第4章 調査と解析

### 4.1 衛星写真による土地利用分析

調査団は、現況土地被覆をモニタリングするため人口衛星画像を利用した。人工衛星は、マルチスペクトルセンサーにより表面の土地被覆の特徴を検出することができる。人口衛星から作成したデータベースには、カラー強調画像、土地被覆図及び地形と地質の予察図がある。特に調査地域には豊かな生態系システムを持つ自然資源が存在するため、衛星画像の利用では、湿地分布の抽出に注意が払われた。

#### (1) 衛星画像の取得と関連情報の収集

調査地域における土地被覆のモニタリングを目的として最新の人口衛星画像を取得するため、米国のEOS データセンターにある利用可能な画像を、インターネットのウェブページ上で検索した。検索はランドサット7号を中心に、ランドサット3号と5号の画像も検索した。ただし、ランドサット7号は、高い精度の解像度を持つセンサーを持つため、このセンサーから手に入るデータを中心に調べた。ランドサット7号衛星は、1999年4月に打ち上げられ、改良型セマティックマッププラス(ETM+)センサーを搭載している。表4-1参照。

表 4-1 ランドサット7号のスペクトルバンド特性

TM と ETM+ のスペクトルバンドのバンド幅 (μ)								
センサー	バンド 1	バンド 2	バンド 3	バンド 4	バンド 5	バンド 6	バンド 7	バンド 8
TM	0.45 - 0.52	0.52 - 0.60	0.63 - 0.69	0.76 - 0.90	1.55 - 1.75	10.4 - 12.5	2.08 - 2.35	N/A
ETM+	0.45 - 0.52	0.53 - 0.61	0.63 - 0.69	0.78 - 0.90	1.55 - 1.75	10.4 - 12.5	2.09 - 2.35	.52 - .90

ランドサット7号の検索から、全調査地域をカバーするには2シーンの画像を購入する必要があった。選定した2シーンのデータ諸元は表4-2に示す通り。

表 4-2 ランドサット7号のデータ取得諸元

データ取得日	パス - ロウ		シーン ID 番号
2000年2月4日撮影	パス 8	ロウ 56	2000724634
1999年11月16日撮影	パス 8	ロウ 57	2000431753

#### (2) ソフトウェアと解析方法

画像データの前処理と土地被覆分類を行うために、ERDAS ソフトウェアを使用した。画像上で教師付き分類手法を使用した。現地検証用のデータを収集するため、GPS 機器を使用して事物の位置測定を行った。現地データは、分類の精度向上に役立った。この解析には IRWIS も同様に利用した。

#### (3) 画像分析と現況土地被覆図の作成

2シーンの画像を合成して、調査対象地域全域とボゴタ市の市街域を表すカラー画像を作成した。図4-1および図4-2参照。上述の解析方法により画像分析し、図4-3に示す調査対象地域の土地利用図を作成した。調査対象地域全体の土地利用区分面積を表4-3に示す。また、分割流域ごとの土地利用区分面積を表4-4に示す。この分析結果は次のように整理できる。

- 森林地帯は、天然林、植林地ともに、主に標高3,000m付近以上のボゴタ平原を取り囲む地域に分布する。
- 単位流域内の森林面積率は、ボゴタ市以北の流域で森林面積が多い傾向を示す。
- 耕作地と草地は、ボゴタ平原の湿地帯及び、ボゴタ川及び支流の氾濫原で、標高2,400mから2,900mの地域全般に分布する。
- 耕作地は河川沿いの地域と緩い斜面の地域で広く分布する。
- 地形の標高と起伏が増えるにつれて、牧草地を含む草地が増える傾向である。
- 裸地は、調査地域の北部及び北東地域と南西地域に存在し、この地域では特異な岩風化作用に伴うマサによる土壌侵食と地すべり地帯が分布する。
- ボゴタ市の北東部の水源地と、南西部の水源地の小規模な湖沼が点在している。
- 河沿いの耕作地に、主に花卉栽培のための温室が点在するように分布する。

表 4-3 調査対象地域の土地利用面積

分類 1	分類 2	面積 (km2)	比率 (%)	分類 1	分類 2	面積 (km2)	比率 (%)
森林地帯	自然林	181.19	4.2	耕作地	一時的耕作地	39.48	0.9
	植林地	17.25	0.4		草地耕作地混合地	551.96	12.9
	<合計>	<b>198.44</b>	<b>4.6</b>		草地、耕作地、雑草混合地	1126.79	26.4
草地	<合計>				<合計>	<b>1718.23</b>	<b>40.3</b>
	雑草地又は灌木植生	644.20	15.1	裸地	裸地	245.59	5.8
	高雑草地	415.83	9.7		採鉱地と石切り場	0.35	0.01
	草地	137.02	3.2		<合計>	<b>245.94</b>	<b>5.8</b>
	湿地帯（水生植生）	6.48	0.2	水域	湖沼、河川	<b>39.61</b>	<b>0.9</b>
	荒地植生	303.23	7.1		市街地	市街地又は人口稠密地	<b>300.16</b>
	牧場と裸地上の高雑草地	188.06	4.4	温室	花卉栽培	<b>71.49</b>	<b>1.7</b>
	<合計>	<b>1694.8</b>	<b>39.7</b>				

流域全体: 4268.69km2

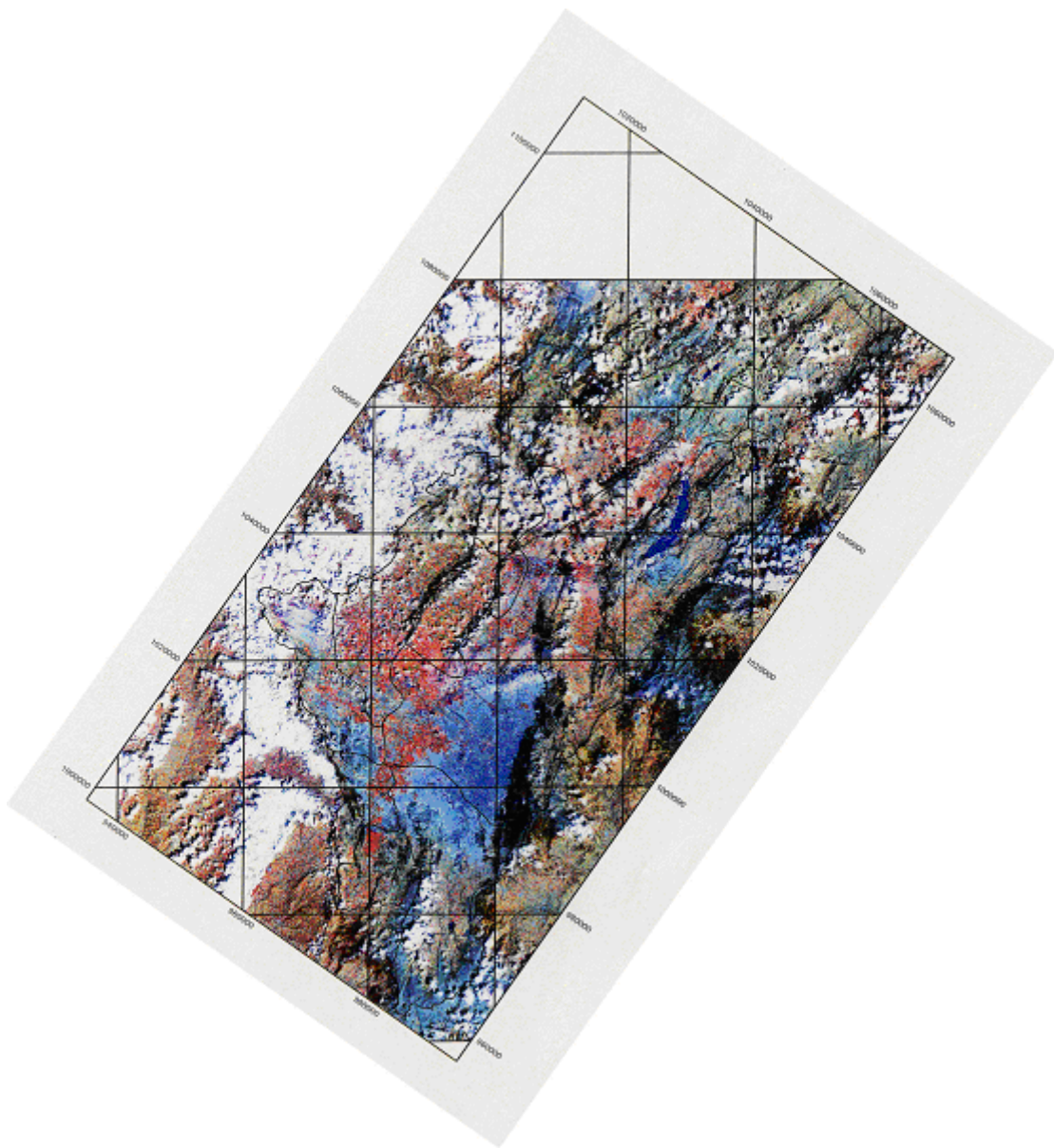


図 4-1 調査対象地域全域のランドサット7号カラー合成画像



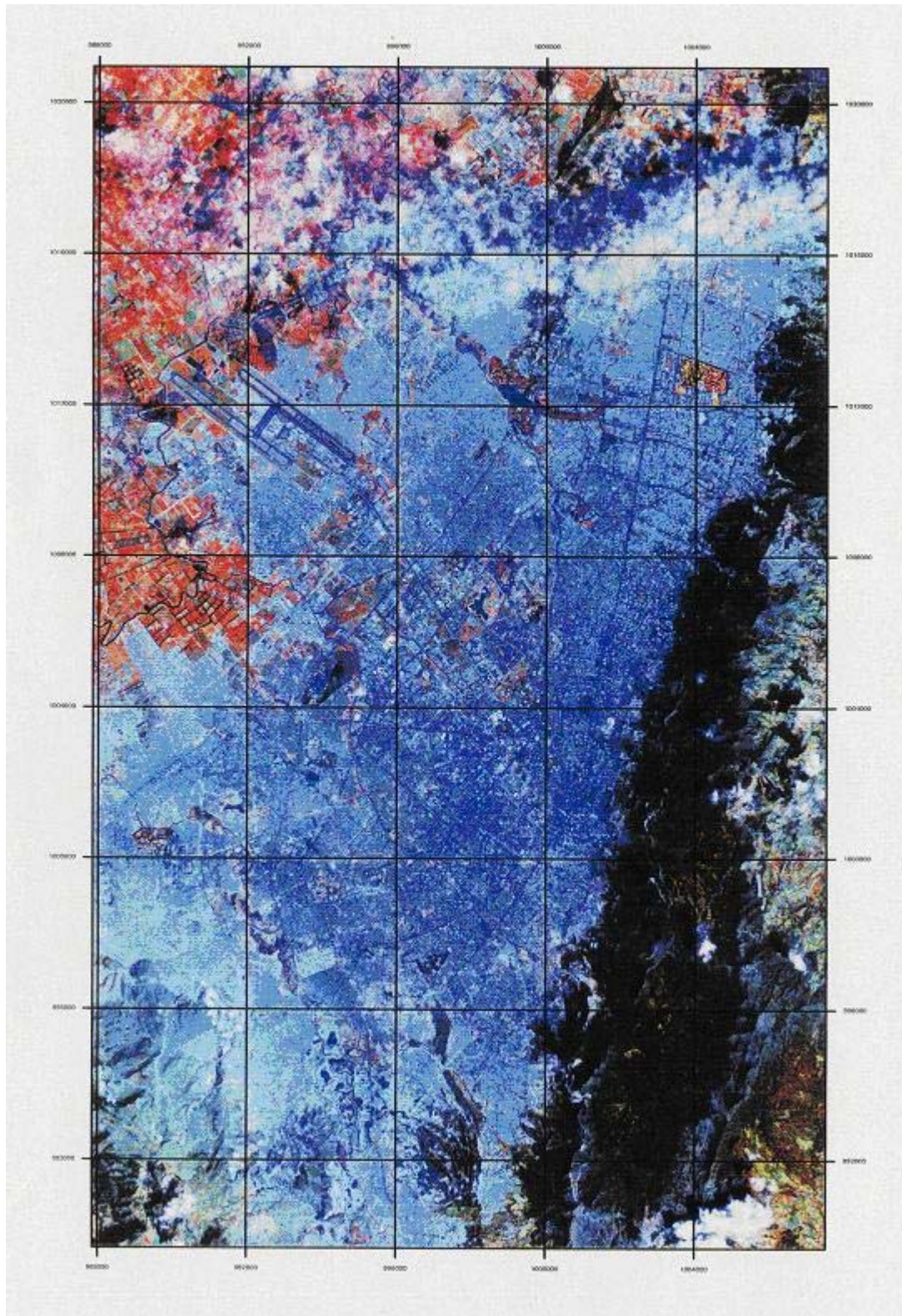


図 4-2 ボゴタ市街地のランドサット7号カラー合成画像



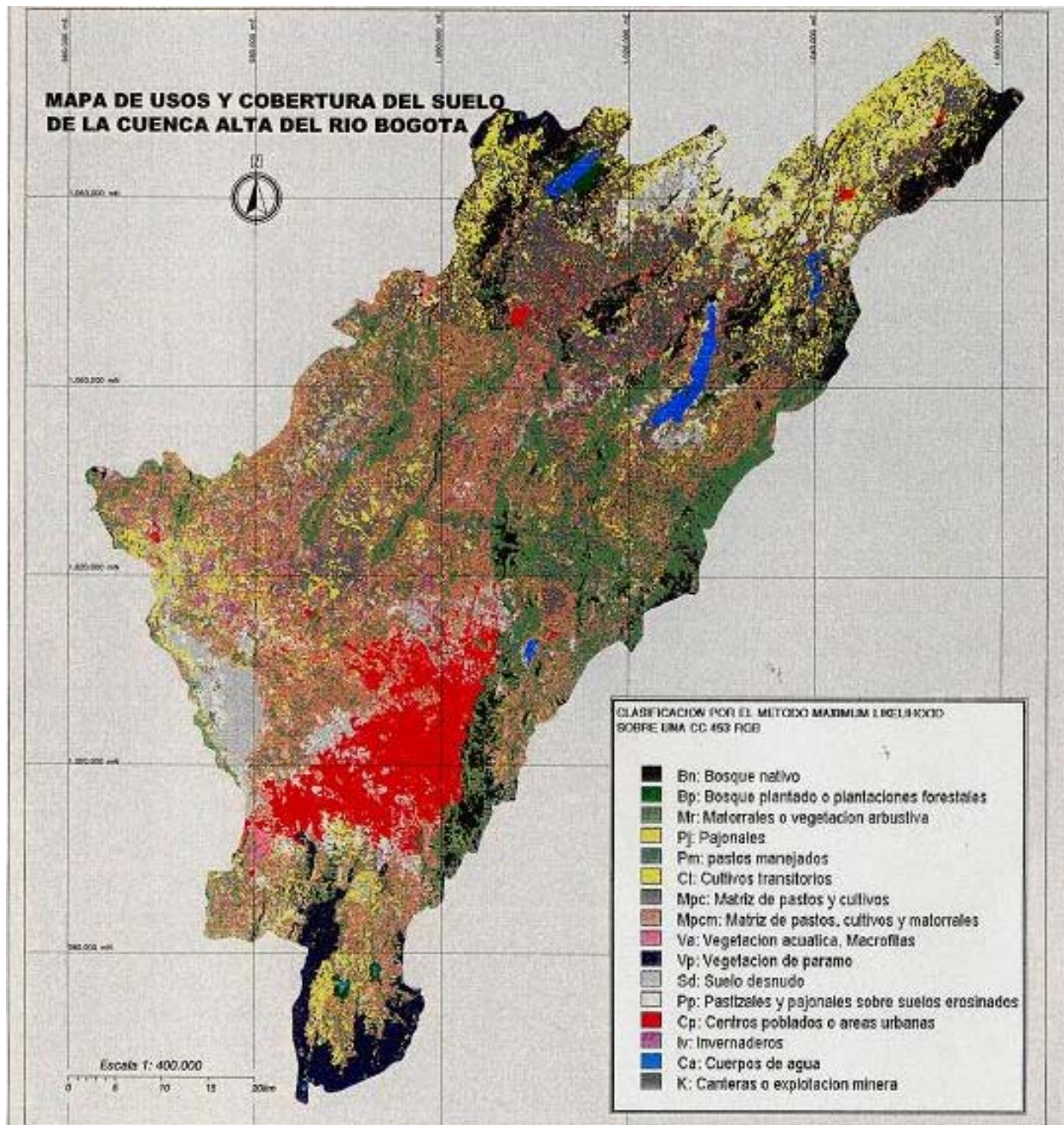


図 4-3 調査対象地域の土地利用図

表 4-4 調査対象地域の流域別土地利用状況

流域名	区分	森林地帯	耕作地	草地	裸地	水域	市街地	温室	合計
Bogotá River Basin (1)	面積 (km <sup>2</sup> )	0,00	0,52	1,07	0,12	0,00	0,02	0,05	1,78
	比率 (%)	0,00	29,14	60,00	6,86	0,00	1,14	2,86	100,00
Soacha River Basin	面積 (km <sup>2</sup> )	1,07	54,60	60,37	6,96	0,00	5,91	0,31	129,22
	比率 (%)	0,82	42,25	46,72	5,38	0,00	4,58	0,24	100,00
Bogotá River Basin (2)	面積 (km <sup>2</sup> )	0,29	24,72	30,21	29,91	0,00	26,30	1,52	112,95
	比率 (%)	0,26	21,88	26,74	26,48	0,00	23,28	1,35	100,00
Subachoque River Basin (1)	面積 (km <sup>2</sup> )	0,00	14,95	5,62	10,11	0,00	0,30	0,49	31,47
	比率 (%)	0,00	47,50	17,85	32,13	0,00	0,97	1,55	100,00
Bojaca River Basin	面積 (km <sup>2</sup> )	1,44	92,10	75,18	38,89	0,07	1,72	9,14	218,55
	比率 (%)	0,66	42,14	34,40	17,79	0,03	0,79	4,18	100,00
Subachoque River Basin (2)	面積 (km <sup>2</sup> )	7,62	105,84	189,10	29,01	1,22	74,50	0,98	408,27
	比率 (%)	1,87	25,92	46,32	7,11	0,30	18,25	0,24	100,00
Tunjuelito River Basin	面積 (km <sup>2</sup> )	2,97	243,24	99,69	28,55	0,16	0,68	13,24	388,54
	比率 (%)	0,76	62,61	25,66	7,35	0,04	0,17	3,41	100,00
Bogotá River Basin (3)	面積 (km <sup>2</sup> )	23,25	182,49	106,61	40,28	0,22	176,04	9,93	538,81
	比率 (%)	4,31	33,87	19,79	7,48	0,04	32,67	1,84	100,00
Chicu River Basin	面積 (km <sup>2</sup> )	2,05	83,00	43,16	3,21	0,00	0,06	3,41	134,88
	比率 (%)	1,52	61,54	32,00	2,38	0,00	0,05	2,53	100,00
Bogotá River Basin (4)	面積 (km <sup>2</sup> )	1,30	38,71	17,09	1,61	0,00	0,08	4,42	63,21
	比率 (%)	2,05	61,23	27,04	2,55	0,00	0,13	7,00	100,00
Neusa River Basin	面積 (km <sup>2</sup> )	6,70	107,47	75,51	2,79	0,00	0,28	3,97	196,72
	比率 (%)	3,41	54,63	38,38	1,42	0,00	0,14	2,02	100,00
Bogotá River Basin (5)	面積 (km <sup>2</sup> )	5,42	51,64	41,45	2,91	0,00	0,13	4,25	105,79
	比率 (%)	5,12	48,81	39,18	2,75	0,00	0,12	4,02	100,00
Teusaca River Basin	面積 (km <sup>2</sup> )	9,54	140,46	192,20	5,89	2,41	0,62	3,08	354,22
	比率 (%)	2,69	39,65	54,26	1,66	0,68	0,17	0,87	100,00
Bogotá River Basin (6)	面積 (km <sup>2</sup> )	5,03	36,27	17,43	1,35	0,21	4,49	2,25	67,04
	比率 (%)	7,50	54,11	25,99	2,01	0,32	6,70	3,36	100,00
Neusa River Basin	面積 (km <sup>2</sup> )	46,21	180,68	172,21	22,19	8,71	4,33	0,86	435,20
	比率 (%)	10,62	41,52	39,57	5,10	2,00	1,00	0,20	100,00
Bogotá River Basin (7)	面積 (km <sup>2</sup> )	7,27	82,57	70,74	6,72	0,04	1,33	7,48	176,15
	比率 (%)	4,13	46,87	40,16	3,82	0,02	0,75	4,24	100,00
Tomine River Basin	面積 (km <sup>2</sup> )	10,64	143,56	183,56	10,03	22,44	0,07	1,93	372,23
	比率 (%)	2,86	38,57	49,31	2,70	6,03	0,02	0,52	100,00
Bogotá River Basin (8)	面積 (km <sup>2</sup> )	5,41	32,83	59,10	4,79	0,00	1,64	0,32	104,10
	比率 (%)	5,19	31,54	56,78	4,60	0,00	1,58	0,31	100,00
Sisga River Basin	面積 (km <sup>2</sup> )	18,79	64,02	65,69	0,64	4,43	0,46	0,11	154,14
	比率 (%)	12,19	41,54	42,62	0,41	2,88	0,30	0,07	100,00
Bogotá River Basin (9)	面積 (km <sup>2</sup> )	25,46	83,23	160,10	1,81	0,00	4,77	0,06	275,42
	比率 (%)	9,24	30,22	58,13	0,66	0,00	1,73	0,02	100,00
調査対象域全体	面積 (km <sup>2</sup> )	180,46	1762,90	1666,07	247,78	39,92	303,75	67,81	4268,69
	比率 (%)	4,23	41,30	39,03	5,80	0,94	7,12	1,59	100,00

## 4.2 環境現況調査

### 4.2.1 ボゴタ川の水環境

ボゴタ平原の水環境は、二つの重要な水資源、「ボゴタ川」および「深層地下水」（主として第四紀層と白亜紀層に胚胎）に支えられており、脇役として、ボゴタ川の近傍の湿地帯と、台地の小溪流がある。これら水環境の全体的構図を図 4-4に示す。

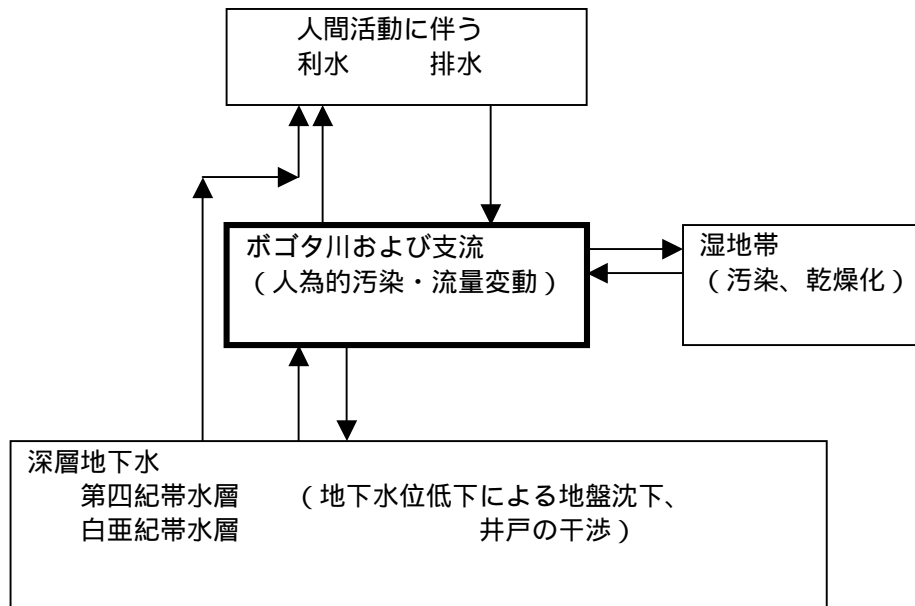


図 4-4 ボゴタ平原の水環境全体図

### (1) ボゴタ川の利用

ボゴタ川は、クンディナマルカ県 Villapinzon 市の西標高 3,300m に源を発し、平坦なボゴタ平原（水路勾配：1/1,000）をほぼ北東から南西の方向に約 130km 流下し、ボゴタ平原の最下流端であるテケンダマ滝から（厳密に言えば、EMGESA の水力発電プラント：1,000MW を通って）域外へ流出し、さらに 80km 下ってマクダレナ川と合流する。ボゴタ川は、幾つかの支流から構成されている。すなわち、上流から、シスガ川、トミネ川、ネウサ川、テウサカ川、フリオ川、チク川、スパチョケ川、ツンフェリート川およびムニャ川である。また、ボゴタ市内には、上述の支流ツンフェリート川の他に、サリツレ川とフーチャ川の都市河川がある。

ボゴタ平原には、上流の 4 支流にそれぞれ大規模貯水ダムがある。すなわち、シスガダム（CAR 管轄、貯水量 = 102 百万、灌漑・水道）、トミネダム（EEEB 管轄、貯水量 = 690 百万、発電・水道・洪水調節）、ネウサダム（CAR 管轄、貯水量 = 100 百万、灌漑・水道）およびサンラファエルダム（EAAB 管轄、貯水量=75 百万、水道）である。

調査団の実施した水収支解析（1973 年-1999 年の観測流量と水利用データに基づく）によれば、年間流出量は 36.69 m<sup>3</sup>/秒である。このうち、灌漑（工業用水を含む）等に 11.10 m<sup>3</sup>/秒、給水に 5.10 m<sup>3</sup>/秒が取水されている。取水施設としては、テウサカ川合流点の上流のティビトック浄水場が代表的で、ボゴタ川本川から取水している。また、給水等から還元される下水量は、10.24 m<sup>3</sup>/秒と推計される。下水量のうち、6.16 m<sup>3</sup>/秒は域外（チンガサダムからの導水）分である。また、相当量の農業排水量もあると思われるが、実態は不明である。この水収支バランスは、過去 27 年間の平均値であるが、最近のデータでは、給水取水は 7 m<sup>3</sup>/秒程度、下水量（大部分は未処理）は 12 m<sup>3</sup>/秒程度に達しているものと推測できる。このことは、最下流端で考えた場合、河川流量（約 31 m<sup>3</sup>/秒）の約 40%は都市下水であると言える。

このように、ボゴタ川は、洪水の排水路や水資源（灌漑用水、工業用水、都市用水）の運搬路ばかりでなく、下水排水路としての重要な機能を果たしていることが分かる。このため、給水のための取水地点は、ボゴタ川本川の上流部（ティビトック浄水場）や支流の上流部（Vitelma 浄水場：San Cristobal 川、San Diego 浄水場：San Francisco 川、Laguna 浄水場および El Dorado 浄水場：ツンフェリート川）に設けられている。

### (2) ボゴタ川の水質

上述した現状のボゴタ川の利用状況を考えて、ボゴタ川の水質を議論する場合、いくつかの側面からの見方が適当であろう。すなわち、給水の水源としての安全な水質であるか？ 都市空間にある河川が、健全な水環境としての水質であるか？ 汚染された河川水が地下水を汚染しているか？ である。このような疑問を解くため、本調査では、26 カ所の河川水と 12 カ所の河川底泥をサンプリングし、汚

染の指標となる水質や泥質を調べた。結果をサポートイングレポート - パート 1 に示す。検討結果の要点は、次の通りである。

Tibitoc 浄水場の上流での主な汚染源は、Villapinzon 付近に集まった 160 ヶ所もの皮革なめし工場からの工業廃水である。廃水には、有機廃棄物、Cr、塩化物、硫化物、タンニン等が含まれている。また、この区間の河川低泥には、Cu や Cr 等の重金属が検出されている。農業排水による汚染の兆候は見られない。現時点では、河川水は給水の原水基準を満足している。また、9 ヶ所の溪流の水質試験を行ったが、給水の原水基準を超える項目はない。鉄やマンガンが若干高い値を示すところもあるが、地下水のそれらの値よりかなり低い。

ボゴタ川が、ボゴタ市内に達すると、家庭排水や工場廃水を集めた Salitre 川、Fucha 川、Tunjuelito 川等の都市河川が次々と合流し、溶存酸素は枯渇し嫌気的な様相を示す。Salitre 川では、終末下水処理場が稼働し始めたが、他の河川には下水処理場はまだない。3 つの都市河川やボゴタ川本川の水質は、都市空間の中で健全な水環境としての水質とはいえない状態である。これらの主だった汚染物質の流量の様子を図 4-5 および図 4-6 に示す。

河川の水質と河川周辺の井戸水質の試験結果からは、汚染された河川水が地下水を汚染している根拠は見出せなかった。ボゴタ川の緩勾配がもたらす緩流速のため、流水に含まれるシルト分やコロイド分が長年にわたって河床に沈殿し、河川そのものが不透過性の水路となっているものと思われる。ボゴタ平原の水質の特徴は、広域にわたり高濃度の硫化水素とアンモニア性窒素で、深層地下水としては稀なケースである。これらの高濃度の水質は、先ず地表からの汚染が疑われるが、それらのストック量が地上由来（肥料、生活排水、家畜排水、工業廃水等）と比較して膨大であるため、地下由来によるものと判断できる。硫化水素については、ボゴタ平原の第三紀に多く含まれる黄鉄鉱や火山灰由来が考えられる。また、アンモニア性窒素については、ボゴタ平原の形成過程（湖が埋設して盆地化）で堆積した有機物に由来するものと思われる。

硫化水素およびアンモニア性窒素が地表由来でないことを明らかにするため、これらの地上発生量、地下浸透量、地下水中の貯留量を基に推定した蓄積必要年数の試算をサポートイングレポート - パート 1 に示す。

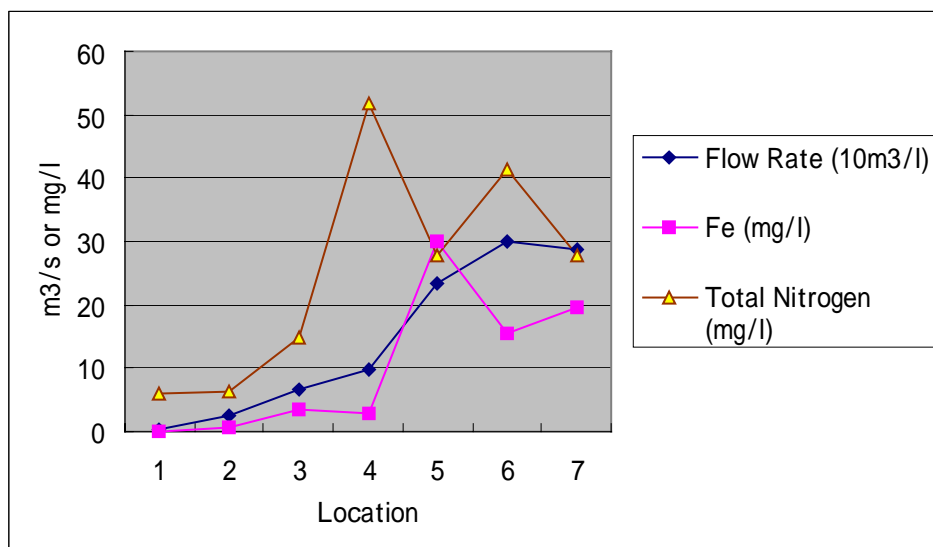


図 4-5 ボゴタ川の全窒素、Fe、流量



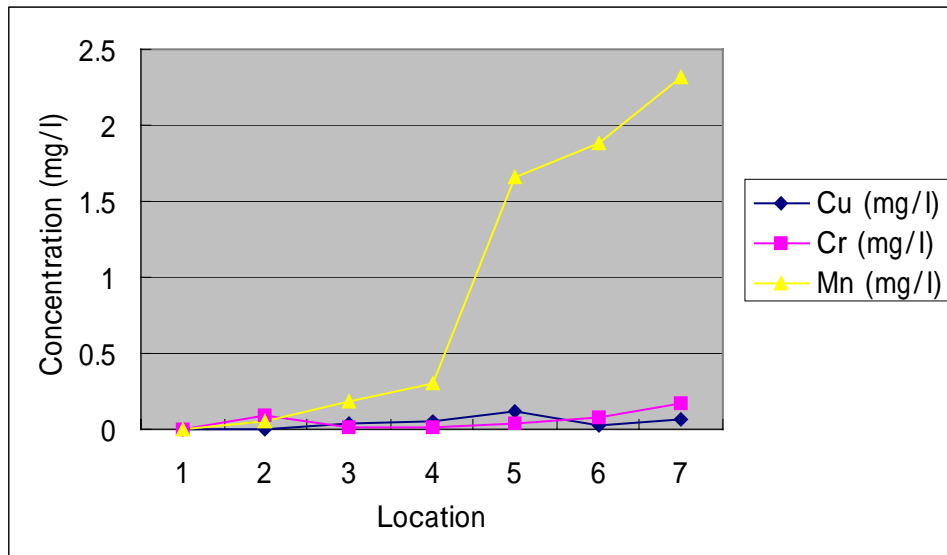


図 4-6 ボゴタ川の Cu, Cr、Mn

### (3) 湿地帯

ボゴタ平原には、かつて 50,000 ヘクタールの湿地帯が存在していたが、現在はボゴタ川の西側に 700 ヘクタール、東側に 800 ヘクタール残っているだけである。これらの湿地帯はボゴタ川本流や支流の洪水により形成された後背湿地帯（バック・マーシュ）である。しかし、流域の中に建設されたダム群により洪水氾濫が無くなったこと、更に灌漑や給水のための取水量の増加によりボゴタ川の水位が低下したこと等の理由によって、近年、湿地帯の面積が減少している。これらの湿地はラムサール条約には未登録である。

ボゴタ市内にはコネヘラ、コルドヴァ、ファン・アマリージョ、ハボケなど 12 ヶ所の湿地帯がある。これら湿地帯の位置図を図 4-7 に、また、湿地帯の特性をサポーティング・レポートに掲載している。これらの湿地帯には 53 種の鳥類・脊椎動物が生息していることが確認されているが、都市化の進行と都市下水の流入、ごみの投棄、有機物による富栄養化等により水質は極めて悪化しており、水鳥等生態系への影響が問題となっている。

EAAB、DAMA 及び CAR はそれぞれの湿地帯の環境管理計画（ラムサール会議の合意事項を採用し、DAMA と CAR のガイドラインに従って作成されたもの）に従って、管理・改善事業を行っている。都市空間において、市民に安らぎを与える貴重な水辺として積極的な保全対策が望まれる。

### (4) 水環境の改善

ボゴタ川の水質の悪化は、工業廃水や生活排水の処理率の低さに大きく起因している。工場廃水の処理については、行政指導により、工場ごとに改善が進められるべきである。ボゴタ市の下水道整備率はまだ低く、終末下水処理場は、合計 3 ヶ所計画されているが、現在完成しているのは、Salitre 下水処理場の 1 ヶ所だけである。早急の改善が望まれる。

一方、灌漑用水や給水のための取水量の増加によりボゴタ川の水量が低下していることも、ボゴタ川水質悪化の一因と考えられる。ボゴタ川の水質改善のために、ボゴタ川の平常時の水量を増やす方策を考えるべきである。例えば、給水のための代替水源を地下水に求めティビトック浄水場のボゴタ川からの取水量を減らすことやチンガサシステムを利用して他流域からの水質浄化用水の導水等が考えられる。

#### 4.2.2 地下水と地盤沈下

##### (1) 地下水の利用

ボゴタ平原には、現在、7,000 本の深井戸が存在し、3.7 m<sup>3</sup>/秒の地下水が利用されている。農業用水や工業用水への利用が大部分で、都市給水としても一部都市（Funza や Facatituba で約 0.2 m<sup>3</sup>/秒程度）で利用されている。本調査で実施した井戸インベントリ調査によれば、地下水の主要な帯水層は第四紀層で、井戸本数で合計深井戸本数の 93%、揚水量で合計地下水利用量の 78%となっている。白亜紀層も有望な帯水層であるが、その利用はあまり進んでいない。白亜紀層については、井戸本数で合計深井



戸本数の5%、揚水量で合計地下水利用量の20%となっている。

地下水が多く利用されている流域は、ボゴタ川下流域、ボゴタ川中流域、ボハカ川流域、スパチョケ川流域、チク川流域およびフリオ川流域である。この流域の中で、最も地下水が高度利用されている流域は、チク川流域である。

## (2) 過剰揚水と地盤沈下

ボゴタ平原においては、地盤沈下が地下水の過剰揚水との関連でしばしば言及されているが、実際に地盤沈下といわれる事例は、舗装道路上の波状の変形やひび割れ、不等沈下によると思われる家屋やビルの壁や床のひび割れ、公園などユーカリの木の下で起きる局所的な地盤沈下。これらの現象は地下水の過剰揚水とは関係なく、地下深部で起こる可能性のある圧密沈下については、今のところ確認されていない。いずれにしても、ボゴタ盆地内の水収支が赤字側に傾いていないことから、地下水に関する地盤沈下が起きているとは考えにくい。しかし、地下水が高度利用されている地域については、地盤沈下を長期的に観測することは必要である。

### Wet Lands in Bogota City

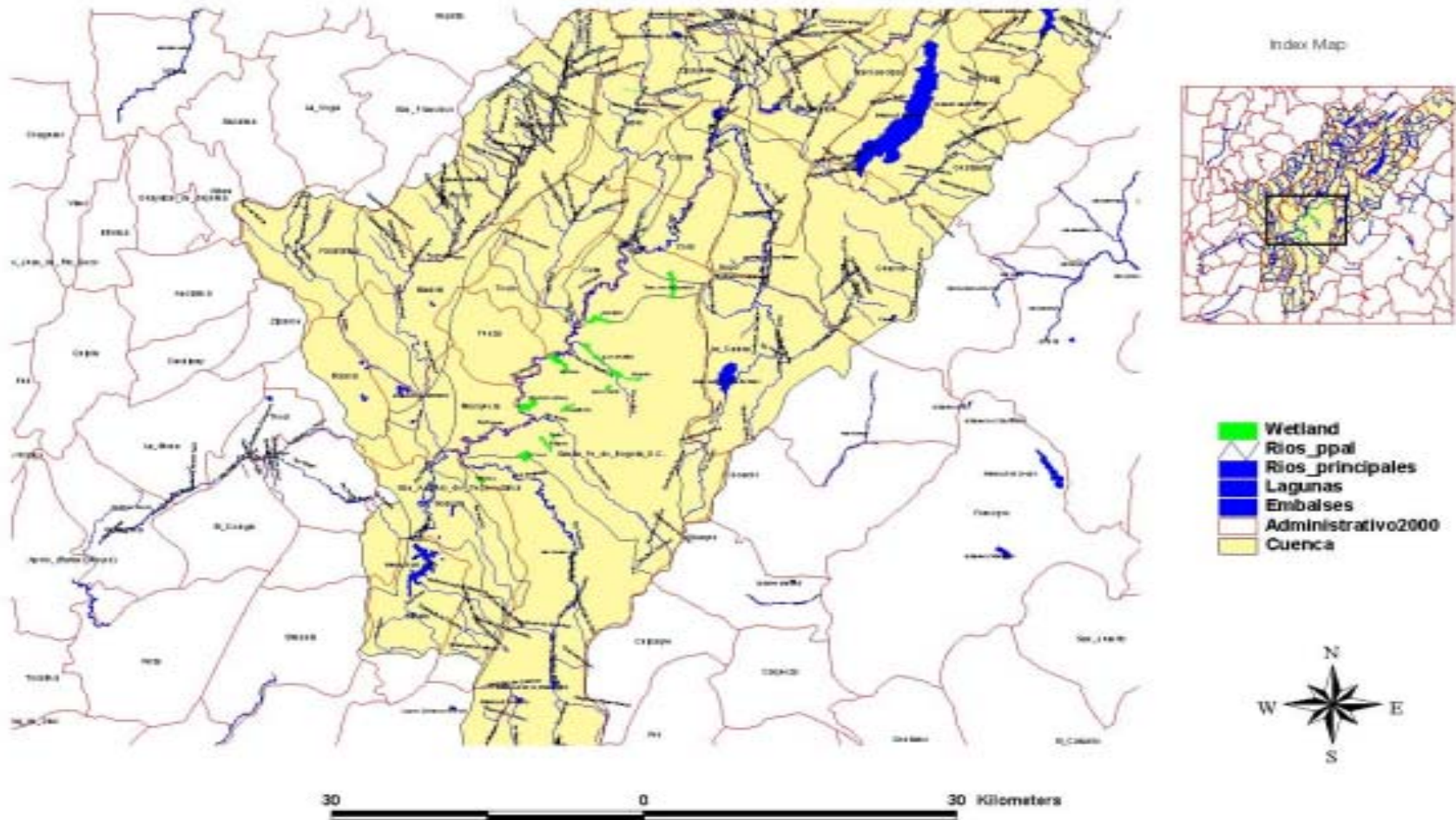


図 4-7 ボゴタ市内の湿地帯分布