

第1章 はじめに

1.1 調査の概要

(1) 調査の背景

ボゴタ平原にはコロンビア国の首都ボゴタ特別市と周辺都市が存在し、その人口は現在 700 万人であるが、地方部からの人口流入や自然増加により 2015 年には人口が 900 万人に達すると予測されている。現在、ボゴタ首都圏の給水の主要水源は表流水で、現時点では量・質とも確保されているが、将来の水需要増に対応するため、安定した新たな水資源の開発が求められている。また一方では、自然災害に起因した給水施設の破損のため給水が停止する事態が発生し市民生活が大混乱したことを教訓に、災害・緊急時の代替水源の確保が重要な課題となっている。これらの対策として表流水を新たに開発することは、表流水の水源開発地が遠隔地となり、コスト・維持管理の面で問題があることが指摘されている。

ボゴタ平原の地下水開発は、ボゴタ市周辺の一部の都市給水、花卉園芸等の灌漑用水および工業用水として利用されている。大部分の地下水は、浅層の第四紀層を対象に現在まで開発が進められてきたが既に限界まで開発され、これ以上の開発は困難とみられている。これに対し、深層の白亜紀の地下水は、現在まで大規模開発は行われておらず、今後の長期的な安定水源としての開発の可能性が注目されている。ボゴタ市は、1999 年に深層地下水の賦存量調査を開始したが、十分な調査成果を得るに至っていない。安定水源としての地下水の開発は、中長期的に安定した給水水源として期待され、その賦存量の確認調査と地下水開発計画策定が急務となっている。

このような背景のもと、コロンビア政府は日本政府に対しボゴタ平原の地下水開発に係る計画策定のための技術協力を要請した。この要請を受けて、国際協力事業団（JICA）は 2000 年 7 月に事前調査団を派遣し「コロンビア国ボゴタ平原持続的地下水開発計画調査」（本調査）に係る S/W の署名・交換を行った。この S/W に基づいて、JICA は本格調査団を 2000 年 12 月に派遣し、本調査の現地作業が開始された。本調査の第 1 年次調査（2000 年 12 月 - 2001 年 3 月）の調査成果は Progress Report に報告されている。また、第 1 年次調査および第 2 年次調査（2000 年 5 月 - 2002 年 2 月）の中間成果は Interim Report でまとめて報告されている。Final Report（本報告書）は最終報告書として第 1、2、3 年次調査結果についてまとめたものである。

(2) 調査の目的

ボゴタ平原全体を対象にした本調査の目的は、ボゴタ平原における地下水ポテンシャルの評価、地下水に関係する環境の現状調査、持続的地下水開発計画（マスタープラン）の作成、本調査の実施を通じてのコロンビア側カウンターパートへの技術移転である。

(3) 調査対象地域

本調査の調査対象地域は、コロンビア国の首都ボゴタ特別市およびクンディナマルカ県の周辺都市が位置するボゴタ平原である。本調査で整備した GIS データベースによると、調査対象地域は、面積 4,268 km² で、31 の自治体を含んでいる。

(4) 調査フェーズ

本調査は次の 3 フェーズに分けて実施された。

第 1 年次調査：基礎調査（2000 年 9 月 - 2001 年 3 月）：調査対象地域の現状を把握し、問題点を明確にするとともに、問題点の解決するための分析を行う。また、物理探査、試掘調査等の実査を通じ、地下水ポテンシャルの評価のために必要なデータを測定する。

第 2 年次調査：地下水ポテンシャルの評価（2001 年 5 月 - 2002 年 3 月）：第 1 年次調査および第 2 年次調査で収集・実測したデータに基づき、地下水ポテンシャルの予備評価を行う。評価では、地下水シミュレーションや GIS データベースを活用し、データの量や精度を充実させて効率的な評価を行う。

第 3 年次調査：地下水開発計画の策定（2002 年 5 月 - 2003 年 2 月）：地下水ポテンシャルの評価を確定させながら、調査対象地域における井戸掘削計画、給水計画、維持管理計画等を策定する。計画策定にあたっては、ボゴタ市の財政状況、運営能力、資金導入条件等を十分に考慮して、維持管理面や建設資金面でも持続可能な計画を立案する。

1.2 調査結果の要約

(1) 調査対象地域の概要

< 社会経済条件 >

調査域はボゴタ首都圏地区とクンディナマルカ県 30 市の一部から成り、社会経済条件は表 1-1の通りである。

表 1-1 調査域の社会経済条件

項目	状況		
面積	: 4,268.7 km ²		
人口 : 2000 年	: 7.4 百万人		
GRDP : 1999 年	調査対象地域	Col\$37.6 兆	: GDP の 25%
	ボゴタ首都圏地区	Col\$33.0 兆	: GDP の 22%
	クンディナマルカ県	Col\$ 7.5 兆	: GDP の 5%
GRDP/Capita : 1999 年	調査対象地域	Col\$ 5,094 千	: US\$2,890 (GDP/capita の 1.4 倍)
	ボゴタ首都圏地区	Col\$ 5,261 千	: US\$3,000 (GDP/capita の 1.4 倍)
	クンディナマルカ県	Col\$ 3,594 千	: US\$2,050 (GDP/capita の 1.0 倍)
経済概況	農業	作物栽培	: ジャガイモ (全耕作面積の 75%)
		畜産	: 飼育牛牧草地 (調査域の 42%)
		花卉栽培	: 5,800 ヘクタール (全国の 92%)
	製造業	ボゴタ首都圏地区	1) 繊維、2) 食料品・飲料
		クンディナマルカ県	1) 食料品・飲料、2) 陶器・ガラス

< 自然条件 >

地形・地質: 調査対象地域の標高は、ボゴタ平原でほぼ標高 2,600m、山地・丘陵部は 2,600 ~ 3,000m である。地形は、現河川沿いの沖積低地、第四紀の洪積層が形成する平地、山麓の崖錐堆積物によって形成された山麓緩斜面、第三紀層および白亜紀層によって形成された丘陵・山地に区分される。調査対象地域の地質は、白亜紀層「Chipaue 層 - Guadalupe 層群」、第三紀層「Guaduas 層 - Chaco 層 - Bogota 層 - Regadera 層 - Usme 層」および第四紀層「Tilata 層 - Sabana 層 - Terraze 層 - 沖積層」に区分される。調査対象地域の地質構造は、褶曲・断層構造が発達し、一般的に地質構造は複雑である。

気象: 調査対象地域の平均年間降雨量は 600 ~ 1,300mm である。降雨量は山地・丘陵部で多く平原部で少ない傾向にあり、また、5 月と 11 月に月降雨量のピークを持っている。調査対象地域に関する、年間平均気温は 10 ~ 14、年間平均湿度は 70 ~ 80%、パン蒸発量は 800 ~ 1,200mm、年間平均日射量は 115 ~ 140cal/cm²/日、年間平均日射時間は 3.5 ~ 5 時間/日、年間平均風速は 1.8 ~ 4.2m/s である。

水文: 調査対象地域の主要河川はボゴタ川である。調査対象地域を南北に縦断するボゴタ川の最下流部における年平均流量は約 31m³/日である。本調査では、調査対象地域の気象・水文特性をより正確に把握できるように、20 の小流域に分割した。河川流量の季節変化は、降雨量の季節変化に対応している。また、本調査対象地域には、給水を目的としたチンガサダムからの 12m³/日の導水があり、この導水は調査対象地域外からのものである。逆にボゴタ川本流・支流から給水・農業目的に多量の取水が行なわれている。

< 水資源管理 >

コロンビア国の水資源管理に関する基本法は 1974 年大統領令第 2811 号「再生可能天然資源および環境保護に関する法典」である。1978 年大統領令第 1541 号は淡水の利用について規定している。また 1993 年法律第 99 号は再生可能天然資源管理および環境保護に関する行政機関の職務について定めている。ボゴタ平原の水資源管理に中心的な役割を果たすのはクンディナマルカ地域公社であるが、都市部についてはボゴタ首都圏区環境局が管理している。地下水管理に関する問題としては、地下水水利権許可に一貫がないこと、地下水の利用可能性が不明であること、関係機関の人材不足、関係組織間の連携・調整の悪さが認識された。

(2) 調査と解析

<衛星写像による土地利用解析>

最新のランドサット7号画像を解析して土地利用図を作成した。また、分割した20流域ごとの土地利用を把握するため、小流域ごとの土地利用面積を算出した。ボゴタ平原(調査対象地域)の土地利用については、森林(198.44km²:4.6%)、草地(1,694.82km²:39.7%)、耕作地(1,717.23km²:40.2%)、裸地(245.94km²:5.8%)、水域(39.61km²:0.9%)、市街地(300.16km²:7.0%)、温室(71.49km²:1.7%)となっている。

<環境現況調査>

ボゴタ川

ボゴタ川は給水、農業・工業用水を目的として、幅広く利用されている。しかし、河川汚染は特に都市部で進行している。河川流量を増加させ、自然浄化力の向上を図ることが提案される。

湿地帯

ボゴタ平原には約1,50haの湿地帯が広がっており、貴重な種の生息場所となっている。しかし、近年湿地帯の面積は現象しており、また水質環境も悪化をしている。積極的な保全対策が望まれる。

地盤沈下

ボゴタ平原では、地盤沈下が起きているが、現在のところ、それらは地下水揚水と直接関連する証拠は見つかっていない。しかし、長期的な地盤沈下観測が行われておらず、その実施が望まれる。

<物理探査>

本調査の物理探査としてCSAMT法を実施した。この物理探査の目的は、調査対象地域に分布するGuadalupe層の分布深度を調査することである。CSAMT法物理探査結果によると、ボゴタ平原中央部においてGuadalupe層は少なくともGL-1,000m~GL-,1200mよりも深い位置に分布し、その分布深度はボゴタ平原の縁辺部に向かって次第に浅くなっている。これは過去に予測されたGuadalupe層の分布状態・深度と一致している。また、ボゴタ平原・中部~北部のボゴタ川支流の平地ではGuadalupe層は概ねGL-300mよりも浅い位置に存在していると推定される。

<試掘井戸>

本調査では、6本の第四紀層試掘調査と4本の白亜紀層試掘調査を実施した。これらの試掘井戸に自記水位計を設置し、観測井戸として現在モニタリング中である。

第四紀層試掘井戸：第四紀層の試掘井戸掘削は、調査対象地域で第四紀層が分布している地域から代表的な地点を選び実施した。第四紀層試掘調査の結果によると、第四紀層は粘土・シルト層を中心に構成され、この中には何層かの砂層が分かれて分布し、これらが帯水層を形成している。揚水試験結果により、第四紀層の水理特性が把握された。第四紀層試掘井戸1本から500m³/日程度の揚水が可能であり、第四紀層は優れた帯水層であることが証明された。調査対象地域の78%程度の地下水は第四紀層から取水されている。

白亜紀層試掘井戸：白亜紀試掘井戸は東部山地帯の白亜紀層を対象として掘削された。この試掘によって、白亜紀帯水層の水理地質特性が把握された。この4本の井戸の揚水量は1本あたり約3,000m³/日以上であり、東部山地帯の白亜紀層が帯水層として非常に優れていることが証明された。この地域においては過去に白亜紀層を対象とした大規模な井戸が掘削されていないため、今回の4本の試掘井戸情報は、白亜紀層の地下水開発計画を検討するうえで極めて貴重である。

<地下水位観測>

地下水位調査は、地下水位の一斉観測と自記水位計による連続観測の2種類の方法で実施した。地下水位の一斉観測は、第1年次調査~第3年次調査において実施された。調査団の結果と「コ」国側の調査結果を総合し調査対象地域の全体をカバーする第四紀層および白亜紀層の地下水位分布図を作成した。一方、第四紀層の地下水位の季節変化は自記水位計による観測によって明らかにされた。その結果、水位低下が指摘されていたボゴタ平原の第四紀層の地下水位は既に安定していることが判明した。

<井戸水質試験>

調査域全体をカバーする約100本の井戸で、6分野について水質試験が行われた。その結果、鉄、マンガン、アンモニア、硫化水素、色度、バリウム、大腸菌群の項目が、広い地域において高濃度で検出された。これらは、通常深層地下水で検知されない項目である。鉄、マンガン、アンモニアおよび硫化水

素については、地表からの汚染によるものではなく、地下由来の汚染であると推定した。その一方、農業・工業の影響は地下水に及んでいないことが分かった。また地球化学的分析は、地下水は第四紀層、白亜紀層共に平原周縁部から中央部へ非常にゆっくりと移動していることが示唆されている。これは、地下水シミュレーションの結果と一致するものである。

<アイソトープ分析>

ボゴタ平原内部での地下水年齢は1,700年から33,000年であることが示された。さらに新しい可能性もあるが、少なくとも40年よりは古い。重水素・酸素18分析の結果によれば、平原内地下水は、基本的には天水起源と考えられる。

<井戸インベントリ調査>

調査対象地域に存在する全ての井戸を対象として井戸インベントリ調査を実施した。CAR、DAMA、INGEOMINAS が所有する井戸データを収集し、それを総合・整理することによって既存井戸の特性を調査した。その結果によると、調査対象地域に存在する井戸の本数は約7,081本であり、またそれらの井戸からの総揚水量は約320千 m^3 /日(3.7 m^3 /秒)であると推定された。この総揚水量のうち78%程度は第四紀帯水層から揚水されており、白亜紀層からの揚水量は約19%ある。第三紀帯水層からの揚水量は3%にすぎない。第四紀帯水層からの揚水はボゴタ平原中央～西部地域に集中し、その多くの部分は、ボゴタ平原の農業・花卉栽培に使用されている。以上の結果から、調査対象地域では第四紀層の地下水開発に集中しており、第四紀層よりも優れた帯水層である白亜紀層はその能力と比較して僅かしか開発されていないことが再確認された。

<気象観測>

本調査において、既存の気象観測システムを補強するために、調査対象地域に11個所の気象観測所が新たに設置された。気象観測所が設置された11個所は、調査対象地域内の主に山地・丘陵部に位置する。調査対象地域では、現在まで山地・丘陵部における気象観測データがあまり得られていなかった。今回調査団によって設置された11個所の気象観測所は、既往の気象観測所のネットワークに組み込まれ、今まで気象データの得られていなかった山地・丘陵部の気象データを提供することによって、調査対象地域の気象観測に貢献している。

<パイロットスタディー>

調査団は調査対象地域内の東部山地帯に位置する Vitelma サイトにおいて地下水の人工涵養のためのパイロットスタディーを実施した。地下水の人工涵養は、余剰の河川水を井戸を通じて帯水層の中に注入することによって、帯水層に大量の地下水を蓄え、必要な時にそれを生産井戸から汲み上げて利用する目的を持つ。Vitelma サイトにおけるパイロットスタディーは、白亜紀層帯水層への人工涵養可能性を把握する目的で実施した。その結果から、白亜紀帯水層は揚水効率と同等以上の注水効率を持っていることが証明された。

<GIS データベースの整備>

本調査への支援と地下水関連データの一元管理を目的として、調査団はGISを利用したデータベースの整備を行った。今日まで、コロンビア国の各関連機関は独自にデータを保有し、地下水関連データが一元的に管理されることはなかった。今回、調査団がGISの整備を行なったことによって、関連機関が自由にデータを利用することが可能となった。また、GISを利用することによって数値データの可視化が可能になり、より使いやすいデータベースとなった。さらに、本調査団で収集したデータの管理、分析と図化、地下水シミュレーション、水収支解析、気象解析等の各種解析におけるツールとしても、GISデータベースが十分に活用された。

(3) 地下水ポテンシャル

<水理地質解析>

調査団は地下水シミュレーションを実施する目的で、クデイナマルカ県のほぼ全域をカバーする地質断面図を作成した。この地質断面に基づき広域的な3次元地質モデルを作成した。同様に、調査対象域を対象としたより詳細な地質断面図を作成し、これに基づき調査対象地域の3次元地質モデルを作成した。また地質モデルの帯水層水理パラメーターを既往揚水試験結果および試掘調査の結果から推定した。更に調査団は、各帯水層への地下水涵養メカニズムおよび地下水流動メカニズムとして、「調査対象地域における降雨」「土壌への浸透」「帯水層への鉛直浸透」「帯水層内での地下水流動」「調査

対象地域外への地下水流出」を推定した。

< 水収支解析と地下水涵養量 >

調査団は調査対象域の水収支解析を実施し、その結果として地下水涵養量を算出した。水収支解析に当たっては、調査対象地域全域を対象として水収支解析を実施した。今回使用した水収支計算の要素は降雨量、河川流出量、蒸発散量、土壌水分量であり、これらの収支から地下水涵養量を求めた。蒸発散量の推定に当たっては、土壌モデル計算を行ない、蒸発散量を、降雨量、土壌水分特性、可能蒸発量の関数として表現した。以上の水収支計算結果により、調査対象地域の地下水涵養量の平均値は 144mm/年、 $19.5\text{m}^3/\text{s}$ と算定された。

< 地下水シミュレーション >

地下水シミュレーションとして、広域地下水シミュレーションと 調査対象地域の地下水シミュレーションとの2種類の地下水シミュレーションを実施した。

広域地下水シミュレーション：調査団はクンディナマルカ県のほぼ全域をモデル化し、調査対象地域を含む広域的な地下水流動を検討する目的で広域地下水シミュレーションを実施した。このモデルの作成に当たっては、3次元地質モデルを作成し、涵養量の推定値をモデルに与えた。シミュレーション結果によると、調査対象地域の地下水は、調査対象地域外部の地下水と連続しており、また、調査対象地域をその発端としマグダレーナ川に向かって南西方向に流動している地下水流動系に属していることが推定された。

調査対象地域の地下水シミュレーション：本調査団は、調査対象地域を対象とした地下水シミュレーションを実施した。このモデルの作成に当たっては、調査対象地域の3次元水理地質モデルを作成し、これに帯水層パラメーターを与えた。また広域地下水シミュレーションの結果を参考として境界条件を設定し、また調査地域における現在の井戸分布と揚水量を与えた。このようにして作成したモデルに水収支解析で推定された地下水涵養量 144mm/年を与へ、現在の調査対象地域における地下水位分布をシミュレーション上で再現することによって、地下水涵養量の推定値の妥当性を検討した。この地下水シミュレーション結果によって、調査対象地域の地下水涵養量の推定値 144mm/年はほぼ妥当であると結論された。

< 地下水開発ポテンシャルの評価 >

調査対象地域における地下水開発可能性に関する調査結果によると、調査対象地域における地下水涵養量の推定値は 144mm/年 ($19.5\text{m}^3/\text{s}$) である。ボゴタ平原の地下水はほとんど流動していないと従来考えられていた。しかし、今回の調査結果から、調査対象地域の地下水資源は降雨からの地下水涵養を受けた更新性の水資源であることが確認された。推定結果の地下水涵養量 144mm/年は持続可能な地下水開発量の上限と考えられる。

一方、地下水涵養量の 100%を開発した場合は、それに対応する地下水位低下が発生し、既存井戸に影響を与える。現在、調査対象地域における流域ごとの地下水利用率(地下水利用量÷地下水涵養量)の最大値は 65% (Chicu 流域) である。地下水開発による既存井戸への影響を考えた場合、調査対象地域における現在の水位低下の状況は許容できる範囲内にあるものと考えられる。したがって、安全揚水量を現在の地下水利用率の最大値である 60%程度以下(地下水涵養量の 60%程度以下)とすることが提案される。

(4) 地下水開発・保全・管理計画

< 計画の基本方針 >

安全揚水量に見合った適切な開発

新規の地下水開発を計画する場合は、その開発による地下水変動が影響を与える地域の安全揚水量(年地下水涵養量の 60%)を考慮して、生産井戸計画を行う。この際、新規の地下水開発計画は、その地域の安全揚水量から既存の揚水量を差し引いた残余安全揚水量の範囲以内とする。新規開発による影響があまり大きくない中小規模の地下水開発の場合は、流域ごとの残余安全揚水量を考慮して、新規の地下水計画を策定する。新規開発による影響が複数の流域に及ぶと想定される大規模の地下水開発の場合は、その複数の流域の残余安全揚水量を考慮して計画を策定する。

帯水層ごとの地下水開発の方針

調査対象地域の各地域には3つの帯水層（第四紀層、第三紀層、白亜紀層）が分布し、地下水はこの3つの帯水層の中で連続している。安全揚水量はこの3つ帯水層からの揚水可能量の合計値として算出されている。したがって、各帯水層からの合計揚水量が安全揚水量を超えないような開発計画とする。

- * **第四紀層**：調査対象地域の第四紀層帯水層は、現在、既に大規模に開発されている地域とまだ充分には開発されていない地域に分かれる。すでに大規模な開発がなされている地域では今後の地下水開発は制限されるべきであり、現在の地下水利用を継続するためには、必要に応じて、地下水保全対策が考慮されるべきである。一方、現在十分に地下水開発が行われていない地域では、需要に応じて、今後、開発が可能である。
- * **第三紀層**：帯水層の能力が低いため、井戸から期待できる揚水量は小さく、現在と同様に今後も小規模な地下水開発のみが可能である。
- * **白亜紀層 (Guadalupe 層)**：白亜紀層は山地・丘陵部とボゴタ平原全域の地下深部に分布している。この白亜紀層は、高い地下水生産性を持っている。しかし現時点では、どの流域においても殆ど開発・利用されていない。したがって、白亜紀層は新規地下水開発に最も適している。しかし、ボゴタ平原の地下深部に分布する白亜紀層の開発には高いコストとリスクを伴う。一方、山地・丘陵部の白亜紀層の開発はリスクが少ない。したがって、白亜紀層の地下水開発にあたっては、水需要に応じてボゴタ平原の山地・丘陵部に分布する白亜紀層の地下水を開発すべきである。白亜紀層帯水層は、調査対象地域の全域において分布しているため、貯水規模が大きく大規模地下水開発に適している。また、地表水系区分を超えて帯水層が連続しているため、開発地区が所属する流域の安全揚水量を上回る地下水開発が可能となることもある。

地域ごとの地下水開発の方針

- * **高度地下水利用地域（現在の地下水利用率が 40%以上）**：この地域では、今後の新規地下水開発は制限されるべきである。また今後も現在の地下水利用を継続するためには地下水保全対策が必要である。
- * **中度地下水利用地域（現在の地下水利用率が 20-40%）**：この地域では、まだ新規地下水開発に余地は残っているが、今後の井戸計画にあたって、流域ごとの残余安全揚水量を基準に、井戸計画を検討する必要がある。また、同時に地下水保全対策も検討されるべきである。
- * **低度地下水利用地域（現在の地下水利用率が 20%以下）**：この地域は、現在の地下水使用量が安全揚水量を大きく下回っている。したがって、地域の需要に応じて今後地下水開発が期待できる。

地下水保全の方針

調査対象地域において地下水保全が必要な地域は、以下に示す2つの地域に区別される。

- * 第四紀層帯水層において現在の地下水利用率が中～高程度の地域
- * 白亜紀帯水層において、今後大規模な地下水開発が計画される地域
- * **第四紀層帯水層における現在の地下水利用率が中～高程度の地域**：この地域はボゴタ平原中部～西部地域が該当する。この地域は農業生産が盛んであり、地下水の使用率が高い。現在の地下水利用を今後も継続するためには地下水保全策が必要である。地下水保全策として以下が提案される。
 - **地下水人工涵養**：第四紀帯水層からの揚水で失われた帯水層の貯水量を増加させるために、ボゴタ平原中部～西部地域の上流域支川において、余剰の河川水を溜め池に貯水し、涵養井戸を通じて地下水人工涵養を行うべきである。この人工涵養は、ボゴタ平原における農業用水の安定供給に貢献する。
 - **地下水利用の負担軽減**：地下水利用の負担を軽減するために、花卉栽培代替水源の利用（排水の再利用、雨水の利用、ボゴタ川本川流量の利用）、新規事業地の移転、灌漑効率向上のための技術開発等を進めるべきである。
- * **白亜紀帯水層において大規模な地下水開発が計画される地域**：白亜紀層は高い生産性を持っているが、降雨による地下水涵養は有限である。大規模な地下水開発にあたっては、必要に応じて、開発による影響を最小限にするように、余剰の表流水を地下水に人工的に涵養すべきである。

< 地下水の需要予測 >**EAAB の都市用水給水システム**

EAAB の 2001 年の給水実績は 14.6 m³/秒で、生産能力 (El Dorado 浄水場の完成により 2001 年末現在 26.3m³/秒に拡大) に対し 56% の稼働率であった。給水実績は水消費の減少により低下傾向にあるが、その要因として、1) 水道料金の大幅値上げ、2) 送水の減圧、3) 節水キャンペーン、4) 経済停滞、があげられている。EAAB の計画では、最大需要のケースで 2015 年までの水需要は現在の生産能力で対応可能となっているが、生産能力の半分を占める Wiesner 浄水場は水源を遠隔地に頼っているため災害に弱い体質であること、又その他取水源であるボゴタ川等の大濁水のような緊急事態等を考慮した場合、安全かつ確実な水源を開発し確保する必要性が認識されている。

調査域の地下水需要予測

地下水は、家庭用水として 12 市 (全市の 39%) で、工業/商業/公共用水は 18 市 (同 58%) で、花卉灌漑用水は 24 市 (同 77%) で、農業灌漑用水は 20 市 (71%) で使用されている。地下水は灌漑で最も多くが使用されている。流域別では、スパチョケ川(2)流域、チク川流域、ボゴタ川(3)流域-西地区での消費が多い。現在の地下水利用のトレンドに基づいて、目標年度である 2015 年における地下水の総需要を予測すると 403,000m³/日 (4.65 m³/秒) となる。

開発・保全計画地域における水需要予測

- * **ボゴタ平原東部山地帯地域:** 開発地区は、ボゴタ市東部山地帯地区と Yerba Buena 地区である。ボゴタ市東部山地帯地区は、ボゴタ市の東部山地帯およびスバ地区、並びに Soacha 市の丘陵地区を含む。同地区における人口は、2015 年には 75 万人と、ボゴタ首都圏地区および Soacha 市合計の約 7% に相当するものと予測される。水需要は目標年度である 2015 年は 1.145 m³/秒と予測される。
- * **ボゴタ平原西部地域:** 保全対象は 6 流域である。同保全計画流域の地下水需要は花卉・農業用水の灌漑が大半であり、目標年度である 2015 年の灌漑需要は 2.611m³/秒と予測される。

< 地下水開発・保全事業 >**ボゴタ平原東部山地帯 地下水開発・保全事業 (東部事業)**

- * **事業地域:** 本事業の事業地域は、Soacha 地区、Vitelma 地区、San Diego 地区、Santa Ana & Chico 地区、Cerros Norte 地区、Yerva Buena および Suba 地区を含んだ東部山地帯である。
- * **事業目的:** 本事業は、給水と水環境改善を事業目的とする、公共的な環境事業である。
 - **ボゴタ市の水供給:** ボゴタ市の安定した給水を確保するため、2 m³/秒 (平常時: 通年) および 4 m³/秒以上 (緊急時: 6 ヶ月間、1 回/15 年) の地下水を開発する。
 - **水環境の改善:** 新規の地下水の開発と給水利用は、ボゴタ川から取水しているティビトック浄水場の給水負担を軽減する。結果として、地下水の開発量に相当する量が、ボゴタ川で増加し、溶存酸素を増加させ、ティビトック浄水場地点から下流のボゴタ川の水質改善に貢献する。また、ボゴタ平原の最下流端にある発電所 (通年 20 m³/秒の運転) の電力増産に寄与する。
- **事業内容:** 生産井戸を地下水ポテンシャルと計画給水量を考慮して計画する。また、この地域の地下水ポテンシャルを保全するため涵養井戸を計画する。廃止が決まっている San Cristobal 川沿いの Vitelma 浄水場および San Francisco 川沿いの San Diego 浄水場で取水されている合計約 0.5m³/s の河川水が余剰となるため、この河川水を用いて人工涵養を行う。ただし、緊急時には、この涵養井戸も生産井戸として利用する。

表 1-2 東部事業の井戸計画

地区	帯水層	井戸の規模	井戸本数 (本)	最大能力 (m ³ /s)
ボゴタ市の北部丘陵地区、 Santana/Chico 地区、Suba 地区の既設 給水タンク近傍、	白亜紀層	井戸長さ 300m 井戸径 10inch 揚水量: 3,000m ³ /日/本 注水量: 3,000m ³ /日/本	12	0.42
Soacha 地区の既設給水タンク近傍			8	0.28
Vitelma 地区および San Diego 地区			生産井戸:13 涵養井戸:13	0.45
ボゴタ市北部の Yervabuena 丘陵地区			30	1.04
合計			生産井戸:63 涵養井戸:13	<生産> 常時:2.19 緊急時:4.00 <涵養量> 常時:0.45

- * **事業の裨益者:** 本事業の給水による直接裨益人口は、ボゴタ市東部地域の 130 万人である。緊急時の給水による事業の裨益者は、EAAB の現在の給水供給人口に相当する 7.5 百万人以上となる。

ボゴタ平原地下水高度利用地域 地下水保全計画 (西部事業)

- * **事業地域:** 本事業の事業地域は、Subachoque 川流域、Chicu 川流域、Frio 川流域およびボゴタ川の下流・中流沿川の地下水高度利用地域である。本地域は、ボゴタ平原西部や中央部に分布し、第四紀層の帯水層から現在 6,000 本以上の井戸によって揚水され、近年、過剰揚水が指摘されている。
- * **事業目的:** 本事業は、次のような水環境改善を事業目的とする、公共的な環境事業である。
 - **地下水の涵養:** 地下水が灌漑や花卉栽培に高度利用されている事業地域の地下水に関して、現在利用者が、障害を起こすことなく持続的に利用できるように、また、追加的な地下水利用に対応できる地下水ポテンシャルの蓄積を事業目的とする。
 - **地下水利用負荷の軽減:** 高度利用されている事業地域の地下水の利用負荷を出来るだけ軽減する諸策を実用化できる程度に研究開発する。研究開発のテーマは、灌漑や花卉栽培のための代替水源の利用技術や 灌漑効率向上のための技術を含む。
- * **事業内容:** 事業目的を達成するために 2 サブ事業を実施する。すなわち、地下水人工涵養事業と地下水利用技術の研究開発事業である。
 - **地下水人工涵養事業:** 人工涵養の水源としては、Subachoque 川上流部、Chicu 川上流部、Frio 川上流部の溪流の表流水とする。これらの河川では、灌漑のために河川水が利用されているため、人工涵養の水源として、雨季の洪水等の余剰水を利用する。

表 1-3 西部事業の井戸計画

地区	帯水層	井戸の規模	涵養井戸の本数(本)	最大涵養能力 (m ³ /s)
Subachoque 川流域	第四紀層	井戸長さ 300m 井戸径 10inch 注水量:1,500m ³ /日/本 2 本/1 サイト	4 サイトに 8 本の井戸	0.14
Chicu 川流域			5 サイトに 10 本の井戸	0.18
Frio 川上流部流域			5 サイトに 10 本の井戸	0.18
合計			14 サイトに 28 本の井戸	0.50

- **地下水利用技術の研究開発事業:** 事業地域の地下水利用負荷を軽減する次のような諸策の技術を研究開発する。
 - 灌漑排水の再利用
 - 雨水の灌漑利用
 - ボゴタ本川の灌漑利用
 - 新規花卉栽培事業の新規事業地
 - 灌漑効率向上

* **事業の裨益者:** 本事業の裨益者は、ボゴタ平原の農業セクター人口である約 20 万人に達する。

< **モニタリング計画** >

地下水資源の保全に当たっては地下水水位、井戸揚水量、地下水水質、地盤沈下の定期的モニタリングが必要である。

表 1-4 モニタリング計画

モニタリング項目	観測箇所	観測頻度	観測対象	目的	実施機関
地下水位	12	自記水位計	第四紀層井戸 12 箇所	・ボゴタ平原の長期的地下水水位変動の監視 ・ボゴタ平原における人工涵養の効果確認	EAAB
	10	自記水位計	白亜紀層井戸 10 箇所	・東部山地帯地下水開発の影響の監視 ・東部山地帯人工涵養の効果の確認	EAAB
	約 300	4 回/1 年	CAR 定期観測井戸	・ボゴタ平原における人工涵養の効果確認 ・ボゴタ平原の地下水位の監視	CAR
	約 280	1 回/月	DAMA に登録された井戸	東部山地帯地下水開発の影響の監視	DAMA
揚水量	約 300	4 回/1 年	CAR の定期観測井戸	揚水量の監視	CAR
	約 280	1 回/1 ヶ月	DAMA に登録された井戸	揚水量の監視	DAMA
水質	20	2 回/年	JICA 調査の水質調査井戸約 100 箇所の中から 20 箇所選定する。	ボゴタ平原の地下水水質の長期的変動の監視	CAR
	10	2 回/年	・東部山地帯人工涵養井戸近傍の井戸 ・ボゴタ平原人工涵養井戸近傍の井戸	人工涵養による水質変化の監視	DAMA EAAB
地盤沈下	12	2 回/年	第四紀層井戸 JICA 自記水位計観測地点 12 箇所	地下水位低下による地盤沈下観測	CAR DAMA

< **組織制度と運営管理** >

地下水管理管理

* **流域管理合同委員会と地下水管理技術委員会の設立:** 流域内で統一された方針・基準で水資源管理を実現するため、2002 年の大統領令 1604 号で規定されているボゴタ流域合同委員会の設置が必要である。同合同委員会の下部組織として地下水管理技術委員会の設置を提案する。委員会の職務は以下の通りである。

- ・ モニタリングと地下水涵養量、開発可能量に関する評価活動の統合
- ・ 地下水の利用現況・将来需要に関する情報収集と分析・推計
- ・ 地下水管理にかかる技術基準・指針の提案
- ・ 地下水保全、持続可能な開発に関する調査・提案
- ・ 地下水専門家の技術力向上のための活動

同技術委員会の構成は、管理者である i) CAR、ii) DAMA の他に、調査機関である iii) IDEAM、iv) INGEOMINAS、さらに v) ユーザー (EAAB、ASOCOLFLORES 等)、vi) 地下水文専門家協会、vii) 井戸掘削業者の地下水担当もしくは代表者とする。合同委員会の設置には時間がかかるので、その前については、技術委員会は地下水管理者に対する諮問グループとして立ち上げる。

* **モニタリング・評価の実施体制:** モニタリング活動は観測井戸の管理者が行い、モニタリングにより得られたデータの解析・評価は地下水管理技術委員会が実施するべきである。揚水量についてはモニタリング計画で述べられている観測井戸以外についてもデータを取得することが好ましい。同委員会は地下水管理組織が共有できる情報システム・データベースを早急に開発する必要がある。

* **地下水需要抑制、節水促進のためのゾーニングと料金設定:** 効果的な需要のコントロール、節水促進による地下水保全のためには地域の資源賦存量とともに需要に応じた料金設定が好ましい。技術委員会 (もしくはグループ) は本調査結果、さらなるモニタリング評価の結果にもとづいてゾーニングと料金設定案を策定し管理者の承認を得るべきである。

* **井戸登録の推進と井戸掘削業者の登録制度設立:** 未登録井戸についての調査を行い、揚水申請もしくは適切な廃棄処分を所有者もしくは使用者に行わせるため、調査・命令手続きの整備と CAR、DAMA 職員 (もしくは調査受託者) の立ち入り等の調査権限を与える等の法的整備が必要である。今後掘削される井戸について、適切な施工申請・施工・揚水試験・揚水申請・メーター設置を実現するために、井戸業者の届出・登録制度を提案する。CAR、DAMA 所轄内で井戸を掘削する者はそれぞれに

届出を義務づける。未申請の施工、施工申請と異なる施工、揚水試験データの改ざん等の不法行為が発見された場合は登録が抹消され、一定期間井戸掘削ができない制度とする。

- * **人口涵養における水利権申請:** 人工涵養事業に伴う水利権申請に関しては、涵養のための表流水取水に関しては水利権を申請せずに、涵養された地下水の揚水時に揚水量に応じて申請する制度を提案する。

地下水高度利用技術開発事業の実施体制

本事業の実施組織が CAR および ASOCOLFLORES が適切であり、両機関は早急に共同で事業実施体を設立すべきである。同実施体はまず本事業にかかる F/S 調査を実施する必要がある。本事業実施のための財源としては、同地域の花弁栽培事業者の納める水利権料、および、固定資産税の内環境・資源保全の事業用として指定されている部分を優先的に割り当てるべきである。残余費用については両機関が担いで拠出する。

人材育成計画

- * **本調査および F/S 調査、JICA 研修事業を通じての技術移転:** 地下水管理・開発は本調査で適用された手法、結果をさらに吟味する必要がある。また、F/S 調査を通じて技術移転を促進する。さらに、JICA で用意している各種の研修生受け入れコースを活用することが推奨される。
- * **技術委員会活動を通じてのレベルアップ:** 地下水管理技術委員会の活動を通して、地下水担当者同士の情報交換・相互啓発を促進して技術力向上を図る。井戸業者に対しての説明会も推奨される。
- * **留学制度:** 地下水文分野のさらなるレベルアップのため留学制度を提案する。CAR、DAMA 等の若手職員に国内・海外の当分野の修士課程・博士課程を履修させる。特に海外留学のための制度として IDEAM による奨学制度を提案する。全国の地下水管理組織職員の若手で留学を希望する者に奨学金を貸与する。

< 設計・積算 >

マスタープランで提案された 2 つの事業： ボゴタ平原東部山地域 地下水開発・保全事業(東部事業) および ボゴタ平原地下水高度利用地域 地下水保全計画(西部事業) に必要な施設は表 1-5 に示す通りである。以上の施設による 2 つの事業の概算事業費は表 1-6 のように積算された。

表 1-5 プロジェクト施設

事業	施設
東部事業	生産/涵養井戸、生産井戸、水中ポンプ、電気設備、浄水施設、パイプライン、アクセスロード、用地
西部事業	取水堰、水路、沈殿池、浄水施設、調整タンク、涵養井戸、水中ポンプ、用地

表 1-6 ボゴタ平原地下水開発および保全事業

単位 : Billion Col\$

項目	東部山地 地下水開発・保全事業	西部地域 地下水保全事業	合計
1. 建設費	60.36	25.60	85.96
2. 研究開発		9.00	9.00
3. 用地・補償費	1.65	0.20	1.85
4. コンサルタントサービス	6.04	2.56	8.60
5. 管理費	0.67	0.28	0.95
6. 予備費	6.71	2.84	9.55
	75.43	40.48	115.91
< 合計 >	27.9 Million US\$	15.0 Million US\$	42.9 Million US\$
	37.7 億円	20.3 億円	69.0 億円

税金 (IVA) はそれぞれの項目に含まれている。

< 事業実施計画 >

マスタープランで提案された2つの事業：ボゴタ平原東部山地帯 地下水開発・保全事業(東部事業) および ボゴタ平原地下水高度利用地域 地下水保全計画(西部事業)の事業実施組織、資金調達、実施工程については、次のように提案される。

ボゴタ平原東部山地帯地下水開発・保全事業

本事業は、環境省が監督・管理すべきである。事業の責任機関としては、ボゴタ市がその任にあたる。そして、事業の実施機関は、ボゴタ市上下水道公社(EAAB)とする。事業資金(75 Billion ペソ)は、ボゴタ市の環境投資資金を使いながら、外国の資金(ソフトローン)の利用が考慮されるべきである。

ボゴタ平原地下水高度利用地域地下水保全計画

環境省が事業を監督・管理する。事業の責任機関としては、CAR が適当である。事業の実施は、新たに結成される共同事業体(CAR と ASOCOLFLORES)が担当すべである。事業資金(63 Billion ペソ)は、CAR の環境投資資金を使いながらも、ASOCOLFLORES の事業投資資金や外国の資金(ソフトローン)の利用が考慮されるべきである。

実施工程

マスタープランで提案された、地下水開発・保全事業は2-3年間の準備作業(F/S およびコンサルタントと建設業者の調達)の後、2006年～2014年にかけて実施されるべきである。

< 初期環境調査 >

地下水開発計画により発生する可能性のある環境影響を決定するために、スクリーニング、スコーピングにもとづき環境影響評価が行われた。その結果、事業の環境に対する影響は、現在のところ不明であり、今後継続した調査が望まれる。

< 事業評価 >**経済評価**

あらかじめ設定した前提条件に基づき、ボゴタ東部山地帯プロジェクトとボゴタ西部平原プロジェクトの経済評価を行った。EIRR はそれぞれ 22%、21%であり、共に資本の機会費用である 13%を上回っており経済的に妥当と判断された。

財務評価

- * **ボゴタ平原東部山地帯地下水開発・保全事業**: 資本の機会費用は、EAAB の評価基準である 14%を用いた。FIRR (財務内部収益率)は 23%であり、資本の機会費用である 14%を上回っており、本プロジェクトは財務的に妥当と判断された。
- * **ボゴタ平原地下水高度利用地域地下水保全計画**: 本プロジェクトは、政府および地下水ユーザー(主として、ASOCOLFLORES 加入の花卉栽培業者)の共同出資事業として提案される。

社会評価

本プロジェクトによる社会便益は以下のように想定される。

- * **ボゴタ平原東部山地帯地下水開発・保全事業**:
 - 1) 緊急時の給水確保効果
 - 2) 貧困地帯である Soacha 地域における給水施設の建設効果
 - 3) 山林火災時の消火用水確保効果
- * **ボゴタ平原地下水高度利用地域地下水保全事業**
 - 人工涵養による地下水位低下防止効果
 - 人工涵養による地下水使用可能量増大効果
 - 緊急時(渇水)の灌漑用水確保
- * **プロジェクト全体**: 雇用増加および地域経済活性化効果が見込める。その雇用効果は、東部山地帯プロジェクトで 13 億コロンビア、西部平原プロジェクトで 26 億コロンビアと推定される。