

第3章 水資源開発ポテンシャル

3.1 表流水開発ポテンシャル

2000年時点でボゴタ流域内での水使用量は $2.35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ ($27.22 \text{ m}^3/\text{sec}$) であり、年間約 $857.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ に達する。流域内河川年間平均流量 $1,070 \times 10^6 \text{ m}^3$ の約 8 割に相当する。CAR は維持流量を年平均流量の 25% に設定しているため、これを考慮した場合、平水年でも河川取水量が資源量を超えていることになる。

3.1.1 ボゴタ川水系

水資源の有効利用のため、特に豊水期の高流量を渇水期に利用するため、ボゴタ流域内では上流部（北部）を中心に Tomine、Sisga 等 9 箇所ダム・貯水池が建設された。これら 9 箇所のダム・貯水池のうち 8 箇所がボゴタ流域内にあり、Chuza ダムはボゴタ流域外の東方の山地域にある。これらダムや貯水池の規模及び位置は図 2.3-1 に示している。



(出典：Acueducto)

図 2.3-1 既存ダム・貯水池の位置と規模

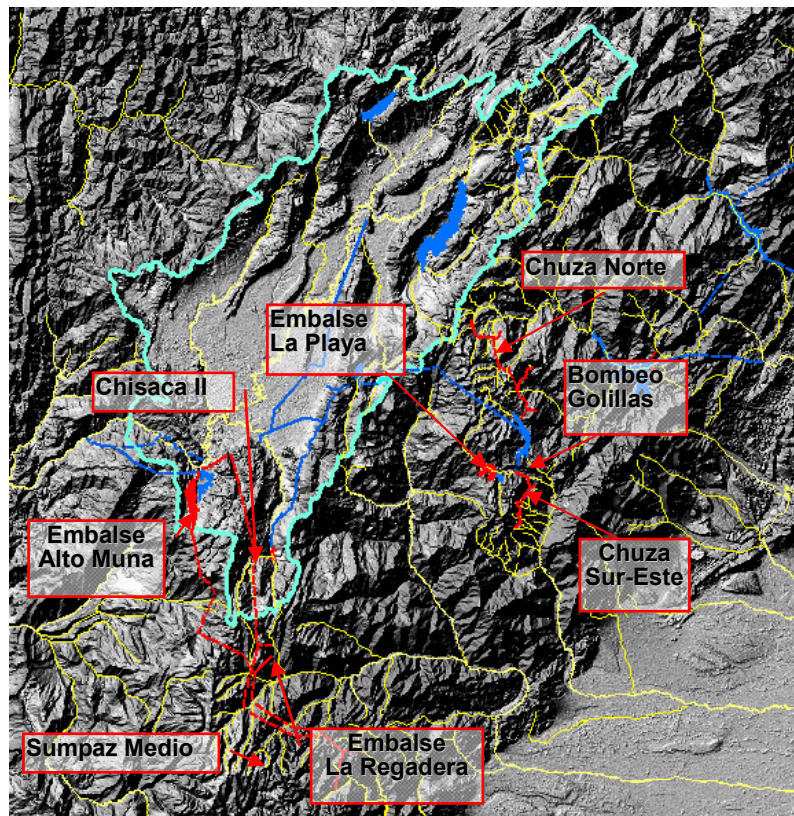
流域内のダムは水量調節が可能だが、河川水量が不足しており水需要量を満足することはでき

ない。そのため、ボゴタ流域外の Chuza ダムからの大量導水事業が実施された。1997 年の導水トンネル崩壊事故が発生した年を除くと、1988 年から 2000 年の 12 年間の年平均導水量は $36.89 \times 10^9 \text{ m}^3$ であった。これはボゴタ流域内の自然条件下で形成された地表水資源量の約 3 分の 1 に相当する。この大規模導水事業はボゴタ流域内の水不足を大きく緩和し、現在のところ農業用水以外の分野での水不足、特に給水に関しては大きな支障は生じていない。しかし、ボゴタ市の経済発展トレンド及び人口増加、生活レベル向上等によって、2028 年には新たな水資源開発が必要と予測されている。その対策として、Acueducto は Chingaza 地区の水源地拡張事業等によって、ボゴタ流域外から更に多くの河川水を導入することを予定している。

3.1.2 その他の水系

(1) ACUEDUCTO の給水施設拡張計画

Acueducto の給水施設拡張計画によると、ボゴタの生活用水を保障するために流域外東部 Chuza を中心とした施設拡張と南部の Sumpaz を中心とした施設拡張を検討中である。拡張計画の事業名と実施予定地は図 2.3-2 に示すとおりである。



(出典：JICA 調査団)

図 2.3-2 Acueducto の給水施設拡張事業名と実施予定地

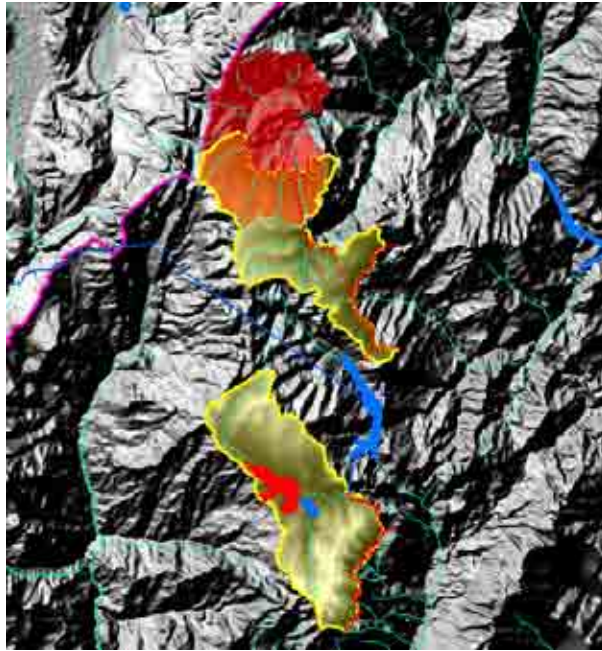
(2) Chingaza 拡張計画

Chingaza 拡張計画に関わる集水域は完全にボゴタ流域外に位置する。計画は既存の Chuza ダム北部での集水施設増設と南部での集水施設増設計画に分けられている。この 2 箇所の集水域の分布を図 2.3-3 に示す。集水域の平均高度は海拔 3,393m で、合計集水面積は約 223 km^2 である。

水文解析において収集した流量観測所の集水域は図 2.3- 3 の赤い部分で示されており、拡張計画の集水域の中にある。これらの流量観測所の解析結果を用いて拡張計画の評価を行う。関連河川流量観測所のコードは 3506711 (Sueva - Rio Balcones) で 1971 年—1998 年の 28 年間の流量観測データで計算すると、比流出率は 38.5 リットル/sec/km² である。この数値に基づいて東部拡張事業で増加する給水量を計算すると、集水可能水量は以下ようになる。

$$\text{流域面積 } 223 \text{ km}^2 \times 38.5 \text{ リットル/sec/km}^2 = 8.5 \text{ m}^3/\text{sec}$$

Chigaza 拡張計画による新規水源開発量は 6.13 m³/sec であり、上記の集水可能水量で十分に賄えることになる。



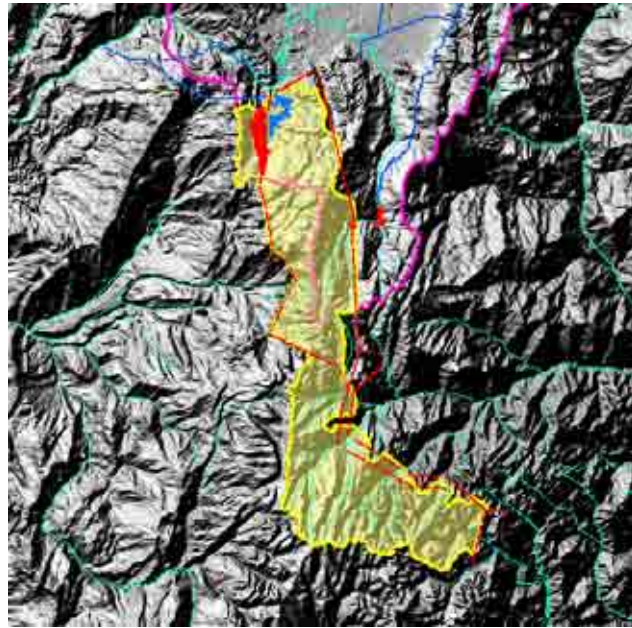
黄色：拡張計画集水域、赤色：関連河川流量観測集水域

(出典：JICA 調査団)

図 2.3- 3 東部拡張計画に関わる集水域と関連河川流量観測所の集水域

(3) Sumapaz 水源開発計画

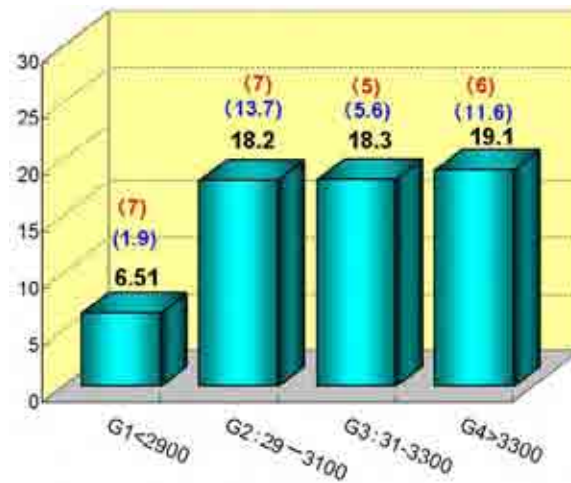
Sumapaz 水源開発計画は水路やダム建設による給水能力の向上を図ることを目的としており、この計画には Tunjuelo 川の地表水の有効利用も含まれている。事業に関わる集水域は図 2.3- 4 に示すとおりである。集水域はボゴタ流域の南側に位置し、大部分はボゴタ流域外に位置するが、一部はボゴタ流域も含む。集水域の平均海拔標高は 3,434m、全集水面積は約 678 km² である。標高の高い地域では降雨量が多く河川流出量も多いことが水文上の特性であり、ボゴタ流域でも同様であるのは前節で述べたとおりである。



黄色：南部拡張計画の集水域、赤：計画貯水池、青：既存貯水池
(出典：JICA 調査団)

図 2.3- 4 南部拡張計画に関わる集水域

今回調査で収集したデータに基づき、比流量と標高との関係を検討した結果を図 2.3- 5 示す。



(出典：JICA 調査団)

注) 図中の黒い数字は各標高グループの平均比流量 (ℓ/秒/km²、青数字は標準偏差、赤数字は各グループのサンプル数である。グラフの縦軸は比流量、横軸の G1～C4 は標高(m)。

図 2.3- 5 比流量と標高との関係

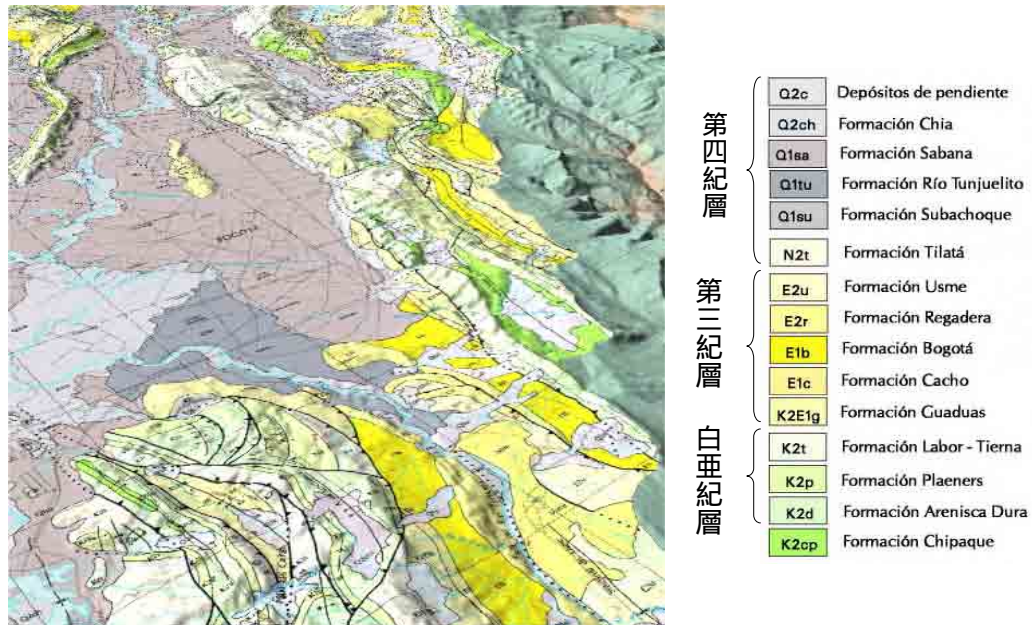
この結果を用いて Sumapaz 地区水源開発計画を評価すると、計画関連集水域における集水可能量は、集水域面積に比流出率を乗じて以下のとおり計算される。

$$\text{面積 } 678 \text{ km}^2 \times \text{比流出率 } 19.1 \text{ ℓ/秒/km}^2 = 12.95 \text{ m}^3/\text{秒}$$

3.2 地下水開発ポテンシャル

3.2.1 帯水層の分布

調査地域の地形は地質をよく反映しているため、帯水層の分布は地形との関連が深い。すなわち、白亜紀帯水層の分布地域は全般的に急峻な山地をなし、第三紀帯水層の分布域は山麓部の緩傾斜面をなし、第四紀帯水層の分布域は低平地をなしている(図 2.3-6 参照)。なお、第四紀帯水層の下位には第三紀帯水層が伏在し、更にその下位には白亜紀帯水層が山地部から連続的に分布している。



(出典：INGEOMINAS 図から JICA 調査団作成)

図 2.3-6 地形と帯水層の分布の関係

岩盤（割れ目性媒体）中の地下水

ボゴタ平原の帯水層のうち第三紀帯水層および白亜紀帯水層は割れ目性媒体である岩盤からなっている。大規模土木構造物の掘削面やトンネルの施工などに伴って観察される諸現象から、岩盤中の地下水流動には次のような特徴があることが経験的に知られている。これらは広域地下水流動の一側面を表しているに過ぎない点に留意する必要があるが、中視的スケールでの岩盤中の地下水賦存状況を考える大きなヒントを提供してくれている。

- ① 地下水は割れ目に沿って流れている（割れ目湧水）
- ② 同一平面・同一標高に隣接して存在するのに湧水量の多い割れ目と少ない割れ目、全く湧水の観察されない割れ目がある
- ③ 断層を介して地下水位のギャップがある場合がある（断層が遮水している、あるいは流動方向を規制している）
- ④ 断層沿いの破碎帯あるいは破碎影響ゾーンは大きな水みちとなっている場合がある
- ⑤ 開口割れ目は極端に水を通す(開口＝広義の引張割目)

岩盤中に賦存する地下水のこのような特徴を念頭に置いて、調査地における地下水の入れ物と

して可能性の高い地層と地質構造的な位置についてまとめると、以下のとおりである。

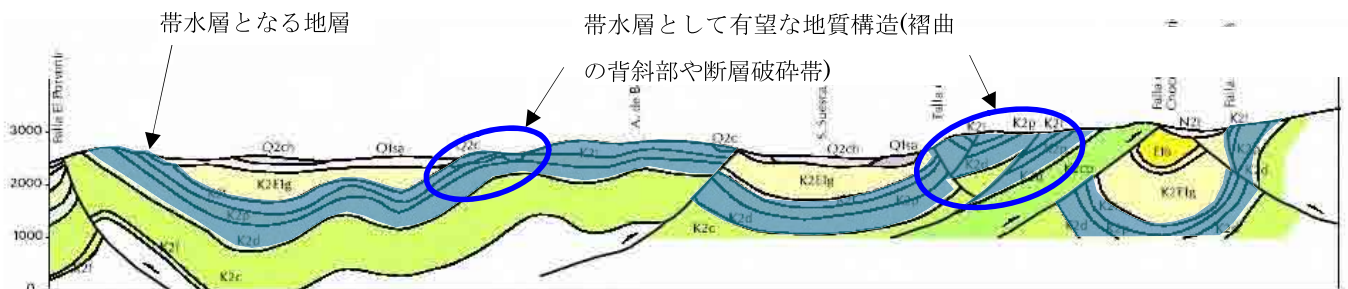
帯水層となる可能性の高い地層

岩盤中の地下水は割れ目に賦存しているため、地層を「地下水の入れ物」としてみた場合、割れ目に富む地層が帯水層となる可能性が高い地層といえる。調査地には砂岩、泥岩、粘土岩等で構成される白亜系が広く分布しており、NNE-SSW系ないしはNE-SW系の褶曲軸を有する背斜・向斜を繰り返している。砂岩は泥岩や粘土岩等に比べて硬質で脆性が高いため、構造運動を被ったときに砂岩中には相対的に割れ目が発達しやすい。このような観点から、調査地に分布する白亜系のうち、砂岩を主体とする Arenisca Dura 層と Labor-Tierna 層が帯水層となる可能性の高い地層としてあげられる。

割れ目が多く発達する可能性が高い地質構造的な位置

一般的に岩盤中の割れ目が多く発達する地質構造的な位置としては、断層沿いの破砕帯及び破砕影響ゾーンがあげられる。また、背斜軸の周辺部には開口性割れ目が発達することが多く、地下水の入れ物として期待出来る。

なお、上述した地質要素はあくまでも地下水の入れ物としての可能性が高いということであり、このような箇所に地下水が賦存するためには、地下水を十分に供給できる流域が必要である。地下水の流域は水文地質構造に支配されるため、地表水の流域とは異なる可能性もあるが、岩盤からなる山地部の地下水流域としては地表水の流域とほぼ同一であることが多い。



(出典：ボゴタ市北部を通過するボゴタ平原の東西断面。INGEOMINAS の地質図に JICA 調査団が加筆)

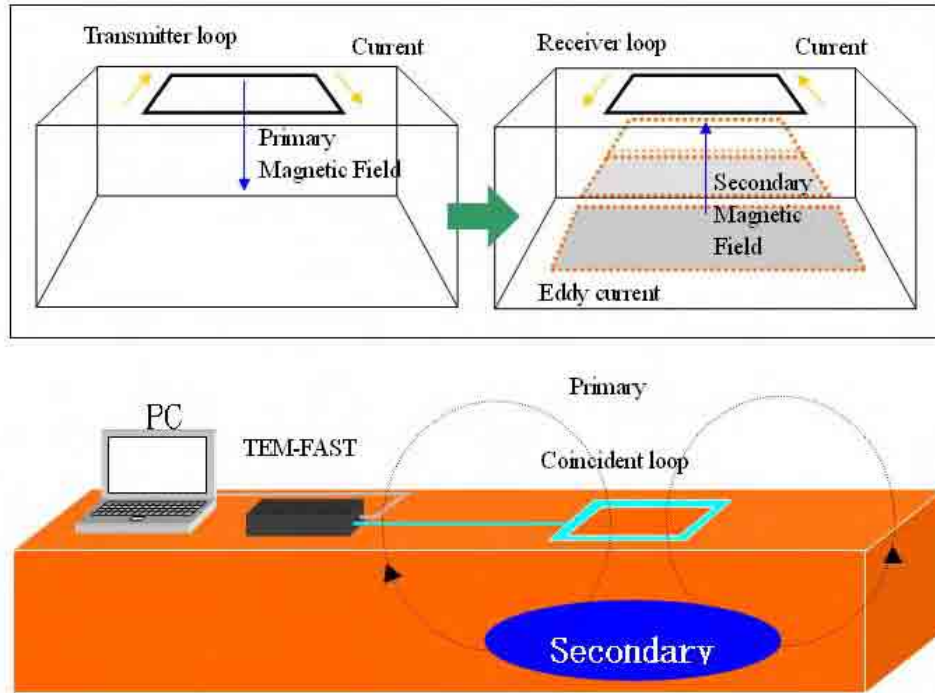
図 2.3-7 調査地域の水理地質構造

3.2.2 物理探査

(1) 物理探査の方法

(a) 理論

本調査の物理探査として TEM 法を実施した。TEM 法は電磁誘導現象を利用して大地に電流を誘導する電磁法物理探査手法の 1 つである。時間によって変化する磁界が地球表面上のコイルあるいはワイヤループから発生する。ファラデーの電磁誘導の法則は変化する磁界が電界を生じ、それが順番に電流を産み出すことを示している。こうして、送信ループから発生された一次磁界が大地に二次電流を引き起こす。最終的に、大地の二次電流によって発生される二次磁界が測定される。この方法は過渡現象電磁探査 (TEM) あるいは時間領域電磁探査 (TDEM) と呼ばれる。本調査ではこの方法を TEM 法と呼ぶ。



(出典：ローランド・B・フレンチ、Ph.D、 R.G.:Time-Domain の電磁気の検証)

図 2.3- 8 TEM 法の測定原理

1) TEM の利点

TEM 法は、伝統的な直流法電気探査手法や他の電磁探査手法に対して、いくつかの利点を持っている。TEM 法は接地された電極、長い送信ダイポール、長い電極配置、大出力の発電機等を必要としない。直流法電気探査は、深度 3 百メートルの探査の場合、9 百メートル以上の長さにあたって配線し、電極を配置する必要がある。電磁探査 CSAMT 法は、調査地から 4~8km 離れた場所に 1km 以上の送信電極を設置し送信する必要がある。それに比べて、TEM 法は、200m の送受信ループで数百メートルの探査深度の情報を得ることができる。

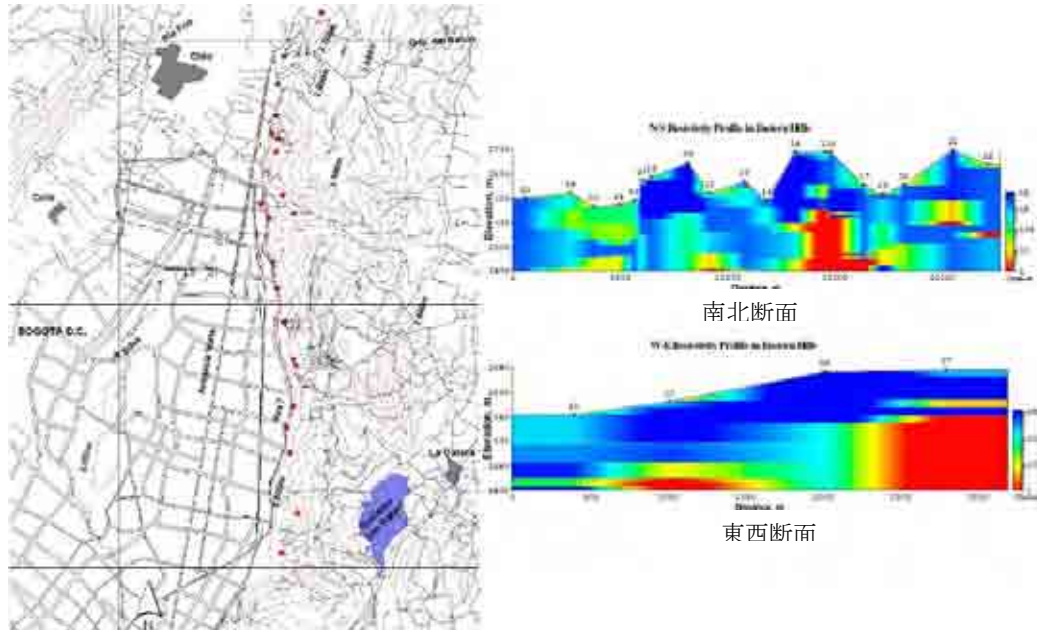
2) 現地調査

TEM 法調査が次の 3 地域、南部丘陵、東部山地、Usme 地区で実施された。TEM 法測定点を図 2.3- 9~図 2.3- 11 に示す。TEM 法調査の信号は送電線、金属材料、発電機、車、パイプライン、携帯電話とワイヤレス機器から影響を受けるため、TEM 法測定点は慎重に選定された。今回使用した探査機器「TEM-FAST」は、同じ正方形のループが受信器ループと送信機ループとして使用されることを意味する coincident Loop を使用する。25m、50m、200m の 3 種の大きさの coincident Loop がこの調査で使用された。

3) 調査の結果

a) 東部山地

TEM 調査が東部山地の 22 測点で行なわれた。東部山地の西斜面には高級住宅地と採石場が散在している。TEM 調査は牧草地あるいは採石場で実施された。東部山地での測定点の大部分が高比抵抗の第 1 層と低比抵抗の第 2 層から成る 2 層モデルとして解析された。

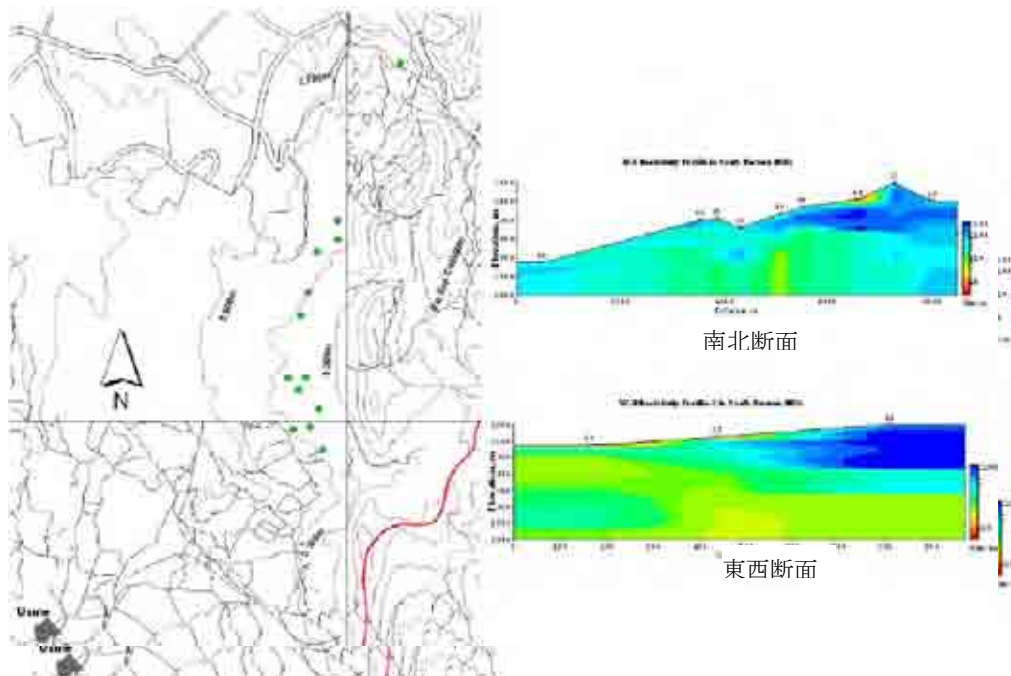


(出典：JICA 調査団)

図 2.3-9 東部山地における TEM 探査実施地点及び解析結果

b) Usme 地区

TEM 調査が Usme 地区の 13 測定点で行なわれた。TEM 調査測定点は Usme 地区の山麓の雑草地に主に存在する。Usme 地区の測定点の大部分が高比抵抗の第 1 層と低比抵抗の第 2 層から成る 2 層モデルとして解析された。標高の低い測定点は、標高の高い測定点に比べて、第 1 層と第 2 層の比抵抗差の少ない構造を示している。



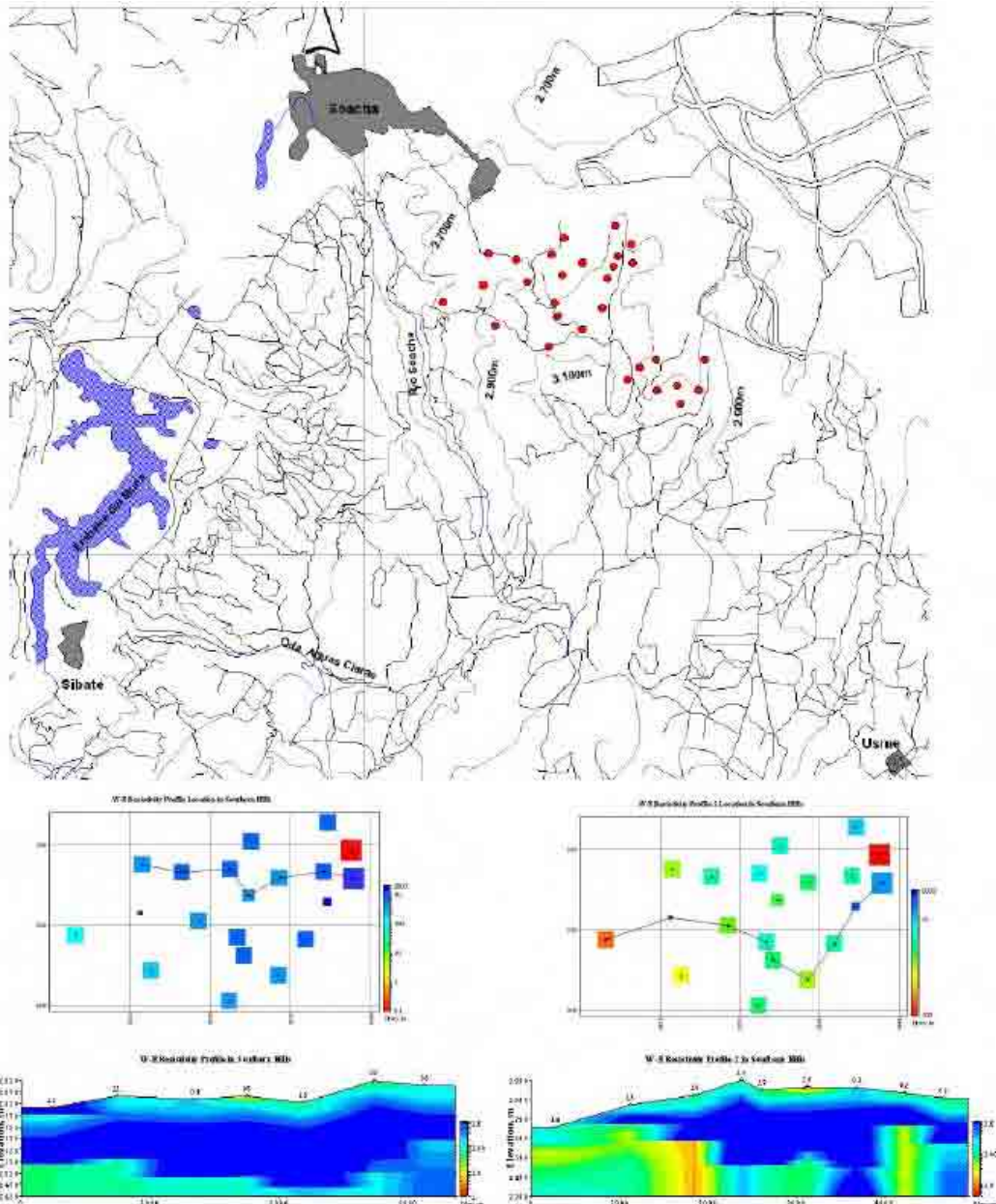
(出典：JICA 調査団)

図 2.3-10 Usme 地域における TEM 探査地点と解析結果

c) 南部丘陵

TEM 調査が南部丘陵の 29 測定点で行なわれた。南部丘陵は大まかに 2 つの部分に分類される。南部丘陵の北斜面には貧困居住区が密集し、その南側に位置するより標高の高い土地は牧草地として使われている。TEM 調査は牧草地域で実施された。

南部丘陵の測定点の大部分が高比抵抗の第 1 層と低比抵抗の第 2 層から成る 2 層モデルとして解析された。第 1 層が数千 Ωm の極めて高い比抵抗を示し、そして、その厚さは概ね百 m 以上となっている。第 2 層は $10\Omega\text{m}$ 以下の低比抵抗を示す。



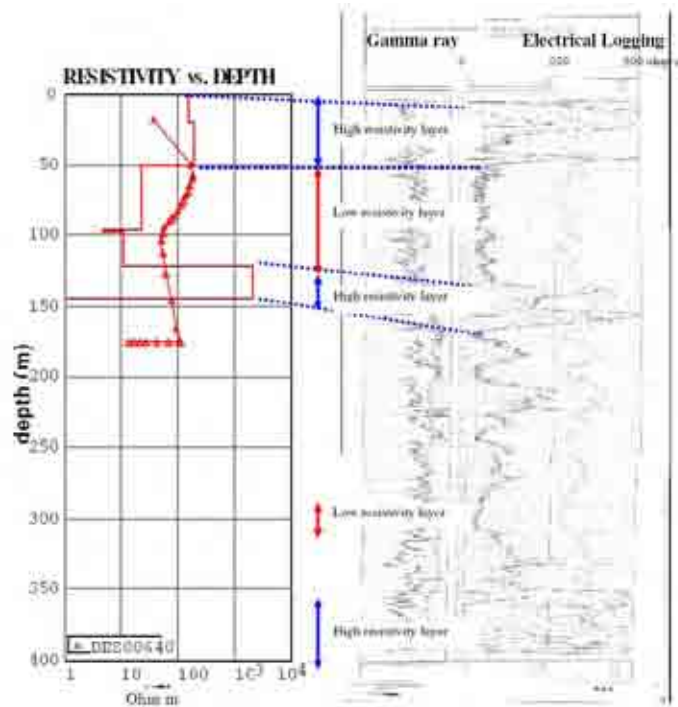
(出典：JICA 調査団)

図 2.3- 11 南部丘陵地区における TEM 探査地点と解析結果

(2) 解析

(a) 既存井戸の電気検層結果と TEM 法解析結果の比較

TEM 調査が前回 JICA 開発調査で掘削した Suba 観測井のサイトで実施された。TEM 法解析結果を電気検層結果と比較し、TEM 法結果から水理構造を考察する根拠とした。次の図は TEM 法測定結果から解析された 1 次元モデルと Suba 観測井の電気検層結果との対比を示す。



(出典：JICA 調査団)

図 2.3- 12 観測井の電気検層結果と対比

上の図 2.3- 12 の右側の電気検層図の高比抵抗域は調査地域の主要帯水層である白亜紀の Guadalupe 層砂岩が卓越する部分である。また、低比抵抗域は不透水層である Guadalupe 層泥岩が卓越する部分である。深度 150m までの比抵抗構造については、TEM 法解析結果と井戸の電気検層結果は良い一致を示している。一方、当地点における TEM 法では深部の比抵抗構造が得られていない。これは、既存井戸の近傍に設定した本サイトが高压送電線に囲まれていたため、ノイズの影響を受けた結果である。

白亜紀 Guadalupe 層においては、砂岩層と泥岩層がそれぞれ高比抵抗帯水層と低比抵抗不透水層として TEM 法から解析可能と判断された。

(b) 帯水層の分布

TEM 法の結果から、水理地質的な地層区分を行った。判定基準は以下のとおりである。

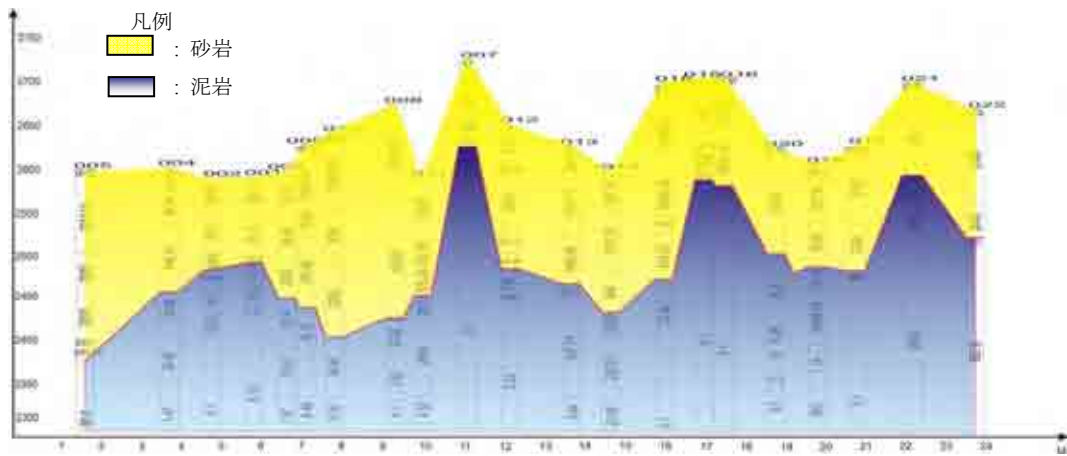
- 比抵抗値が 100 Ω m 以上の地層：砂岩層であり、帯水層となり得る
- 比抵抗値が 100 Ω m 以下の地層：頁岩層であり、帯水層と成りがたい

調査地域の砂岩層と頁岩層は複雑に互層している。物理探査の解釈に当たっては、砂岩の優勢

な地層と頁岩の優勢な地層の2つ区分を行い、地層構成を単純化した。その結果を図 2.3- 13～図 2.3- 15 に示す。



(a) 物理探査測線 (東部山地)



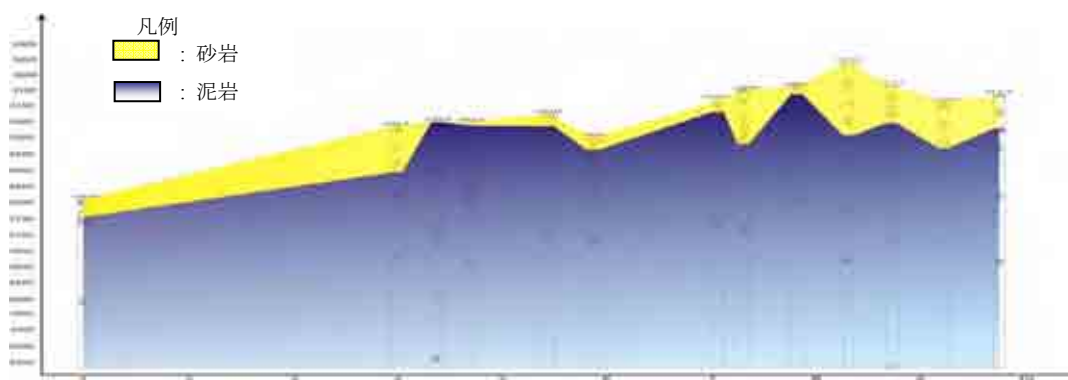
(b) 解析断面 B-B

(出典：JICA 調査団)

図 2.3- 13 物理探査結果 (東部山地)



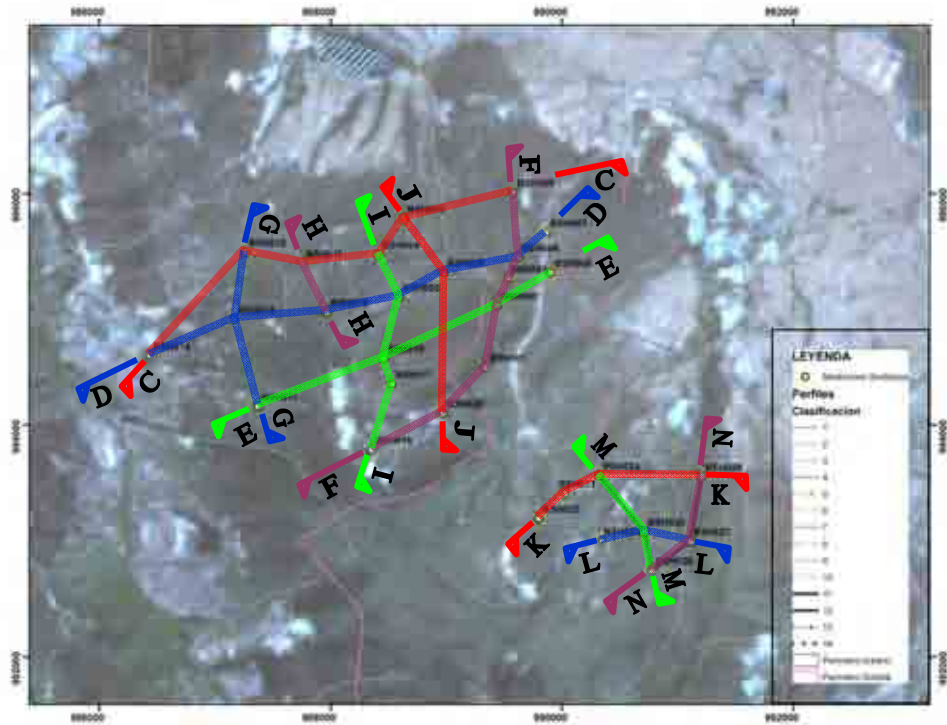
(a) 物理探査側線(Usme 地区)



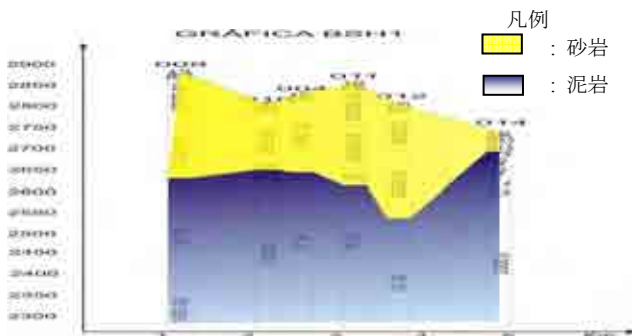
(b) 解析断面図 A-A

(出典：JICA 調査団)

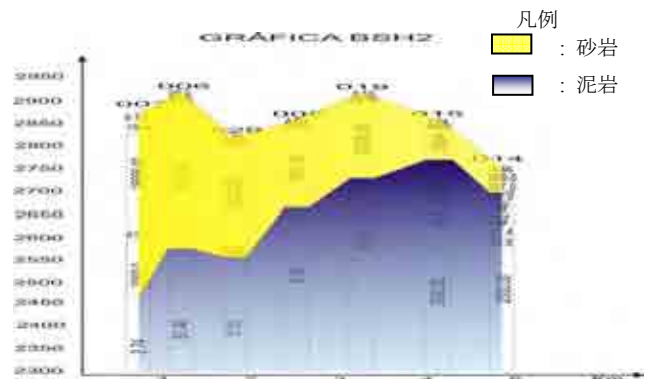
図 2.3-14 物理探査側線(Usme 地区)



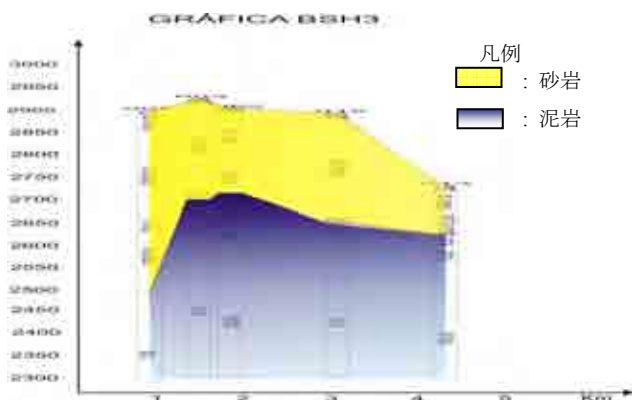
(a) 物理探査測線図(南部丘陵地区)



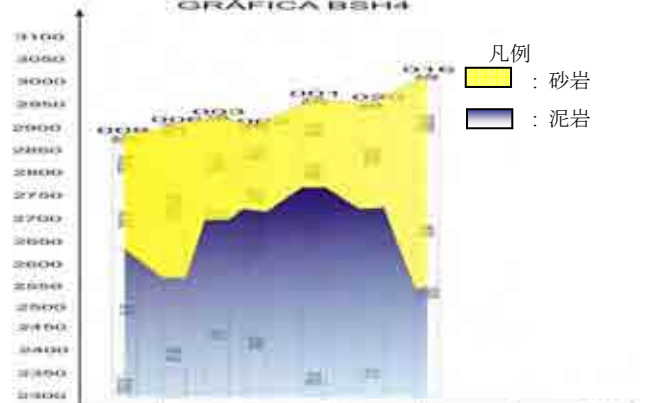
解析断面 C-C



解析断面 H-H



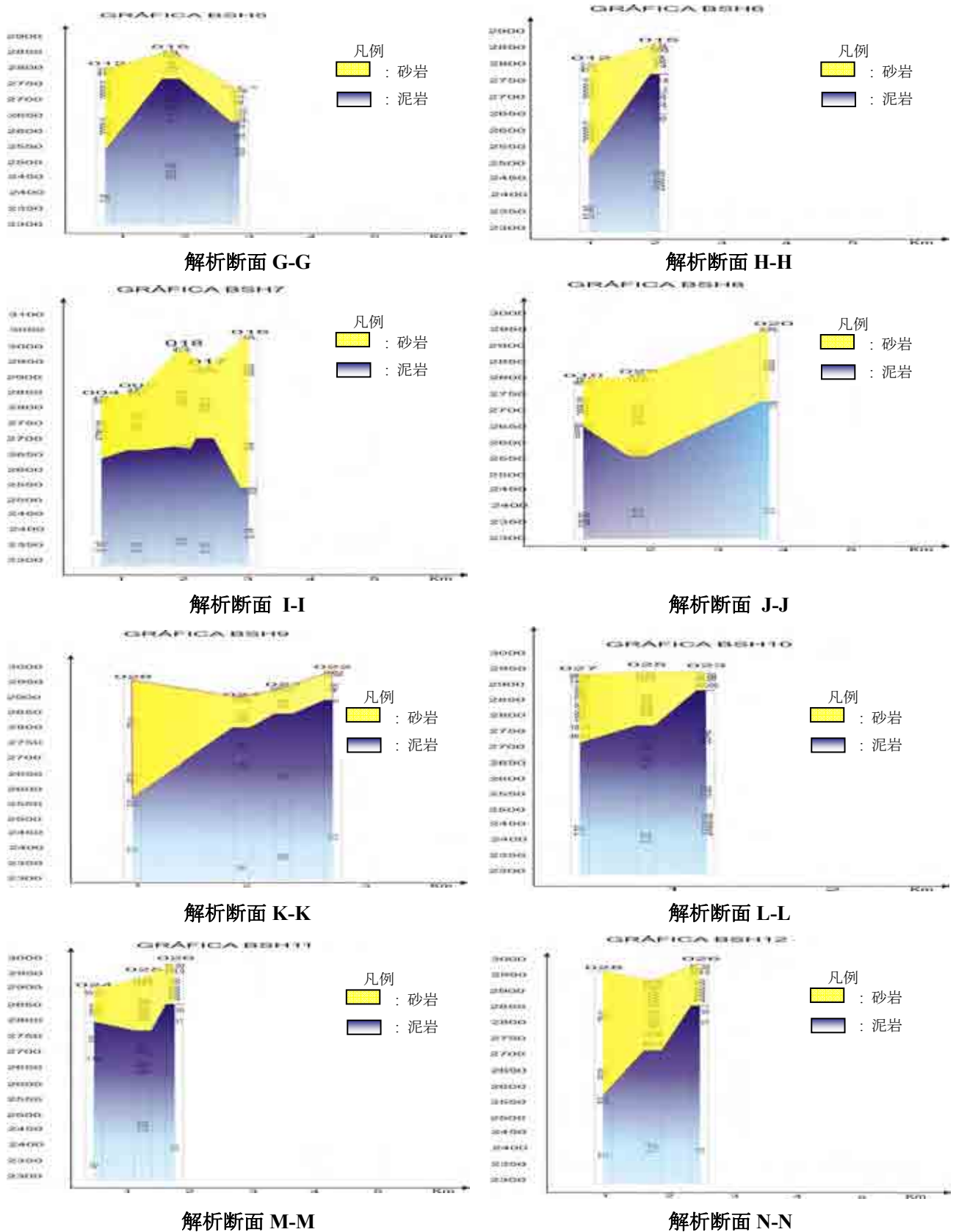
解析断面 E-E



解析断面 F-F

(出典：JICA 調査団)

図 2.3- 15 (1) 物理探査結果 (南部丘陵地区)



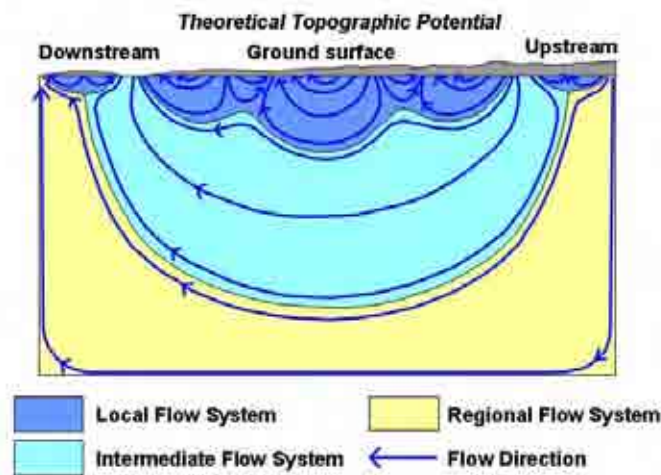
(出典：JICA 調査団)

図 2.3-15 (2) 物理探査結果 (南部丘陵地区)

3.2.3 地下水賦存量

(1) 地下水流動系

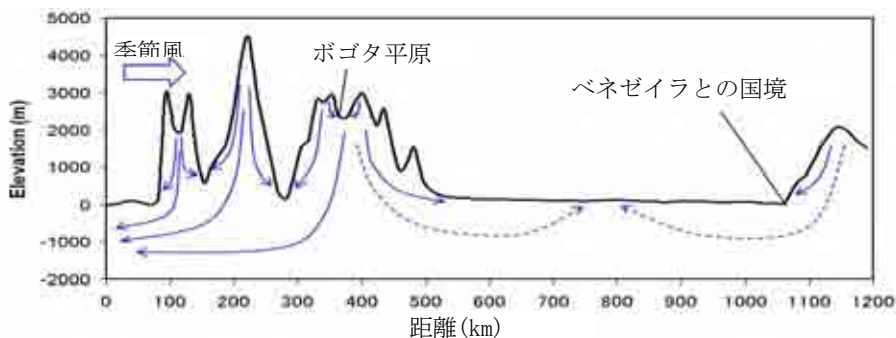
ボゴタ流域では地下水涵養量がない等の議論があるため、地下水涵養や賦存量を論じる前提として地下水流動の基本概念明らかにする必要がある。水が高いところから低いところへ、あるいは水頭・ポテンシャルの高いところから低いところに流れることは最も一般的な常識である。図 2.3-16 は地下水関連の多くの教科書に掲載されている地下水流動系の模式図である。広い地域での地下水流は 3 つのシステムに分けることができる。地域流(regional flow)、中間流(intermediate flow)と局地流(local flow)である。



(出典：Toth, 1963)

図 2.3-16 地下水流動系の基本概念

図 2.3-17 はボゴタ流域を通り西側の太平洋から東側のベネズエラに至る地形断面である。図 2.3-16 に示した地下水流動系の構造と対応させると、ボゴタ流域内の局地流は山地域からボゴタ盆地への地下水流で、中間流はアンデイス山脈から西側の河川もしくは東側の平原地域への流れ、地域流はボゴタ流域から太平洋への流れである。ボゴタ流域での地下水位が各流動先の地下水位より高い限り、この地下水の流れが発生する。すなわち、ボゴタ流域で地下水の涵養がなければ、この地下水の流れによって流域内の地下水位は低下する一方となる。従って、地下水涵養の存在は明白であるため、ここで議論すべきは地下水涵養量の大小となる。

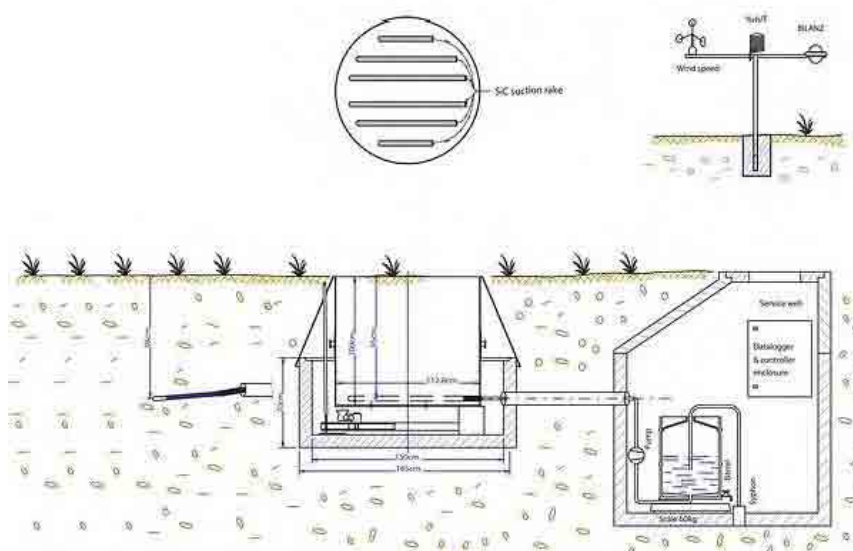


(出典：JICA 調査団)

図 2.3-17 ボゴタ流域及び周辺の地下水流動系

(2) 地下水涵養量観測

地下水涵養量を把握する最も信頼できる方法は涵養量の実測である。地下水涵養量を実測するには図 2.3- 18 に示したライシメーターが多く利用される。地下水位モニタリングの結果も地下水涵養量を把握するのに大きく役立つ。その他テンションメーター等、地下水涵養量そのものではなく、土壌水分の流れる方向を測定する方法等がある。ボゴタ農業大学等の研究機関ではすでに降雨の土壌浸透に関する観測が始まった。しかし、観測は今年始まったばかりであり、結果の利用はまだできない。



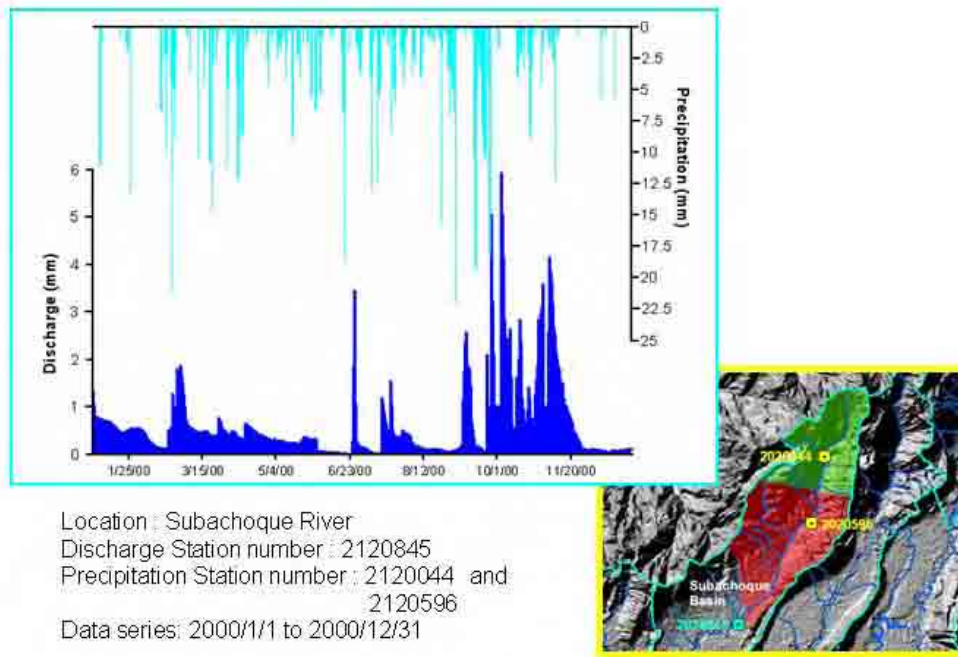
(出典：JICA 調査団)

図 2.3- 18 ライシメーターによる地下水涵養量観測の模式図

(3) タンクモデル解析

河川流量解析のために開発されたタンクモデルも、地下水涵養量の解析に利用できる。しかし、精度良く地下水涵養量を推測するには、やはり地下水観測結果のデータも利用した方がよい。地下水観測のデータが無い場合、推定精度が落ちることは避けられないが、降雨の流出過程をシミュレーションして、降雨の直接流出、基底流出及び深層地下水帯水層への浸透量の推測に利用できる。

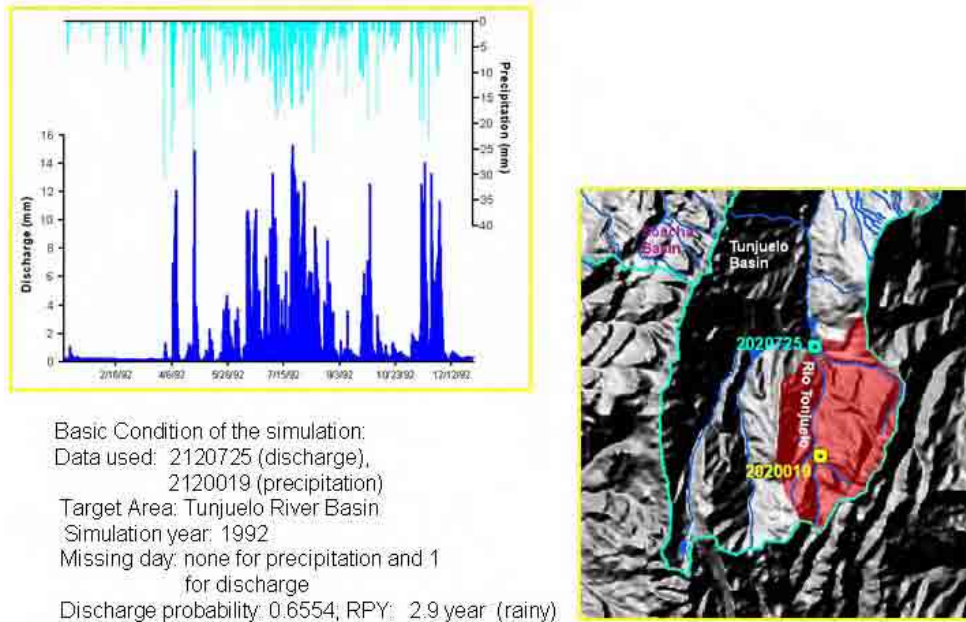
タンクモデルの利用に際しては、降雨と河川流量変動のパターンが対応していることが必要である。図 2.3- 19 に示した例では、降雨量が大きいのに河川流量は小さく、逆に、河川流量が大きいのにこれに対応する大きな降雨はない。このような条件下ではタンクモデルの利用はできない。



(出典 : JICA 調査団)

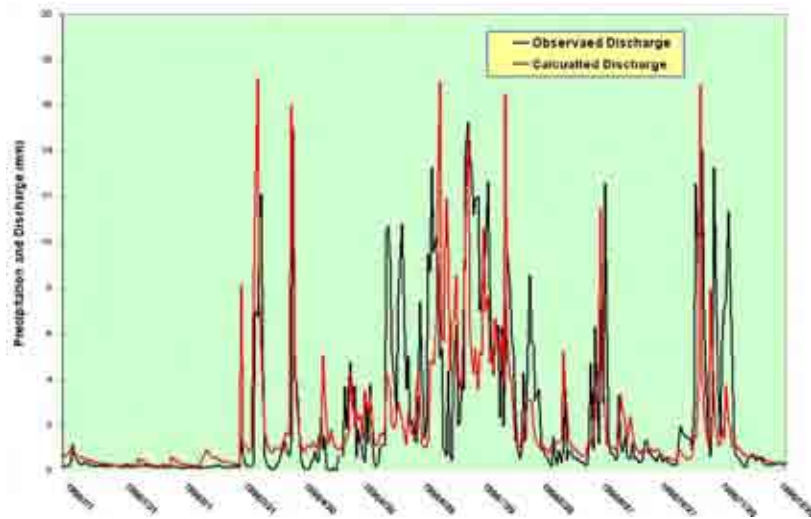
図 2.3- 19 降雨量と河川流量とが対応していない例

図 2.3- 20 は図 2.3- 19 と異なり、降雨と流量のピークがかなり対応している。このような関係を用いて 3 段 1 連のタンクモデルを作成し、降雨量の流出過程を検討することができる。シミュレーションの結果を図 2.3- 21 のグラフに示す。結果として 1,258 mm の降雨量に対し、直接流出は 215 mm (17%)、基底流 575mm (46%)、蒸発散 330mm (26%) 深層への浸透が 153mm (12%) となる。



(出典 : JICA 調査団)

図 2.3- 20 降雨量と河川流量変動が対応している例

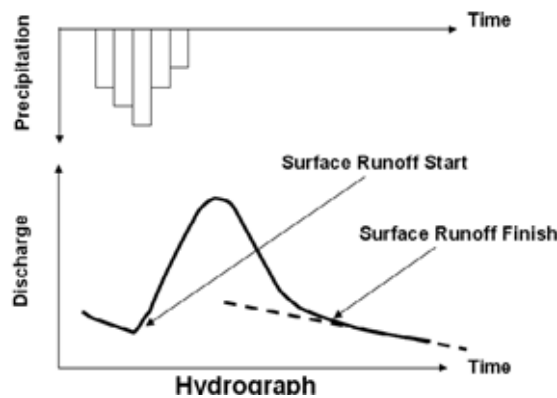


(出典：JICA 調査団)

図 2.3-21 タンクモデルによるシミュレーション結果

(4) 河川流量分析法

降雨量と河川流量の明確な対応関係が無い場合でも、図 2.3-22 の河川流量分析法（ハイドログラフ）を用いて、降雨量の直接流出と基底流量の区分ができる。



(出典：JICA 調査団)

図 2.3-22 ハドログラフ水文分析法の概念

(5) 水収支法解析

上述した実測法や各種解析方法のボゴタ流域への適用はまだ始まったばかりであるが、水収支法による解析は幾つかの関連機関によってすでに実施されている。

水収支法は、流域内の降雨は河川流出、蒸発散及び地下水浸透によって消費されるとの関係を示したものであり、次式で表すことができる。

$$P = D + E + Rd \quad (1)$$

P : 降雨量

D : 河川流出量

E : 蒸発散量

Rd：深層地下水への涵養

式(1)を変形すれば、次の式(2)となる。

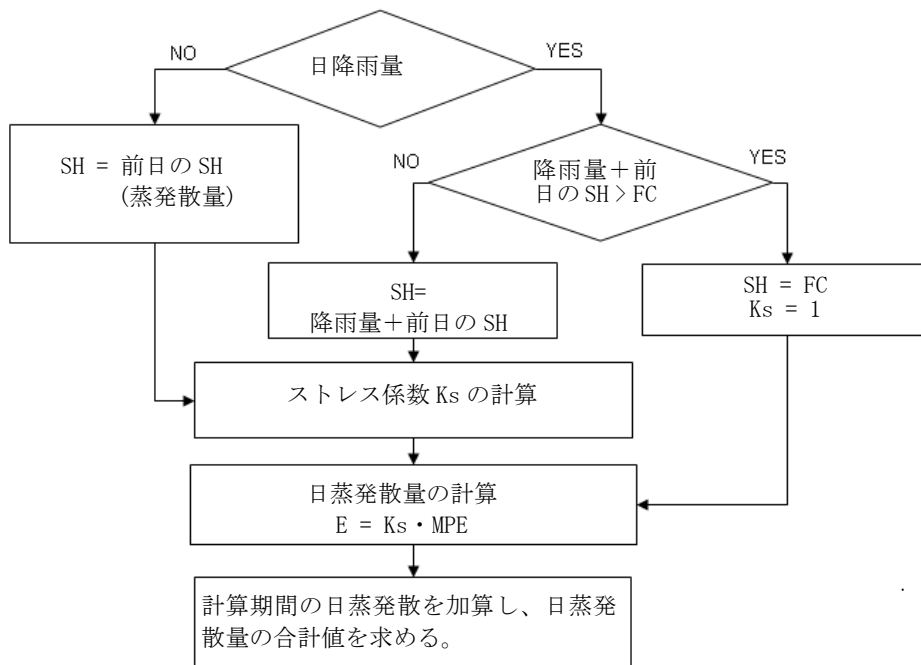
$$Rd = P - D - E \quad (2)$$

すなわち、深層地下水への涵養量は降雨量から河川流量及び蒸発散量を引くことで求められる。降雨量と河川流量は前節で述べたように、水文解析により求められたので、残りの未知数である蒸発散の推定によって地下水涵養量が求められる。

一般に、蒸発散量の推定は地下水涵養量の直接推定に比べて簡単ではない。多くの理論式や経験式が提案されているが、その中最も厳密でかつ良く知られているものに Penman-Monteith 法がある。この方法は理論上の厳密さと引き換えに、10 個以上の気象関連パラメーターを要求する。気象関連パラメーターは収集・測定が困難で結果が変動しやすく、精度保障が困難である等の理由で、簡単に利用できる方法とは言いがたい。そこで本解析では、FAO が灌漑計画を立てるために Panman-Monththeith 法を基に様々な簡素化を行い、その結果をガイドブックにまとめて多くの条件下で利用できるようにした。この FAO 法はボゴタの水資源管理機関によって、ボゴタ流域の蒸発散量の解析に利用されたため、今回の解析でも同じ FAO 方法を利用することにした。

(a) 解析手順

FAO 法は灌漑計画を立てるために開発された方法である。基本的に一つの降雨後に何日間か経過すると土壌水分は蒸発散によって失われるため、灌漑により土壌水分の補充をする必要があるかを検討するための方法である。その計算のフローチャートは図 2.3- 23 のようになる。



(出典：FAO)

注) SH は土壌水分 Soil Humidity、FC は圃場容水量 (Field Capacity)、Ks はストレス係数 (Stress Coefficient)、MPE は蒸発散能 (Maximum Potential Evapotranspiration)

図 2.3- 23 FAO 法の蒸発散量推測のためのフローチャート

(b) 関連パラメーターの設定

1) 蒸発パンデータ(Kp)から基準蒸発散量 (ET₀) を算出するための係数

FAO のガイドブックでは表 2.3-1 に示す各種条件下での Kp 値を提案した。ボゴタ流域の気象条件（中位の湿度と中位の風速）を考えると、0.7 以下に設定するべきだが、蒸発散量の過小評価を防ぐために、Kp を 0.7 にした。

表 2.3-1 パン係数の設定基準 (FAO)

風速 (m s ⁻¹)	風向き方向の植生間距離 (m)	平均湿度(%)		
		低 < 40	中 40 - 70	高 > 70
低	1	.55	.65	.75
	10	.65	.75	.85
	100	.7	.8	.85
< 2	1000	.75	.85	.85
	1	.5	.6	.65
	10	.6	.7	.75
中	100	.65	.75	.8
	1000	.7	.8	.8
	1	.45	.5	.6
高	10	.55	.6	.65
	100	.6	.65	.7
	1000	.65	.7	.75
5-8	1	.4	.45	.5
	10	.45	.55	.6
	100	.5	.6	.65
強	1000	.55	.6	.65
	1	.4	.45	.5
	10	.45	.55	.6
> 8	100	.5	.6	.65
	1000	.55	.6	.65

(出典 : FAO)

2) 圃場容水量 (FC)

表 2.3-2 には FAO のガイドブックに提示した各種土壌条件下での圃場容水量を示している。流域内における土壌条件がはっきりしていないので、平均値の 0.269 を採用した。

表 2.3-2 圃場容水量の設定参考値 (FAO)

土壌種類	m ³ /m ³	平均	土壌種類	m ³ /m ³	平均
砂	0.07 - 0.17	0.12	シルト	0.28 - 0.36	0.32
ローム質砂	0.11 - 0.19	0.15	シルト質粘土ローム	0.30 - 0.37	0.34
砂質ローム	0.18 - 0.28	0.23	シルト質粘土	0.30 - 0.42	0.36
ローム	0.20 - 0.30	0.25	粘土	0.32 - 0.40	0.36
シルト質ローム	0.22 - 0.36	0.29	平均	0.22 - 0.32	0.269

(出典 : FAO)

3) シオレ点 (Wilting Point)

表 2.3-3 には FAO のガイドブックに提示した各種土壌条件下でのシオレ点の値を示している。圃場用水量の設定と同じ理由で、その平均値の 0.1228 を採用した。

表 2.3-3 シオレ点の設定参考値 (FAO)

土壌種類	m ³ /m ³	平均	TAW	土壌種類	m ³ /m ³	平均	TAW
砂	0.02 - 0.07	0.045	0.075	シルト	0.12 - 0.22	0.17	0.15
ローム質砂	0.03 - 0.10	0.065	0.085	シルト質粘土ローム	0.17 - 0.24	0.205	0.135
砂質ローム	0.06 - 0.16	0.11	0.12	シルト質粘土	0.17 - 0.29	0.23	0.13
ローム	0.07 - 0.17	0.12	0.13	粘土	0.20 - 0.24	0.22	0.14
シルト質ローム	0.09 - 0.21	0.15	0.14	平均	0.10 - 0.19	0.146	0.1228

(出典 : FAO)

4) 植物係数 K_c (crop coefficient)

表 2.3-4 には FAO のガイドブックに掲載された K_c を示す。表からわかるように K_c は植物の品種、生育期間によって 0.25 から 1.25 まで大きく変動する。前節で説明した蒸発散の推定法は理論的に厳密ではあるが、実際の応用上では困難なことが多い。この植物係数の設定は従来ボゴタ流域で同様の計算を行うときに設定された係数を参照し、蒸発散量を過小評価しないよう 0.8 に設定した。

表 2.3-4 植物係数 K_c の設定参考値 (FAO)

穀物	K _{cini1}	K _{c mid}	K _{c end}	穀物	K _{cini1}	K _{c mid}	K _{c end}
a.小野菜	0.7	1.05	0.95	h.油料作物	0.35	1.15	0.35
b.野菜-トマト類	0.6	1.15	0.80	i.穀草	0.3	1.15	0.4
c.野菜-キュウリ類	0.5	1.00	0.80	j.まぐさ	0.4-0.95	0.9-1.05	0.85-1.0
d.根と茎	0.5	1.10	0.95	k.サトウキビ	0.40	1.25	0.75
e.マメ科植物	0.4	1.15	0.55	l.熱帯果物と樹木	0.5-0.95	0.3-1.05	0.3-1.05
f.多年生植物	0.5	1.00	0.80	m.ブドウとベリー	0.3	0.7-1.05	0.45-0.85
g.繊維作物	0.35	0.4-1.2	0.25-0.7	n.果樹	0.4-1.0	0.45-1.2	0.45-0.9

(出典 : FAO)

ちなみに、種蒔前や収穫後等の休耕時、或いは地表面の大部分が土壌面の場合は、K_c は 0.15～0.2 の間にあると FAO のガイドブックに記載されている。すなわち、実際発生する蒸発散量は推定値より小さい可能性が大きい。

5) 植物根圏ゾーン (root zone)

FAO のガイドブックには (Table 22) 約 100 種類の植物の最大根深度 (Maximum Root Depth) が掲載されている。その変動範囲は 0.3 m から 2.0 m で、多くは 0.5 m 前後である。従って、植物根圏の深さは 0.5 m に設定した。

ちなみに、種蒔前や収穫後等の休耕時、或いは地表面の大部分は土壌面の場合、蒸発散の影響深度は 0.1～0.15 m (Ze depth of the surface soil layer that is subject to drying by way of evaporation [0.10-0.15m].) と FAO のガイドブックに記載がある。

(c) 解析結果

以上の設定値を用いて、前回の JICA 調査と同様に 14 箇所の気象観測所の蒸発パルデータを利用して蒸発散量の再計算を行った。計算に用いたデータとその結果は表 2.3-5 に示す。

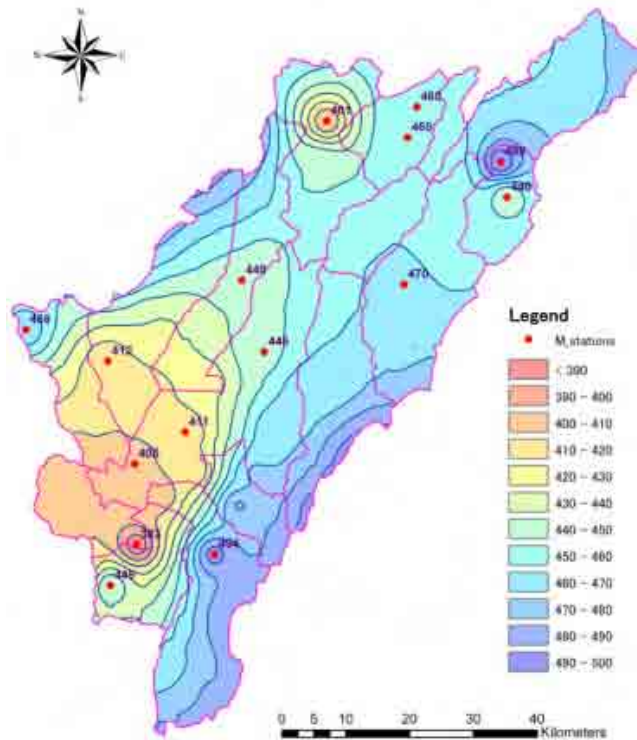
表 2.3-5 蒸発散量推測に用いたデータと推測結果

Code	Station	Duration	E_pan_avrg	ER_avrg	STDEV	Max	Min
2120633	Barrancas	91-98	1,124	460	35.6	531	1996
2120540	Checua	91-98	1,369	460	55.8	562	1996
2120630	DonaJuana	94-98	1,280	494	82.2	541	1994
2120562	Guatavita	91-98	1,194	470	72.7	541	1994
2120559	Guymaral	91-98	998	446	32.3	471	1996
2120611	Balsillas	88-91	837	405	34.3	412	1991
2120548	La Iberia	91-98	1,034	440	49.8	459	1992
2120561	Muna	91-98	1,014	383	50.6	443	1996
2120541	Neusa	91-98	867	401	69.6	433	1994,95
2120557	Primavera	91-97	1,039	449	48	478	1993
2120516	Ramada	91-98	998	411	52.4	439	1991
2120548	Sisga	93-97	1,081	499	38	527	1997
2120565	Tabio	91-98	1,023	440	75.2	457	1991
2120631	Tisquesusa	91-98	989	412	41.5	464	1996
2120629	Venecia	91-98	1,100	466	117.6	531	1998

(出典：Acueducto)

(d) 流域内での蒸発散量分布

上記で推測した蒸発散量の結果を用いて、ボゴタ流域内の蒸発散分布図を作成し、図 2.3-24 に示す。



(出典：JICA 調査団)

図 2.3-24 ボゴタ流域内の蒸発散量分布

(e) ボゴタ流域内の水収支

水文解析結果と地下水涵養量推定結果を支流毎にまとめて表 2.3-6 に示す。

表 2.3- 6 ボゴタ流域内の支流毎の水収支

流域名	面積 (km ²)	年間降雨量 (mm/年)	河川流出量 (mm/年)	蒸発散量 (mm/年)	地下水涵養量 (mm/年)
Los Arboles	62.7	668	184	458	26
Checua	170.1	782	172	453	157
Neusa	330.4	941	199	445	297
Chicu	329.7	795	163	445	187
Subachoque	397.9	753	99	440	214
Bojaca	220.1	685	191	429	65
小計	1,511	793	160	443	190
Bogota(U)	337.1	851	292	467	92
Bogota(M)	152.3	760	146	457	157
Bogota(L)	620.5	699	143	438	118
Bogota(E)	154.8	691	280	405	6
小計	1,265	792	200	444	148
Sisga	154.3	880	313	461	106
Tomine	404.0	841	373	462	6
Teusaca	335.2	964	328	469	167
Fucha	132.3	926	282	450	194
Tunjuelo	395.5	1030	431	470	129
Soacah	199.2	779	297	429	53
小計	1,620	915	355	460	100
合計	4,396	825	243	450	132

(出典：JICA 調査団)

3.2.4 地下水シミュレーション

(1) シミュレーションの目的と概要

本調査では前回の JICA 調査で実施された広域および調査地域を対象とした地下水流動シミュレーションの結果を受け、調査対象地域東部および南部の山地部に分布する白亜紀層内の地下水流動について主に検討した。モデルの基本的構造は前調査で構築されたものを踏襲し、新規に計画された 59 本の深井戸を新たに設定し、これら井戸からの揚水が周囲の地下水位・水頭に与える影響について評価した。評価は非定常を仮定し、これら新規計画井戸の揚水対象となる白亜紀帯水層および水位降下にもなう地盤沈下の懸念される第四紀層にて揚水時間と水位・水頭変化の関係を検討・評価した。

(2) モデル概要

(a) 概念モデル

モデル作成に当たっては、水理地質的な考察に基づき、以下の仮定を行った。

河川の扱い

第 3 章で説明したようにボゴタ流域の地下水は直接降雨のみによって涵養されている。降雨の一部は直接流出として流域南西部から流域外へ流出するが、ボゴタ川流域内では地下水涵養に係わる降雨のみを涵養条件として与えており、降雨の河川への流出は考慮しない。つまり流域内の河川流出はモデル化する必要が無い。

帯水層の分布

流域東部と南部で分水嶺を形成している山地は亀裂の発達した白亜紀の堆積岩からなり、比較的透水性が高く、帯水層となることを想定した。この白亜紀層内部ではレッカ系は均質に分布し、

水理特性上一般の帯水層と同様に扱えることを仮定した。一方、その上位の第三紀層と第四紀層はその岩相や堆積相から見て透水性は低く、良好な帯水層ではない。

涵養条件・地下水流動・地下水位

標高の高い山地部では降雨による涵養量も大きく、山地斜面で地下に浸透した雨水は斜面に沿ってゆっくりと流下し第四紀層の分布するボゴタ平原地帯へ移動する。ボゴタ平原にはボゴタ川およびその支流が流れており、その流量・水位は常に一定である。また、流域内にいくつかのダムがあり、その水位もほぼ一定していると仮定した。

不飽和帯

傾斜の急な山地斜面等では地形・地質条件によってかなりの厚さの不飽和帯が形成されることが考えられるが、これらは飽和帯として近似し、地下水面は地表面近傍に存在すると仮定した。

ボゴタ川流域外の地下水流出条件

ボゴタ川流域外では降雨は直接降雨として全量が涵養条件として与えられているため、地下水涵養以外の余剰降雨は斜面流出として、ボゴタ川流域の分水嶺をなす山地部から流下する河川により排出される。

(b) モデルの構造・パラメーターと境界条件

モデルの構造は基本的に前調査で作成されたものを踏襲しているが、モデルシミュレーション時の安定性を向上させるため、垂直のグリッド（レイヤー）の分割を細かくした他、境界条件・パラメーターの一部を変更した。また解析コードには MODFLOW を、入出力インターフェースとして PMWIN を利用した。モデルの基本情報を表 2.3-7 に示す。

表 2.3-7 地下水流動モデルの概要

モデル構造	境界条件・パラメーター
水平グリッド：一辺 1000m 正方グリッド x : 105、y : 120	東西方向 105km、南北方向 120km
レイヤー：全 12 レイヤー	
第 1 層：第四紀	透水係数(K_H) : 0.001 m/day 流域内：河川・ダムに定水頭条件、稜線部に GHB、涵養条件 流域外：主要河川に排水条件、涵養条件
第 2 層：第三紀	透水係数(K_H) : 0.005 m/day
第 3・4 層：Guadalupe 層	透水係数(K_H) : 0.01- 0.05 m/day 既存揚水井戸約 7000 本、新規計画揚水井戸 62 本
第 5 層：白亜紀層	透水係数(K_H) : 0.01 m/day
第 6～12 層：古生層	透水係数(K_H) : 0.0001 m/day 第 8 層と 10 層のモデル外周部に GHB

注) GHB : General Head Boundary (外部水頭依存境界)、透水係数は初期設定の値、 $K_v=0.1 \times K_H$

(出典：JICA 調査団)

3.2.5 試掘調査

(1) 試掘井戸の位置

試掘井戸を表 2.3-8 に示し、またその位置を図 2.3-25 に示す。表 2.3-8 に示す 5 本の井戸が本調査期間内で完成された。

表 2.3- 8 試掘井戸の位置

区分	井戸 No.	地区	井戸座標		担当
			x	Y	
試掘井	EX-2	Ciudad Bolivar Verbenal	4 ° 32'14.4"N	74 ° 09'51.7"W	JICA
	EX-3	Usme Cervecería Alemana	4 ° 29'38.1"N	74 ° 04'51.5"W	JICA
	EX-5	La Aguadora	4 ° 38'04.4"N	74 ° 03'20.7"W	Acueducto
観測井	EX-4	Embalse Seco No.1	4 ° 33'48.84"N	74 ° 08'18.696"W	JICA

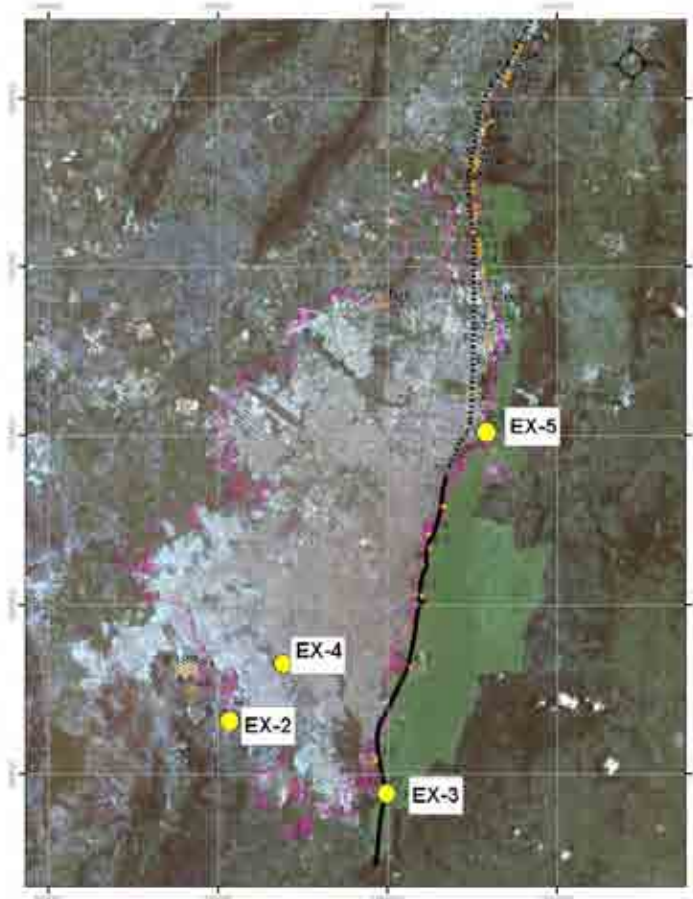


図 2.3- 25 試掘井戸の地点

試掘井戸の位置は、以下の基準で選定した。

<水理地質的観点>

- 試掘井戸地点は、ボゴタ断層のあるいは他の顕著な地質構造線（主要断層や褶曲軸）の近傍であり、且つ、白亜紀砂岩層が分布し地下水開発が有望であると推定される地区に計画した。
- 丘陵の高所は地下水位が深いことが推定されるため、これを避けて丘陵の山腹～山麓に試掘地点を計画した。

<法規制の観点>

- 東部山地では、森林保護区が設定されており全ての開発行為が禁止されている。したがって、試掘井戸は、森林保護区を避けて計画した。なお、南部丘陵ではかかる規制はない。

<施設計画の観点>

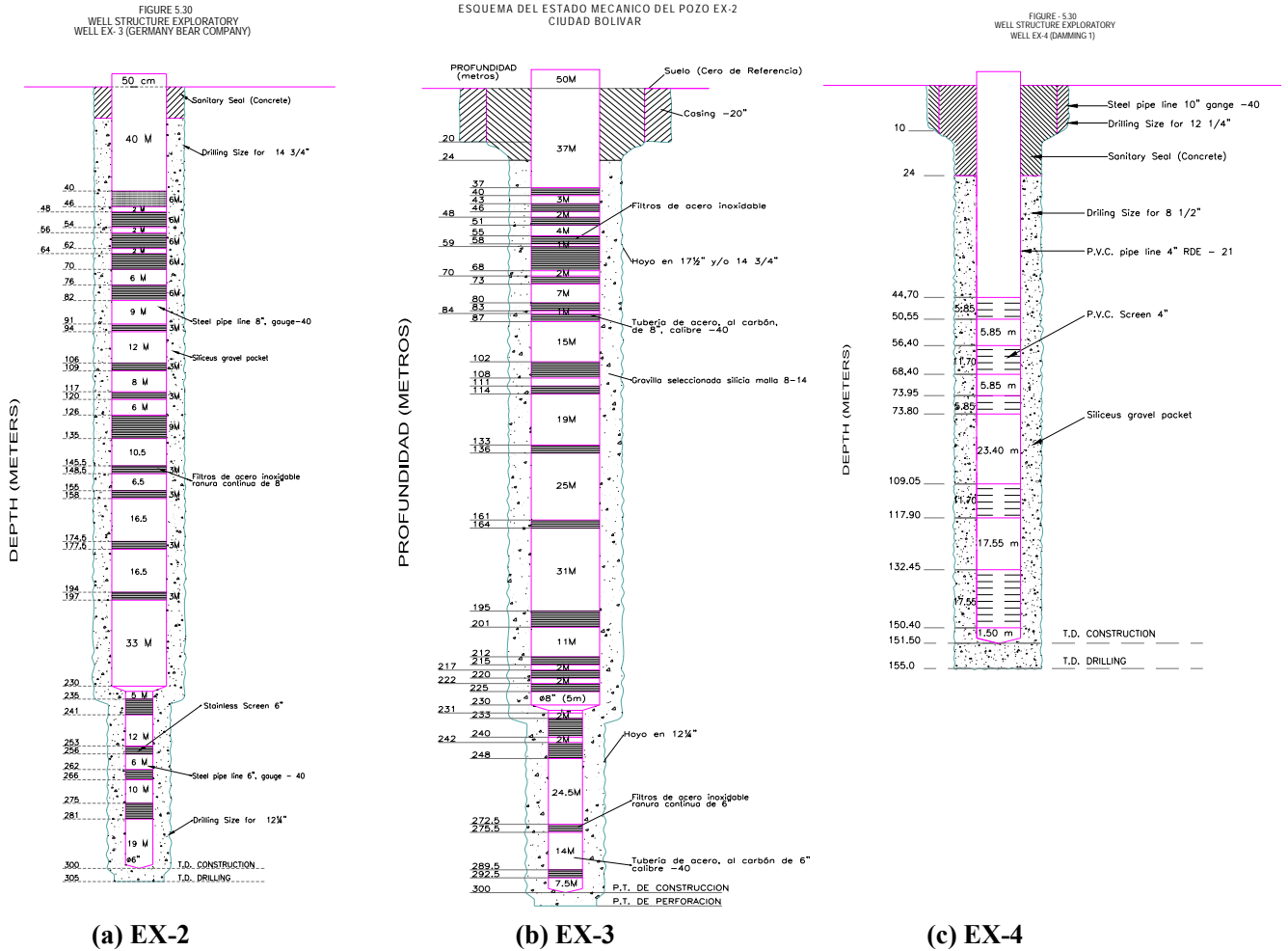
- 試掘井戸を将来的に生産井に転用可能とするために、既存給水施設の近傍に試掘井戸を計

画した。

- 施設建設用地が十分に確保され、かつ道路の近傍で井戸掘削機の搬入が容易である地点に試掘井戸を計画した。

(2) 井戸構造

試掘井(EX-2、EX-3)および観測井(EX-4)の構造を図 2.3- 26 に示す。



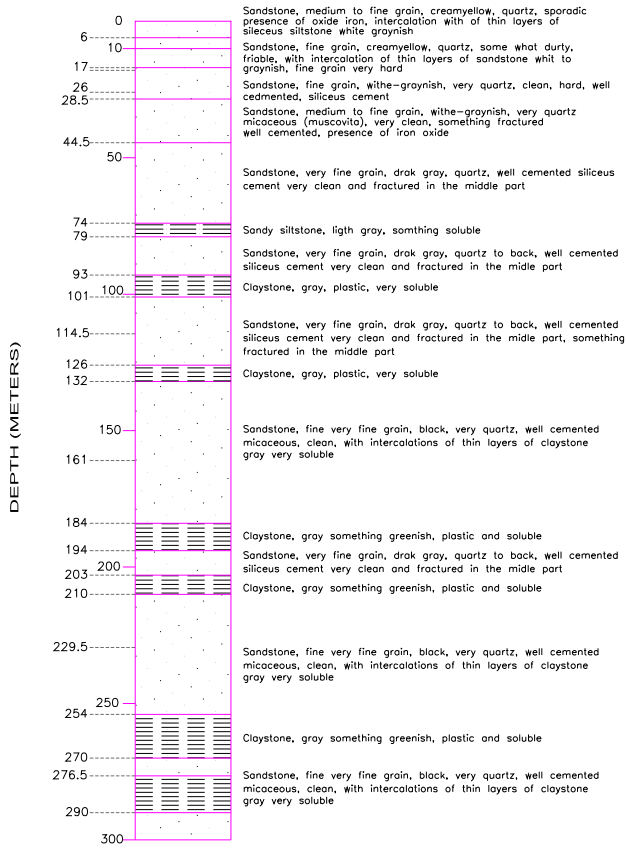
出典：JICA 調査団

図 2.3- 26 井戸構造

(3) 試掘結果

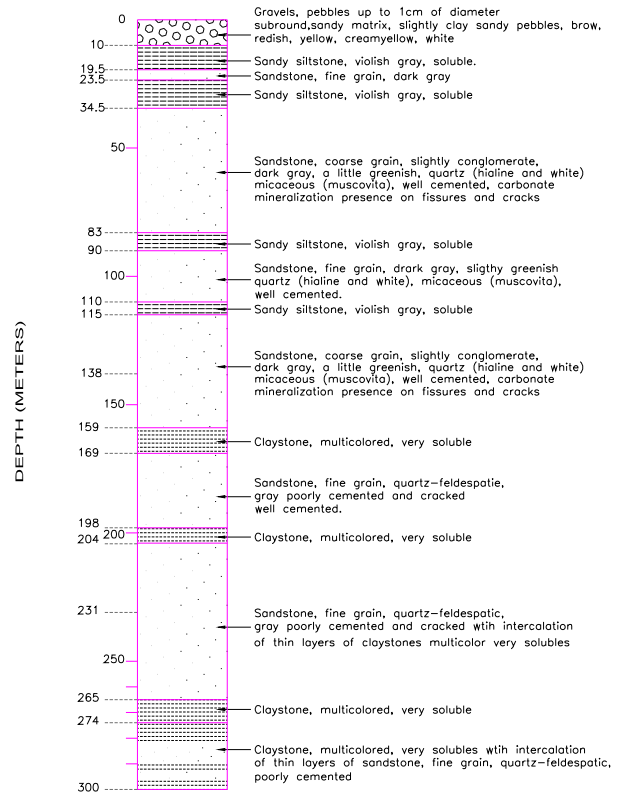
3本の試掘井戸(EX-2、EX-3、EX-5)と1本の観測井(EX-4)の調査結果を表 2.3- 9 に示すとともに、各井戸の地質柱状図 2.3- 27 に示す。試掘井完成直後に揚水試験を実施した。揚水継続時間は48時間で、揚水試験後に回復試験を実施した。それに引き続き段階揚水試験を実施した。

FIGURE 5.31
GEOLOGICAL COLUMNAR OF EXPLORATORY WELL
EX-2 (BOLIVAR CITY)
SCALE 1:1,000



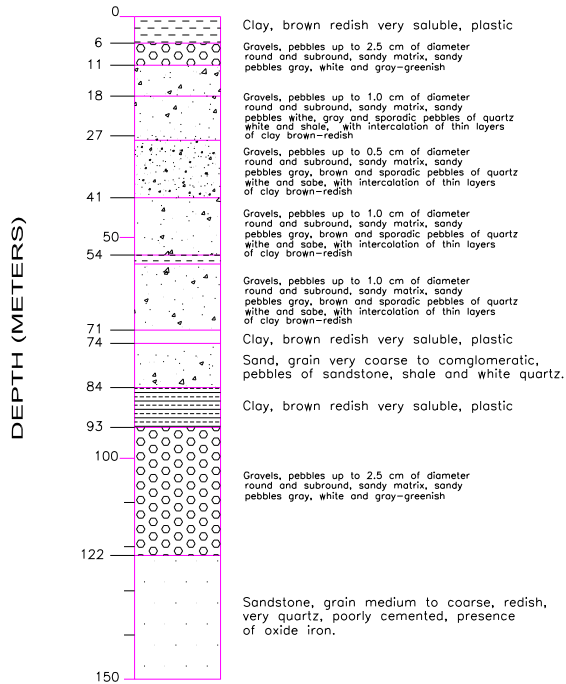
(a) EX-2

FIGURE 5.31
GEOLOGICAL COLUMNAR OF EXPLORATORY WELL
EX-3 (GETMANY BEAR COMPANY)



(b) EX-3

FIGURE - 5.31
GEOLOGICAL COLUMNAR
OF QUATERNARY DRILLING-OBSERVATION
WELL EX-4



(c) EX-4

出典：JICA 調査団

図 2.3- 27 試掘井の地質柱状図

表 2.3-9 試掘調査の結果

項目	EX-2 (Ciudad Bolivar)	EX-3 (Usme)	EX-5 (La Aguadora)	EX-4 (Embalse)			
井戸深度	300 m	300 m	300	150m			
スクリーン位置 (GL.-m)	40~46, 48~54, 56~62, 64~70, 76~82, 91~94, 106~109, 117~120, 126~135, 145~148, 155~158, 174~177, 194~197, 235~241, 253~256, 262~265, 275~281。 (全長 80m)	37~40, 43~46, 48~51, 55~58, 59~68, 70~73, 80~83, 84~87, 102~108, 111~114, 133~136, 161~164, 195~201, 212~215, 217~220, 222~225, 233~240, 242~248, 273~275, 289~292。 (全長 80m)	109~118, 120~129, 131~140, 148~154, 155~164, 165~174, 175~181, 194~197, 201~207, 216~222, 223~232, 233~242, 243~246, 256~262, 286~289, 290~299。 (全長 111m)	44~51, 56~68, 74~78, 110~115, 132~150。 (全長 50m)			
井戸径	8 inch	8 inch	10 inch	4 inch			
帯水層の地質	砂岩、頁岩	砂岩、頁岩	砂岩、頁岩	砂層・礫層			
<揚水試験結果>							
静水位	18.20	20.70	37.6	25.2			
揚水量 (m ³ /日)	864-1,223	95	864	145			
水位低下量 (m)	52.70	69.29	71.4	7.1			
動水位 (GL-m)	70.90	89.99	109	32.3			
比湧出量 (m ³ /日/m)	23.2	1.37	12.1	20.4			
透水量係数 (m ² /日)	14.7	1.9	13.6	27.8			
透水係数 (m/日)	0.18	0.023	0.13	0.56			
貯留係数	2.2x10 ⁻²	6.9x10 ⁻⁴	2.06x10 ⁻²	4.2x10 ⁻³			
<段階揚水試験>	揚水量 (m ³ /日)	水位低下 (m)	揚水量 (m ³ /日)	水位低下 (m)	揚水量 (m ³ /日)	水位低下 (m)	-
第1段階	966	11.1	41	43.4	290	15.4	-
第2段階	1,240	17.1	82	47.9	360	22.3	-
第3段階	1,446	20.9	121	57.3	470	33.6	-

注1) 透水係数・貯留係数は Jacob 法と回復法で解析した。

地質状況

3本の試掘井および1本の観測井の地質状況の要約を表 2.3-10 に示す。

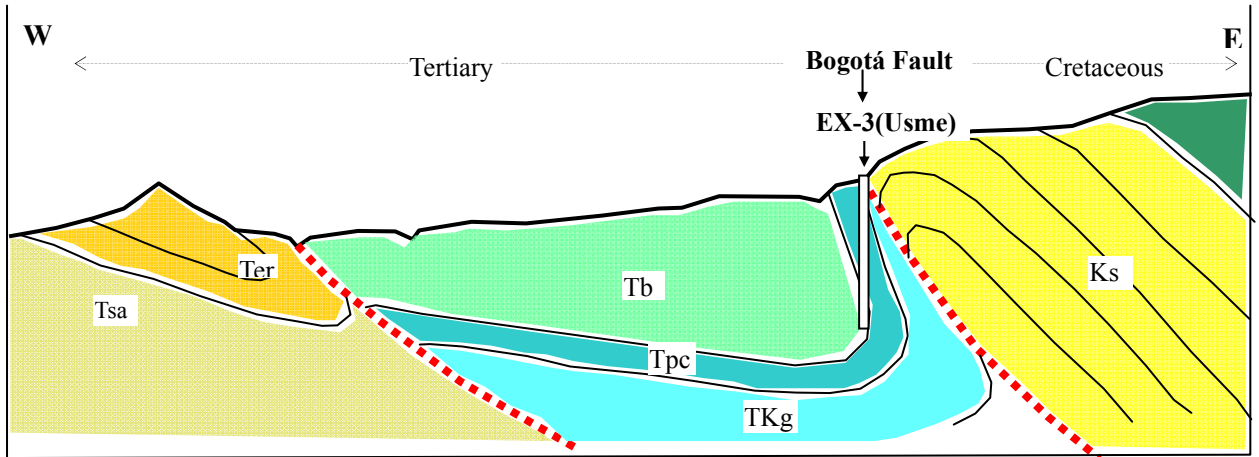
表 2.3-10 試掘井戸の地質状況

井戸名	地質区分		深度(GL.-m)	岩相
	時代区分	地層名		
Ex-2 試掘井	白亜紀	Planers 層	0- 17	砂岩、砂質泥岩
		Dura 層	17-300	細粒砂岩
Ex-3 試掘井	第四紀層	崖錐	0- 10	砂礫
			10- 35	泥岩
	白亜紀～第三紀	Cacho 層	35- 90	粗粒砂岩。薄い泥岩層を挟在する
			90-115	細粒砂岩。薄い泥岩層を挟在する
			115-159	粗粒砂岩
	第三紀	Bogota 層	159-265	細粒砂岩。薄い泥岩層を挟在する
265-300			泥岩	
Ex-5 試掘井戸	第四紀	崖錐	1-5	土砂、風化岩
	白亜紀	Labor y Tierna 層	5-300	砂岩、泥岩
EX-4 観測井	第四紀層	沖積層～洪積層	0- 6	粘土。茶色で軟弱
			6- 71	砂礫。径 0.5-1.0cm の円礫。
			71- 74	粘土
			74- 84	砂
	93-122	砂礫。径 2.5cm の円礫		
第三紀層	Regadera 層	122-150	砂岩	

出典：JICA 調査団

白亜紀帯水層の特性

東部山地では、白亜紀層と第三紀層がボゴタ断層によって隔てられている。今回の調査で、EX-3(Usme)サイトはほぼボゴタ断層の真上に位置し、断層破碎によって割目が発達した白亜紀砂岩層の中の豊富な地下水が期待された。しかし、ボゴタ断層の近傍の地質構造は極めて複雑であり（図 2.3- 28 参照）、白亜紀層の下位には逆断層によって第三紀層が分布していることが判明した。第三紀層は不透水性の泥岩が主体であるため、地下水の産出量は少ない。EX-3 の試掘結果から以下の事項が推定される。



出典: Llanopozos, JICA Study team

図 2.3- 28 EX-3(Usme)試掘サイトの地質構造

- 東部山地ではボゴタ断層の東側に分布している白亜紀砂岩層が優れた帯水層となっている。
- ボゴタ断層は逆断層であり、断層地点において試掘した場合、表層部に白亜紀層が分布していても、地下深部には第三紀層が分布している可能性が高い。すなわち、新しい地層(=第三紀層)が古い地層(=白亜紀層)の下に分布している。
- 井戸を計画する場合は、できるだけボゴタ断層から離れて井戸位置を計画するのが望ましい。Vitelma サイトにおける試掘結果によると、ボゴタ断層から 500m 程度東側に離れば、逆断層の影響は無くなる(図 2.3- 29 参照)

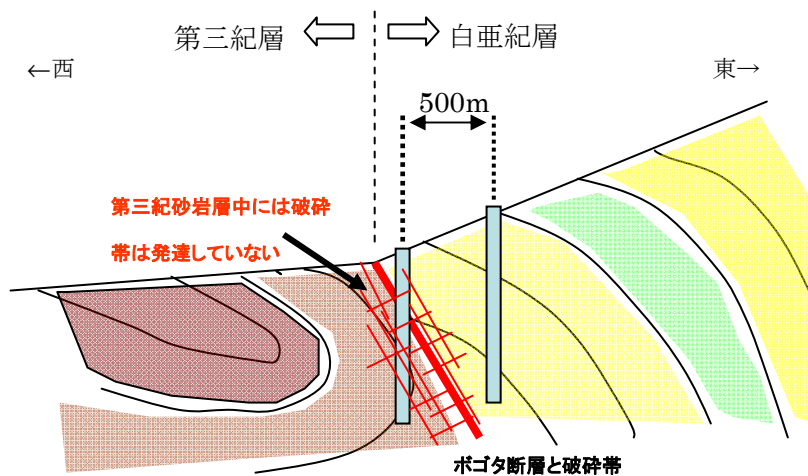
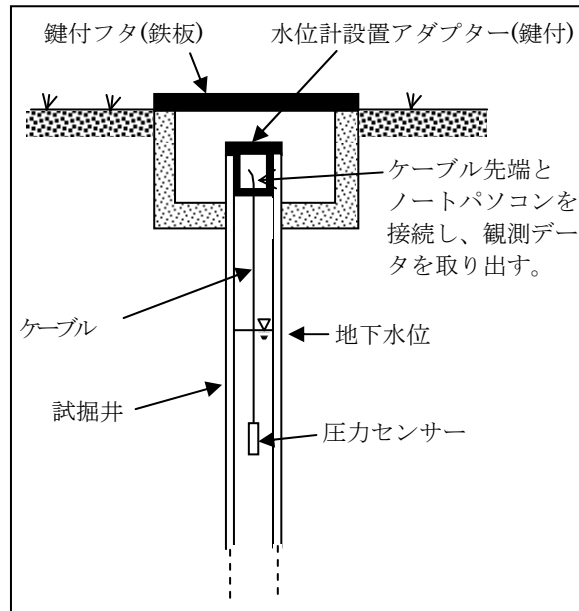


図 2.3- 29 最適な井戸掘削位置

(4) 自記水位計の設置

2本の試掘井戸と1本の観測井戸に自記水位計を設置した。以下の方法で地下水位の連続観測を行う。

- 自記水位計井戸の構造は図 2.3- 30 に示すとおりである。
- 時記水位計からの観測データ取り出しは月1回のペースで Acueducto が行う。



出典:JICA 調査団

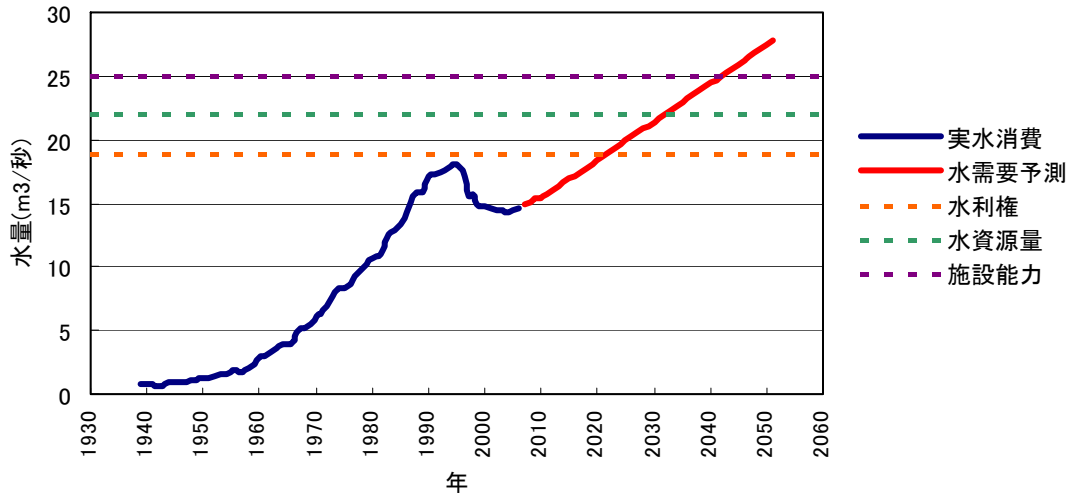
図 2.3- 30 自記水位計井戸の構造

第4章 既存給水計画とその問題点

4.1 既存給水計画の内容

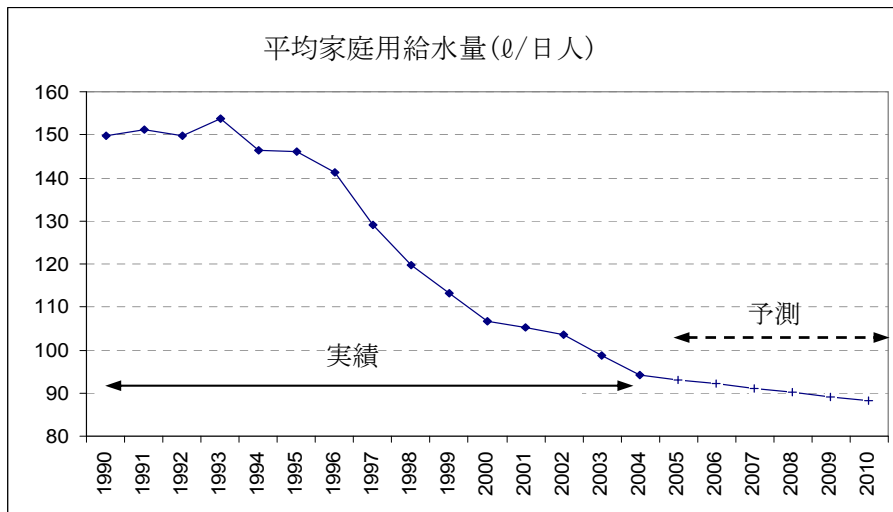
(1) Acueducto の既存給水計画による水需要予測

Acueducto の既存給水計画(2005 年)に記載された給水量の変遷と今後の水需要の予測を図 2.4-1 に示す。また、図 2.4-2 には、家庭用給水量の変遷と今後の予測を示す。



(出典: Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimiento de Agua, 2005)

図 2.4-1 水消費量（総送水量）の過去の変動と今後の予測



(出典: Acueducto, Estudio, Revisión y Ajuste del Modelo de Proyección de Demanda de Agua para la Ciudad de Bogotá, y los Municipios vecinos)

図 2.4-2 家庭用給水量の変遷と今後の予測

1997年に Chingaza トンネルが崩壊しボゴタ市への導水が9ヶ月間にわたって停止した(Chingaza の危機)。この事故の前に 150l/日人程度であった給水量(家庭用)が激減した。その後も、Acueducto は給水圧の減少、料金の値上と節水キャンペーンを行なった。その結果、給水量は 1997 年以降も減少を続け、2006 年には 89l/日人(家庭用)まで低下した。これは 1990 年代初頭の 150l/日人の約 60%である。ボゴタ市では 1997 年の Chingaza 危機を境にして、低い給水量が現在も維持されて

いる。

1996年から2006年までボゴタ首都圏の人口は年2.95%の増加率で着実に増加したが、人口増加率よりも水消費量の低下率の方が大きかったため、全体水使用量は図2.4-1に示すように減少を続けた。しかし、図2.4-2に示す様に、2006年以降は水消費量の減少幅が小さくなると予測される。従って、2007年から人口増加の影響が反映され、全体水使用量が増加に転ずると予測されている。

(2) 既存給水計画(拡張 M/P)の課題

(a) M/P(1995年版)

Acueducto は1995年に給水 M/P を策定した。1995年における Acueducto の上水生産施設能力は25m³/秒であり、一方、水需要量は18m³/秒であった。水需要が25m³/秒となるのは2005年であると予測され、2005年には新水源が必要とされた。この予測に基づき水源開発計画として表2.4-1に示す事業が提案された。しかし、この予測は翌年に発生した Chingaza の危機とその後の Acueducto の水需要抑制策のために実際と大きく異なる結果となった。

表 2.4-1 1995 年度版 M/P における水資源開発計画

計 画		開発水量(m ³ /秒)	投資コスト(億 US\$)
Chingaza 拡張計画		5.0	2.5
Regadera II 計画		1.2	1.0
Sumapaz ダム計画	上流側ダム	10.0	5.0
	下流側ダム	17.0	8.0

(出典: Acueducto, Plan Maestro de Abastecimiento de Agua para Santa Fe de Bogotá, 1995)

(b) M/P 修正版(2005年版)

Acueducto は2005年に1995年版の M/P の見直しを行った。1997年に発生した Chingaza の危機の後に水消費量が激減した。2005年版の給水システム拡張計画(M/P)は、旧 M/P の水源開発計画を継承しているが、水消費量が低下したため、旧 M/P で提案した水源開発計画の実施年度を大幅に遅らせ、2029年以降に設定した。修正版 M/P で提案されている事業は、表2.4-2に示す様に、3期に区分できる。

表 2.4-2 M/P 修正版(2005年版)で提案した事業計画

区分	期間	事業計画	年											
			2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050			
第1期	2005-2020	① 調査・設計・準備	■	■	■									
第2期	2021-2028	② 既存給水システム最適化事業			■	■	■							
第3期	2029-2050	③ 給水システム拡張事業						■	■	■	■	■	■	■

(出典: Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimiento de Agua, 2005)

表2.4-2に示された各事業計画に関して、以下に述べる。

第1期(2005年—2020年) 調査・設計・準備

2005年—2020年までの実施内容は表 2.4-3 に示すとおりである。これらは既存給水システム最適化事業(2021年-2028年)や給水システム拡張事業(2029年-2050年)の実現に向けた準備段階と位置付けられる。その内容は主に水源開発や給水システムに関する調査が中心である。この計画の中には地下水開発が提案されている。

表 2.4-3 2005—2020年までの実施内容

実施内容	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
給水システム																
• M/Pの見直し																
• 施設の稼働																
• 貯水池の容量測定																
施設のリハビリと給水の脆弱性の把握																
• Chuzaダムの溢流利用																
• La Regadera ダム- El Dorado 浄水場間の導水管の設計																
• La Regadera ダム- El Dorado 浄水場間の導水管の敷設工事																
既往給水システムの最適化																
• Tunjuelo 川および San Cristóbal 川の給水システム改善																
• Vitelma 浄水場—La Laguan浄水場間の送水管設計																
• San Cristóbal 川の利用																
Chingaza系統																
• トンネルの内壁補強工事																
• Blanco川水系の水質調査																
• Blanco川水系の開発能力調査																
主要配水網																
• 水道網の相互連結																
既往給水システムの拡張																
• Chingazaダムの拡張																
• 地形・地質調査																
• Wiesner 浄水場の拡張																
地下水開発																

(出典： Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimiento de Agua, 2005)

2005年のM/Pは地下水開発の意義を以下のように提案している。

- ボゴタ市の地下水開発は、現在の表流水資源に依存した給水システムの脆弱性を補う役割を持つ。地下水は現在の給水システムが水不足を引き起こした時の緊急的な水源として期待される。
- 地下水を活用した給水事業は、表流水を活用した水道拡張事業とは独立して実施されるべきである。何故なら、地下水を活用した事業は、表流水開発の脆弱性を補う役割を担うからである。

第2期(2021年-2028年) 既存給水システム最適化事業

既存給水システムの最適化事業の内容は表 2.4-4 に示すとおりである。この計画では、水源を新たに開発するのではなく、既存の施設を改良することによって 2.73m³/秒の上水を新たに生産する。

表 2.4-4 既存給水システムの最適化計画

事業名	事業の内容				
	期間(年)	費用 (2004年8月)	水量増加 (m ³ /s)	生産水量 (m ³)	プロジェクト期間(年)
Regaderah ダム、Vitelma 浄水場、La Laguna 浄水場間の管路の拡大	2	7,168,000 000	0,95	1,497,960,000	50
Tomine 湖の完全利用	2	63,409,000,000	1,48	2,333,664,000	50
浄水場の洗浄水のリサイクル利用	2	23,100,000,000	0,30	520,344,000	50
合計	6	93,677,000,000	2.73	4,351,968,000	

(出典： Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimientode Agua, 2005)

第3期(2029年-2050年) 給水システム拡張計画

給水システム拡張計画の概要は表 2.4-5 に示すとおりである。この計画では、新たな水源を開発することによって 17.82m³/秒の上水を生産する(表 2.4-5 中の「確保される流量」の最下段参照)。表 2.4-5 に示すとおり、Chingaza 系統の水源拡張が最優先となっている。

表 2.4-5 給水システム拡張計画の内容

優先順位	給水系統	事業名	投資金額 (百万 US\$)	確保される流量 (m ³ /s)	予想水単価 (US\$/m ³)	水利権の確保が期待できる水量 (m ³ /秒)	開発可能水量 (m ³ /秒)
		現況	—	—	—	17.84	21.04
1	Chingaza 系統	Chuza ダム越流利用	5.30	0.10	0.053	17.94	21.14
2		Chuza 北部分水路 1 期 2 期	96.46	2.33	0.098	20.27	23.47
3		Chuza 北部分水路 3 期	61.77	1.57	0.137	21.84	25.04
4		Playa ダム	59.11	1.05	0.121	22.89	26.09
5		Southeast Chingaza 南東部分水路	65.19	1.08	0.122	23.97	27.17
6	南部系統	Regader ダム II	123.60	0.70	0.248	24.67	27.87
7	Smapazu 系統	Sumapaz 上流域分水路	756.45	7.58	0.261	32.25	35.45
8		Sumapaz 中流域分水路	1109.26	17.82	0.680	42.49	45.69

(出典： Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimientode Agua, 2005)

(3) 長期的水需給予測

ボゴタ首都圏の長期的水需要予測は図 2.4-1 に示したとおりである。これに対して、現在の Acueducto の給水能力を表 2.4-6 に示す。

表 2.4-6 Acueducto の上水生産能力と水利権 (2007 年時点)

給水系統	水供給量に影響する要素				現在の上水生産量 (m ³ /秒)	今後確実に増量できる水量(m ³ /秒)
	水資源量 (m ³ /秒)	浄水施設 ^{注)} 能力 (m ³ /秒)	水利権水量 (m ³ /秒)	左記の中の最小値 (m ³ /秒)		
				①	②	①-②
(1)Chingaza 系統	14.1	17.6	13.2	13.2	10.0	3.2
(2)Tibitoc 系統	7.0	10.5	4.8	4.8	4.0	0.8
(3)南部水系系統	0.9	2.1	1.0	0.9	0.5	0.4
合計	22.0	30.2	19.0	18.9	14.5	4.4

注) 休止中の Vitelma および San Diego 浄水場は除外してある。

(出典： Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimientode Agua, 2005)

表 2.4- 6 に示すように、2007 年時点における取水地点の水資源量、Acueducto の浄水施設能力、水利権水量の関係は以下のとおりである。

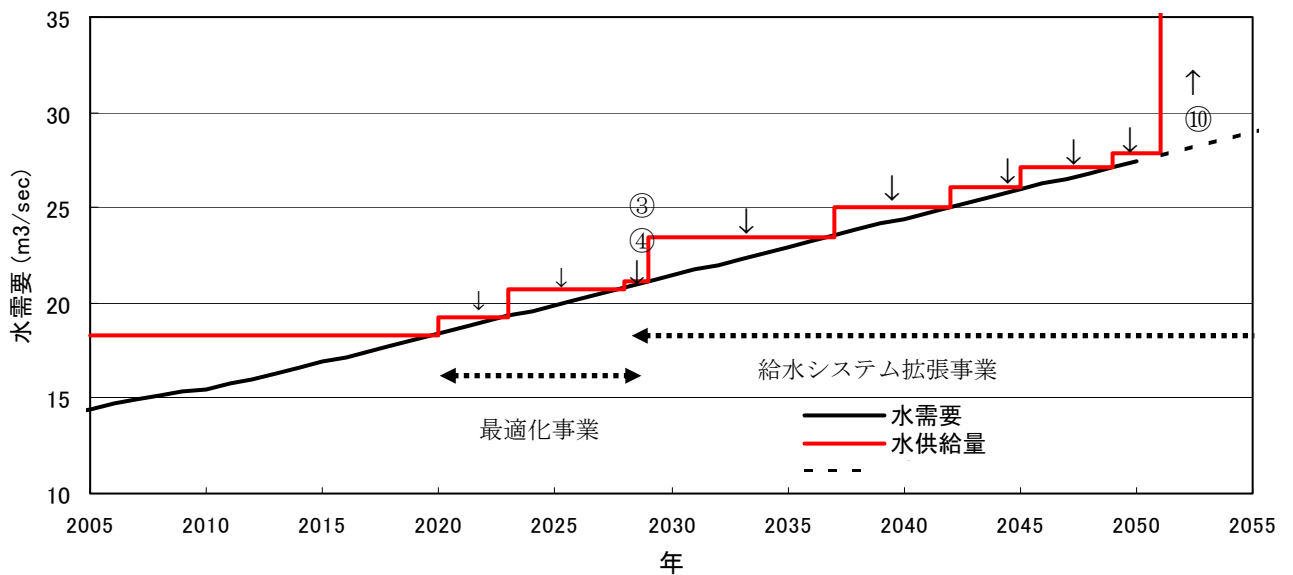
$$\text{水利権水量 } 19.0(\text{m}^3/\text{秒}) < \text{水資源量 } 22.0(\text{m}^3/\text{秒}) < \text{浄水施設能力 } 30.2(\text{m}^3/\text{秒})$$

上記 3 者のうち、水利権水量が最も小さな値を示している。水需要が水利権水量である $19.0 \text{ m}^3/\text{秒}$ に達するのは 2022 年、水資源量に達するのは 2033 年、浄水施設能力に達するのは 2050 年以降である。Acueducto の施設能力は水利権水量と水資源量を上回っている。浄水施設能力をフルに活用するためには、新規水資源開発（取水施設建設）と、それに対応した水利権水量の確保が必要である。

4.2 既存拡張計画の事業評価

(1) 水需要と水源開発

Acueducto が提案している最適化事業と、拡張事業を実施した場合の水供給量と需要の関係を、図 2.4- 3 に示す。



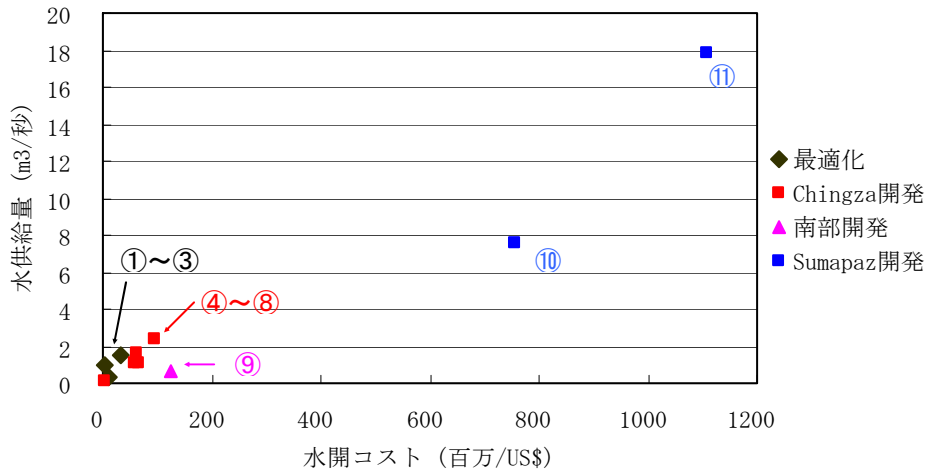
No.	事業内容		No.	事業内容	
最適化	①	Regaderah ダム、Vitelma 浄水場、La Laguna 浄水場間の管路の拡大	拡張	⑥	Chuza 北部分水路 3 期
	②	Tomine 湖の完全利用		⑦	Chingaza Playa ダム
	③	浄水場の洗浄水のリサイクル利用		⑧	Southeast Chingaza 南東部分水路
拡張	④	Chuza ダム越流利用	⑨	南部	Regader ダム II
	⑤	Chingaza Chuza 北部分水路 1 期 2 期	⑩	Sumapaz	Sumapaz 上流域分水路
		⑪	Sumapaz 中流域分水路		

(出典:Acueducto の M/P 内容に基づき調査団作成)

図 2.4- 3 水需要と水源開発

(2) 開発量と開発コスト

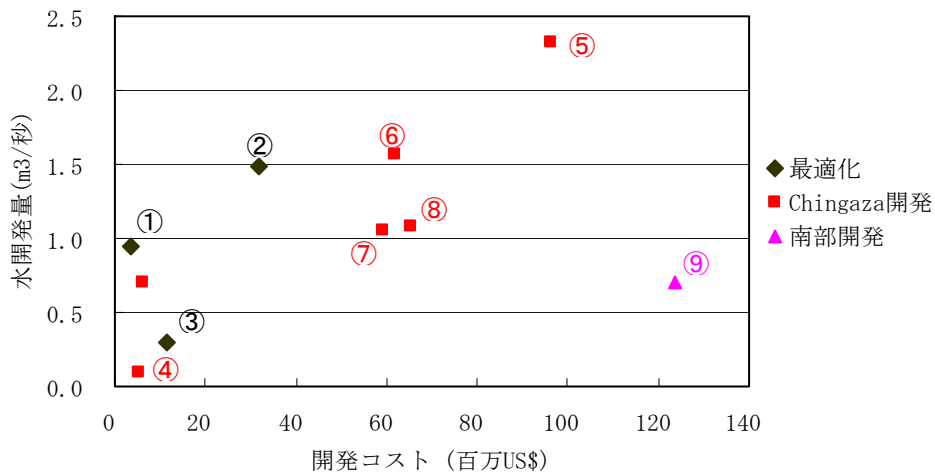
各事業の開発水量と開発コストを図 2.4-4 に示す。



注) 事業の番号①～⑪は、図 2.4-3 の番号と同じ

(出典： Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimientode Agua, 2005)

図 2.4-4 水源開発計画全体



注) 事業の番号①～⑪は、図 2.4-3 の番号と同じ

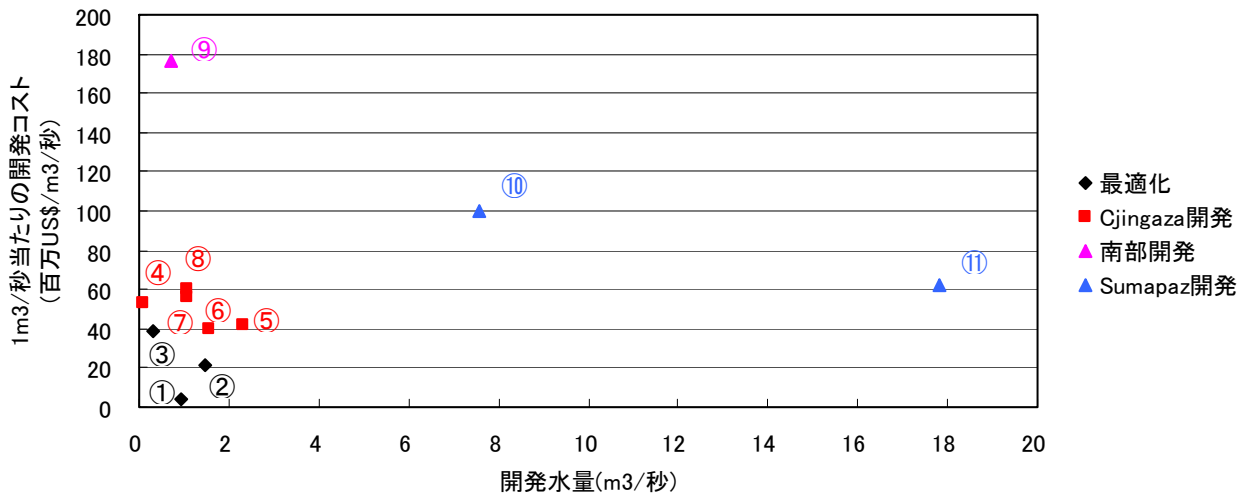
(出典： Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimientode Agua, 2005)

図 2.4-5 水源開発計画 (最適化事業および Chingaza 開発)

図 2.4-4 に示すように、Sumapaz 開発事業が、開発量や開発コストで他の事業より規模が大きい。また、図 2.4-5 に示すように、最適化事業は、他の事業に比べ小規模である。

(3) 開発効率

図 2.4-6 に、事業ごとの開発水量と 1m³/秒当たりの開発コストを示す。



(出典： Acueducto, Plan de Expansión de Abastecimiento de Agua, 2005)

図 2.4- 6 開発効率

一般に、水資源開発は規模の経済があるといわれている。すなわち、開発水量が大きくなるにしたがって、水量 1m³/秒当たりの開発コストが減少していくのが一般的である。しかし、図 2.4- 6 に示すように、提案されている一連の事業に関しては、規模の経済は明白ではない。図 2.4- 6 から、以下の特性が結論される。

- Chingaza 開発は開発規模において Sumapaz 開発より小さいが開発効率はより高い。両者とも新規の施設建設が必要であるが、Chingaza 開発の場合、既往導水トンネル(延長 40km)が利用できることが開発効率の高い理由である。
- Chingaza 開発は 5 つの独立した水源開発事業化から成る。そのため、水需要の増加に密着して事業化することが可能であり、遊休施設を最小化できるため開発効率は一段と高い。
- 最適化事業は最も開発効率が低い。なぜなら、新規水量の開発に当たって、新規の施設建設を必要としないためである。その反面、開発水量は少ない。
- 南部開発は最も効率が悪い。南部水系には既に 3 つの既往ダム貯水池(Regadera、Chisaca、Tunjos)があり、新規の水源開発に当たって開発効率が低い。

(4) Acueducto の 8 つの水源開発計画の事業実施順序

Acueducto が提案している 11 の水源拡張事業は、水需要の増大に密着して順次水源施設を建設するものである。基本的に、効率がよく事業費が小さな事業から順次開始する方針であり、規模が大きく、事業費が巨大になる事業は後送りされている。かかる実施計画は、財務面において効率的である。

4.3 既存拡張計画の総合的水資源管理の観点からの評価

既存水源拡張計画を、量的管理、質的管理、水配分、リスク管理の 4 つの観点から評価し、以下に示す。

(1) 量的管理

給水の量的管理

ボゴタ首都圏の現時点の給水アクセス率は 90%以上である。生活用水の平均給水量は 89ℓ/日人

となる。1997年の Chingaza の危機による深刻な水不足があった。この時の市民の節水意識を背景とし、Acueducto は料金対策と給水圧低減により水消費の抑制を図った。その結果、Chingaza 危機以前の生活用給水量は 150ℓ/日人(1992年)から 89ℓ/日人(2006年)まで低下した。給水事業の効率化(水利用の合理化)として、Acueducto は以下の対策を実施している。

不明水対策

Acueducto の現在の無収水率は 38%である。Acueducto は継続的に漏水調査をしており、老朽した水道管の敷設替えを行っている。Acueducto によると漏水率は 12%であり、他の南米諸国の大都市と比較して相当に低い数値である。今後も同様の水準で推移していくことが期待される。

(2) 質的管理

(a) 表流水水質保全

現在のボゴタ首都圏への給水のための水源は、全て表流水である。以下に示す 3つの給水系統は、取水した河川水に対して浄水処理を行い、飲料水基準に適合する水質を維持している。3つの給水系統の水源水質管理状況は、以下のとおりである。

表 2.4-7 3つの給水系統の水源水質管理状況

給水系統	取水している河川	水源の水質管理状況
① Chingaza 系統	Chuza 川、Guatiquia 川及び Blanco 川	国立公園内に位置し河川水質に影響を与える活動が抑制されているため良質な水質が維持されている。Acueducto は水源保全計画を持っている。
② Tibitoc 系統	ボゴタ川	水道取水地点における水質は CAR が管理している。ボゴタ川の水質汚濁が他の水源と比べて深刻である。
③ 南部系統	Tunjelo 川	上流の水源地でも河川水質に大きなインパクトを与える活動はなく、河川水質が汚染される危険性はない。Acueducto は水源保全活動を行っている。

(出典：JICA 調査団)

ボゴタ川沿いは水利用が進んでおり、取水・排水が各所で行われている。水質が懸念されている Tibitoc 浄水場の取水地点より上流側の水質は CAR が管理している。CAR はボゴタ川の上流域の 27 箇所に小規模な下水処理施設を建設し運営を行なっている。現在の Tibitoc 浄水場におけるボゴタ川の汚濁レベルは上水道の水源として許容範囲内に収まっている。今後、Tibitoc 浄水場におけるボゴタ川水質が改善される、あるいは汚濁が進行するかは、CAR の努力にかかっている。

(b) 地下水水質保全

地下水の水質保全に関しては以下のとおりである。

第四紀層地下水

ボゴタ平原の地下水は有機物が多く、飲料水として使用するためには、本格的な浄水処理が必要である。第四紀層の地下水は現在、主に農業用として使用されている。地下水中の有機物は第四紀帯水層から由来しており、人為的な汚染によるものではない。ボゴタ平原の第四紀層地下水は大量に使用されているが、水質保全に関する施策は行われていない。

一方、近年、ボゴタ市は稼動していない市内の井戸の閉鎖を開始した。かかる井戸への汚染物

質の不法投棄による水質汚染を防止する施策である。

白亜紀層地下水

白亜紀層の地下水は水質良好であり、飲料水に適している。その一方で、調査地域内の白亜紀層地下水は殆ど利用されていない。現在のところ、白亜紀層の地下水汚染に関する報告はない。2004年から東部山地の森林保護区における開発行為が法律によって禁止された。白亜紀層の地下水の主要涵養域は東部山地であるため、かかる制度は地下水の水質保全に貢献する。

(3) 水配分

(a) 表流水の水利権

Acueducto の給水に関わる水利権は、ボゴタ川とボゴタ川以外に2分される。

ボゴタ川からの水利権

Acueducto の給水量の30%を占める Tibitoc 浄水場はボゴタ川から取水している。ボゴタ川の水は Acueducto の水道水源としてだけでなく農業用水としても利用されているが、農業用水への水利権の配分が近年増大している。かかるボゴタ川の水利用の動向を考慮した場合、今後、ボゴタ川からの上水のための取水量増加は期待できない。Tibitoc 浄水場におけるボゴタ川からの取水量に関しては、2002年以來 Acueducto と CAR が法廷闘争中であり、決着していない。

ボゴタ川以外の河川からの水利権確保

ボゴタ川以外で将来的に Acueducto が取水を計画している河川は、Chingaza 水系と Sumapaz 水系に位置する。これらの水系の水利権は UAESPNN、CORPOGUAVIO、CORPOORINOQUIA が持っている。Acueducto は現在この3機関から水利権を得て取水している。新規水源開発に当たって Acueducto が上記3機関から新たな水利権を得る可能性は高い。

水利権価格

過去において Acueducto は水道用の河川水取水に対して、120-150 ペソ/m³ の水利権料を CAR に支払っていた。2004年の法律(環境省令 155号)により、2006年の水利権料は 0.56 ペソ/m³ に値下げとなった。この価格を出発点として、今後10年間にわたって水利権価格は水利用者と水利権付与機関とが交渉により決定される。

(b) 地下水の水利権

表流水の代替水源として、東部・南部丘陵の地下水開発が可能である。地下水開発の水利権は CAR 及び SDA が付与する。水利権の付与に当っては、東部・南部丘陵地域の地下水開発可能性の評価値が重要となる。開発可能性が十分に大きいと CAR と SDA が判断した場合、水利権が付与される。また、東部山地では、概ね標高 2,700m 以上の地域は森林保護区に指定され開発行為が禁止されているため、地下水開発を実施するに当たっては、森林保護区を避ける必要がある。一方、南部丘陵には森林保護区が設定されていない。

(4) リスクマネジメント

Acueducto の水源拡張計画(MP)では、将来の水需要に対応し、Chingaza 系統の水源開発が優先されている。Chingaza 系統は水源規模が大きく、また水質が非常に良質であるため浄水費用が安

い。現在3つある既往給水系統の中でも Chingaza 系統の規模が最大(全給水の70%を占める)であるだけでなく、給水コストも最も安い。導水・浄水施設に十分な余力があり、今後、Chingaza 系統の給水比率が一層高まることは確実である。

その反面、Chingaza 系統は全長40kmという山岳トンネルによって導水されており、過去の調査で指摘されている様(第3章参照)に、地震による災害に対して脆弱である。1997年のChingazaの危機の時と同様に、トンネル崩壊による導水停止が再び発生する危険性は高い。将来におけるChingaza 系統の拡張は、給水停止時の被害の拡大につながる。対策として表2.4-8に示された施策が提案されている。

表 2.4-8 緊急時給水対策

対策の種別		内容
ハード面の対策	施設の耐震補強	水道施設の耐震設計や耐震補強
	緊急時代替水源	<ul style="list-style-type: none"> • 休止中の浄水場の再稼動 • 稼動可能な施設における浄水量の一時的増大 • 緊急時の代替水源(地下水)の開発
ソフト面の対応	緊急時給水体制の整備	<ul style="list-style-type: none"> • 緊急対応マニュアルの準備 • 水道施設運転に対する集中制御システムの構築

(出典: Acueducto の資料に基づき JICA 調査団作成)

Acueducto 報告書(2006年)によると、施設の耐震補強を中心とした対策が講じられている。水源・導水施設の継続的な補強と同時に、緊急時の代替水源の確保や緊急時給水体制の整備を行うことによって、給水対策の効果が着実に向上する。

4.4 給水拡張計画への提案

- 1) Acueducto の既往 M/P によると、水源の拡張事業は2029年以降に開始される予定となっている。水源の拡張に当たって Chingaza 系統の水源拡張事業が最優先となっている。Chingaza 系統は、現況の導水施設に十分な余裕があるため、新規水源開発による導水施設の拡張は不要である。Chingaza 水源が高標高地域に位置し、自然流下による導・送水が可能であり、また水質が優れているため、導・送水コストや浄水コストが安い。したがって、Chingaza 拡張事業は他の拡張事業より経済効率が高い事業であり、この計画に沿って水源拡張を行うべきである。
- 2) その一方、Chingaza 系統の水は1本の山岳トンネル(総延長40km)によってボゴタ市まで導水されるため、トンネル災害による導水停止のリスクが高い。1997年のChingazaの危機がそれを証明している。その点、Tibitoc 系統や南部系統は導・送・配水管の維持・管理が容易であるため Chingaza 系統よりも緊急時の給水における安定性が高い。
- 3) 現在 Chingaza 系統はボゴタ首都圏全体給水の70%を占めている。また水源拡張計画によると、将来的に Chingaza 系統の給水量が増大される方針である。したがって Chingaza 系統の導水停止による被害は増大する。その対策として、以下の緊急水源整備計画が提案される。

① Tibitoc 系統の維持および緊急時の浄水生産拡大

- ②休止中の浄水場の緊急時再開に備えた整備
- ③ボゴタ市近郊の地下水による緊急時代替水源の確保

4) Acueducto の水源拡張計画 (M/P) は 2008 年に見直される予定であり、近年の水需要の動向を踏まえて、給水拡張事業の開始時期を再検討する必要がある。また、緊急用代替水源(地下水等)の開発計画を拡張計画に取り込むべきである。