

4.6.2 水質試験結果

(1) 井戸水質試験項目

本調査の水質項目は、次の二つのカテゴリーをカバーし、通例の地下水開発の水質調査で使われるよりはるかに多種類の項目が採用されている。

- (i) コロンビア国の用水別原水水質基準項目と対照できる水質項目
 - (ii) 地下水の地球化学的性質を捕捉し、地下水の挙動、地下環境にアプローチするための水質項目
- 一般水質項目の一覧を、適用区分も含め表 4-12に示す。

表 4-12 調査井戸数内訳および水質項目

項目	第一年次調査		第二年次調査		第三年次調査
1. 採水地点	99ヶ所		104ヶ所		70ヶ所
河川周辺区域井戸	33ヶ所		30ヶ所		18ヶ所
農業地域井戸	5ヶ所		5ヶ所		5ヶ所
工業地域井戸	5ヶ所		5ヶ所		5ヶ所
アイソトープ分析井戸	20ヶ所		20ヶ所		9ヶ所
その他	36ヶ所		44ヶ所		33ヶ所
2. 分析項目	河川周辺区域	農業地域	工業地域	アイソトープ	その他
健康に影響のある化学物質	(試験実施)				
	砒素、ホウ素、カドミウム、クロム、シアン、フッ素、鉛、総水銀、ニッケル、硝酸、亜硝酸、セレン、アンチモン、バリウム、ベリリウム、マンガン、モリブデン、銅				
味・臭い・色等に関する物質	色度、臭い、濁度、温度、ランゲリア指数、導電度				
無機物	アルミニウム、アンモニア、塩化物、硬度、硫化水素、鉄、溶存酸素(第1回を除く)、pH、ナトリウム、硫酸塩、全溶解物質、亜鉛、マグネシウム、カリウム、重炭酸イオン、炭酸塩、カルシウム、全アルカリ度、酸度				
有機物	(実施せず)				
	Toluene, Xylem, Benzene				
農薬類	Aldicard, Carbofuran, Aldrin, Endrin, Dieldrin, Chlordane, Linuron, P,p-DDT, o-p' DDT, p-p' DDT, Permetrina, 2-Clorofenol, 2,4,6-Triclorofenol, Endosulfan, Endosulfan, Endosulfan SO42-, Heptachlor, Heptachlorepoxyde, Lindane, Metolachlor, Atrazine, Bentazone, Profenofos, Clorpirifos, Triclorfos, 2,4-D, Methoxychlor, Simazine, Trifluralin, 2,4-DB, Dichlorprop, Malation, Etil Paration, Metil Paration, 2,4,5-t, PCP, Diazinon, Permethrin, 2,4,5-TP				
細菌	大腸菌、大腸菌群				

(2) 水質試験結果の概要

表 4-13 ~ 表 4-15 の「井戸水質試験結果」に、第 1 年次 ~ 第 3 年次の水質試験結果を示す。表中では、飲料水原水基準値の超過を色別してある。

試験結果は、ボゴタ平原の地下水水質が、用水の観点から幾つかの問題があることを示している。他方、地下水の流動機構が水質に反映されていることが確認され、それは別章の地質・帯水層の記述と符合している。以下がその概要である。

第四紀層地下水質

- 1) 極めて特徴的なのは、通常の深層地下水でほとんど検知されない水質項目が、調査地で広く、しかも高い数値で観測されている。その例は、色度、NH₄、H₂S、Ba、大腸菌群等である。
 - 2) 工業地区の地下水から、工業汚染の波及の証拠となる有機物(BTX)は検出されていない。同じく、農業地区の地下水から、農薬の影響は検出されていない。
 - 3) コロンビア国の原水基準に照らし、基準を超過する水質項目と、その井戸数の状況は、以下の通りである。全般的には、調査地域の地下水は通常地下水に期待できる水質基準を満たしておらず、通常の浄化プロセスまたはそれ以上の処理を経なければ、飲料に供することはできない。
- (a) 家庭用水の原水基準超過状況：色度、濁度、大腸菌群、アンモニア、pH が多くの井戸で基準値を超えている。硫化水素や鉄分などは、国の原水基準に規定がないため超過と言えないが、WHO

の基準など国際的に通用している飲料水基準値を超過しているので、無処理での飲用はリスクが高く、水質の良さに依存する地下水の使い方は、本調査地域ではあまり期待することはできない。

- (b) 農業用水の原水基準超過状況：大部分の調査井戸で、マンガン、鉄の超過が認められる。コロンビア国の基準項目の中には、硫化水素、有毒イオン等が含まれていないので、これらについて後に検討する。
- (c) 畜産用水の原水基準超過状況：この基準値を超えた井戸は無い。

白亜紀層地下水水質

硫化水素・マンガン・鉄・色度の項目では基準をわずかに超過が見受けられるものの、第4紀層に比べて全般的にそれらの濃度は低い。第4紀層水質結果と大きく違う点は、白亜紀層ではほとんどアンモニアが検出されていないことである。即ち、白亜紀層と第4紀層の水質は違うと言える。

地球化学的特長

水質サンプルの主要8イオン (Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-}) の濃度をトリニアダイアグラム、ヘキサダイアグラム上に表現した結果、次の様な地下水の地球化学的特長が認められた。

- (a) 第四紀層の地下水は、地下の流動年月が長く、粘土鉱物との間のイオン交換が進んだ深層地下水の典型である、 $\text{Na} - \text{HCO}_3$ 型水質が多い。一方、浅層地下水によく現れるイオン交換の進んでいない $\text{Ca} - \text{HCO}_3$ 型も見られるが、その数は少ない。
- (b) 白亜紀の地下水については、大きな特徴は無く、若干 $\text{Ca} - \text{CO}_3$ が多い程度である。
- (c) 全調査井戸を、主要8イオン濃度の総合的類似性により統計的に分類した(クラスター分析)結果、長い流動年月を経たと見られる $\text{Na} - \text{HCO}_3$ 型の水質を示す井戸が65%を超える。

4.6.3 試験結果の検討

(1) 用水の面からの水質特性

表 4-16に本調査区域の地下水水質の極めて特徴的な水質項目を取り上げ、それらの調査井戸全体での平均濃度と全体的なばらつきを要約する。また、図 4-19に流域別の主要水質の平均を図示する（データは代表例としサンプル数の最も多い第二次調査のものを使用した）。

表 4-16 全調査地域における特徴的水質項目の平均値と分散

	平均値 (mg/l)	標準偏差	変化係数 (標準偏差/平均)	調査井戸全体でのばらつき
色度	30.28	26.48	0.87	少ないバラつき
アンモニア性-N	4.67	5.47	1.17	少し大きいバラつき
鉄	3.11	3.83	1.23	大きなバラつき
マンガン	0.14	0.22	1.57	大きなバラつき
硫化水素	0.80	0.64	0.79	少ないバラつき
硝酸性-N	1.88	3.75	2.00	大きなバラつき

以下、主要項目別に検討する。

(a) 色度

色度は、臭気や味と共に人の感覚に訴えるため、高ければ水使用上大きな障害になる。塩素滅菌を前提とする原水の基準値は20TCUだが、8割近くの流域が平均色度を超過している。深井戸の水が広範囲に渡り高い色度を示すことは極めて稀で、原因は次の二つと考えられる。

- 広く地中に存在する鉄やマンガンは、還元状態で水中に溶解しているが、空気酸化を受け水中に懸濁状態となり色度を高める。これは、世界的に多くの例がある。
- 嫌気的な分解を受けた植物性着色有機物（フミン酸等）が、溶解し色度を高める。この様な例は、湿地帯や閉鎖水域の水底でしばしば起こることが知られている。

調査団は水質データから得られる色度と鉄・マンガン濃度との相関関係を、散布図や統計的手法を使い調べたが、相関は全く認められなかった。その一方、後者の可能性を検討するために、主として古い湖底堆積物から構成され、大量の植物性有機物を含む可能性が高い第四紀層井戸と、海成砂岩層からなりその可能性が低い白亜紀層井戸との双方で地下水の色度を比較した。その結果、確かに第四紀層の井戸では著しく色度が高い。

- 第四紀層（25井戸） 平均色度 30TCU
- 白亜紀層（10井戸） 平均色度 17TCU （人の感知できる色度15TCU）

これは、間接的ではあるが、色度が地下由来の腐植性有機物であることを示唆すると考えられる。

(b) アンモニア性窒素

水質分析の結果によると、アンモニア性窒素は、調査地域に広く高濃度で検出されている。飲料水原水基準は1.0mg/リットルだが、70%の流域が平均濃度でこの基準を超過している。また第四紀層25井戸の平均で4.91mg/リットル、白亜紀層17井戸平均で1.12mg/リットルを示している。一般に、深井戸ではアンモニアよりも硝酸性窒素のほうが多く検出されるのが通例だが、本調査地域ではほとんど検出されていない。検出されているアンモニア性窒素の濃度から見て、膨大な窒素のストックが深層地下水中に存在していると考えなければならない。この事実を、全て地表からの局地的な人間活動に伴う窒素排出で説明するのは、困難である。それは、以下の理由による。

- 量的にみて、地表の肥料、動物排泄物等からの地下への窒素分浸透量は、地下水中の膨大な窒素ストック量に比べて桁違いに小さい（これは、本章4.2「環境現況調査」で、すでに定量的に検討されている）。
- 地表のN分が深層の地下水まで到達し広がっていくには膨大な年月を要すると見られ、また、その際には酸化の進んだNO₃態が支配的になる

先に触れた第四紀層の湖底堆積物に含まれる腐植有機物の窒素分が還元的環境の中でアンモニアになっている、と考えるのがより自然である。データ解析によると、調査地域の井戸全体で、色度とアンモニア性窒素濃度がかなりよい相関関係（相関係数にして 0.58）を保つことが認められ、上記の推定を間接的に裏付けている。

(c) 硫化水素

表 4-17に見られるごとく、硫化水素は、調査区域全域に押しなべて高濃度で分布している。WHO の基準 0.03mg/l を参考にすれば、ほぼ全ての井戸でこれを超過している。これは深層地下水としては異例なことと考えられる。全調査井戸の平均値は、0.804mg/リットルであるが、帯水層別に見ると、ほぼ似たような数値になっている。

表 4-17 帯水層別の硫化水素分布

	硫化水素 (mg/リットル)
第四紀層 25 井戸の平均	0.988
白亜紀層 15 井戸の平均	0.813
調査 104 井戸の平均	0.804

一般に、世界的にみても飲料水のための硫化水素のガイドラインや基準はほとんど存在しない。これは、飲料水原水に硫化水素が溶解しているケースがほとんど見出されていないことによるのであろう。現在の段階では決定的なことは言えないにしろ、わずかに入手できる情報では、検出されている硫化水素が高濃度であることを示唆している。

調査地域の地表における硫化水素の主な発生源は、硫黄を含む動物性蛋白質や有機物の排出、硫安等硫化物を含む肥料の溶脱、および皮革産業で使う硫化ナトリウムの排出等が推定される。しかし、先に述べた窒素の場合と同様、本章 4.2 節で検討しているように、地表からの浸透は、到底、地下水中にストックされている硫化水素としての硫黄の量に見合うほどの規模ではなく、比較的局地的発生であると見なせることもあり、調査地域全域に及んでいる硫化水素の濃度を地上由来として説明することはできない。したがって地下にある含硫有機物の嫌氣的分解か、無機硫化物の加水分解、もしくは細菌による分解が主因をなすと考えられる。

(d) 鉄とマンガン

鉄、マンガンともに地質に由来することは明らかで、調査区域全域にわたり、大きなバラつきで分布している。帯水層別に見ると、第四紀層の濃度が大きい。

表 4-18 帯水層別の鉄、マンガンの分布

	鉄 (mg/リットル)	マンガン (mg/リットル)
第四紀層 25 井戸の平均	4.20	0.210
白亜紀層 15 井戸の平均	1.06	0.115
調査 104 井戸の平均	3.11	0.141

鉄の検出濃度は、多くの国で用いている飲料水基準 0.3mg/リットルを大きく超過している。これは、地下の還元的環境のため水溶性の鉄分が増えていることが一因と考えられる。マンガンについても同様のことが言えるであろう。

(e) 大腸菌

半数の流域で、糞便性の大腸菌が検出されている。また大腸菌群については、流域内で 40%以上の井戸から検出されている流域数は、75%を超えている。おそらくは、井戸の構造的問題が、地表から井戸への大腸菌の浸入を容易にしていると考えられる。

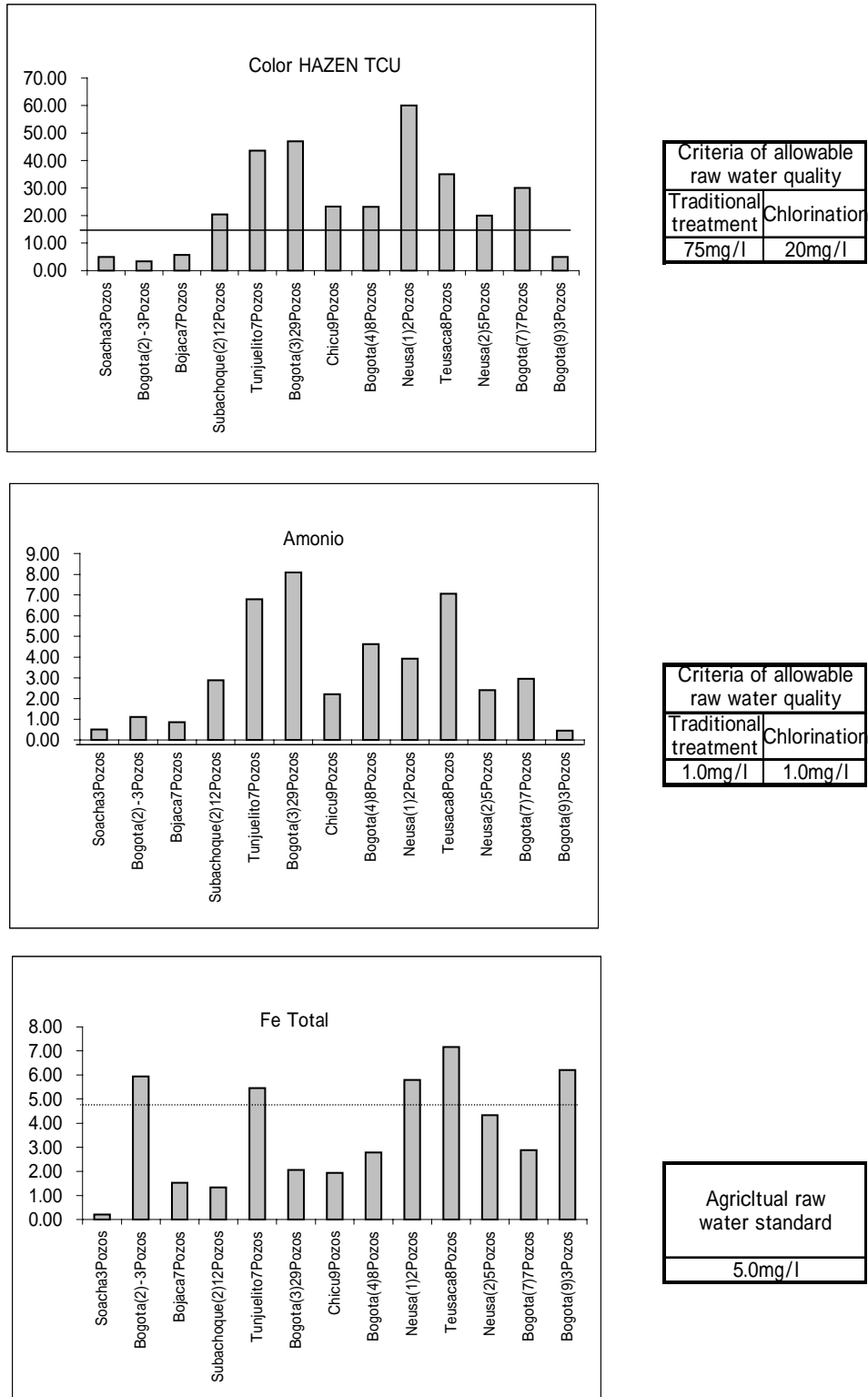


図 4-19 流域別主要水質の平均 (第2年次)

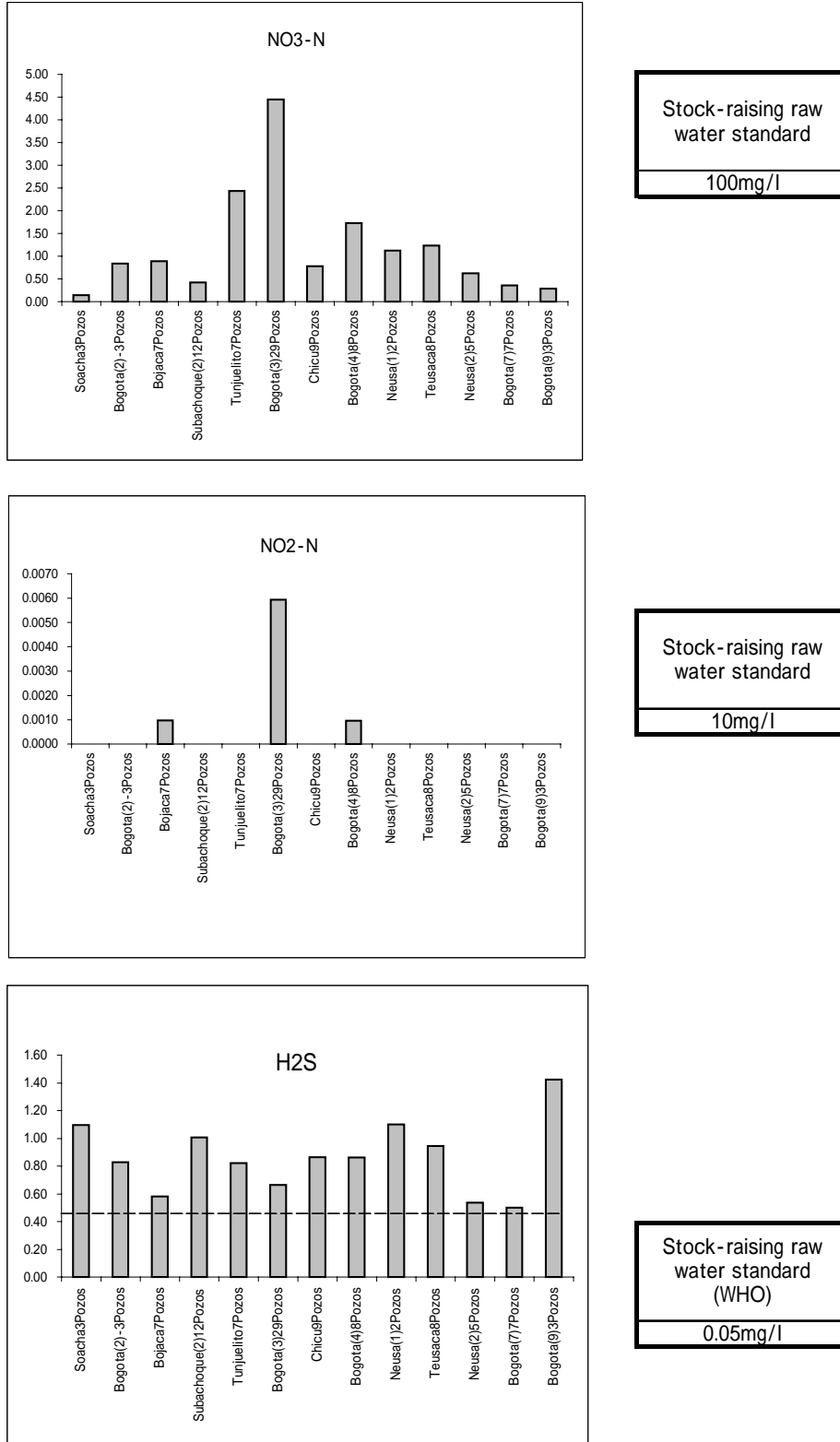


図 4-19 流域別主要水質の平均（第二年次）（続き）

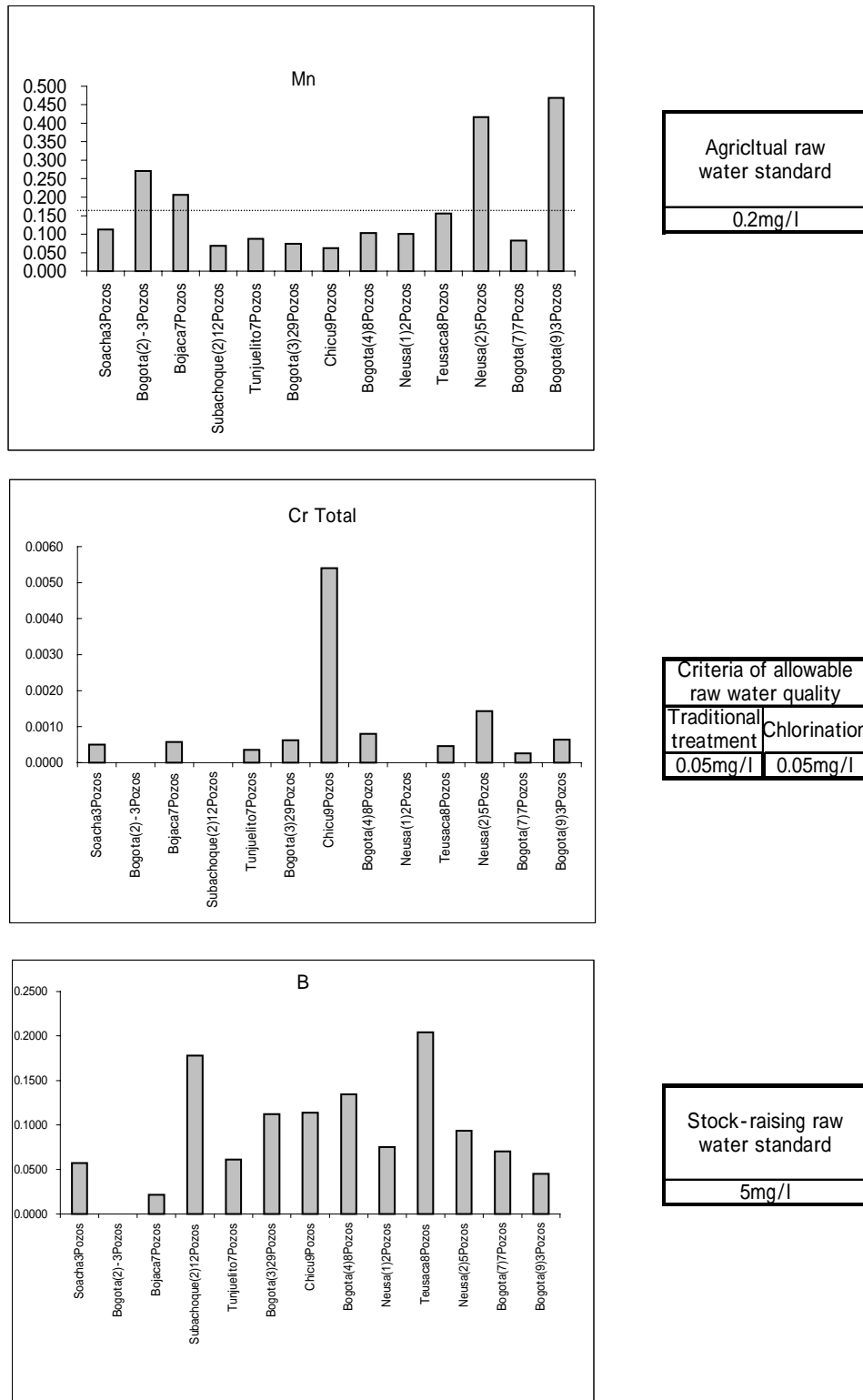


図 4-19 流域別主要水質の平均（第二年次）（続き）

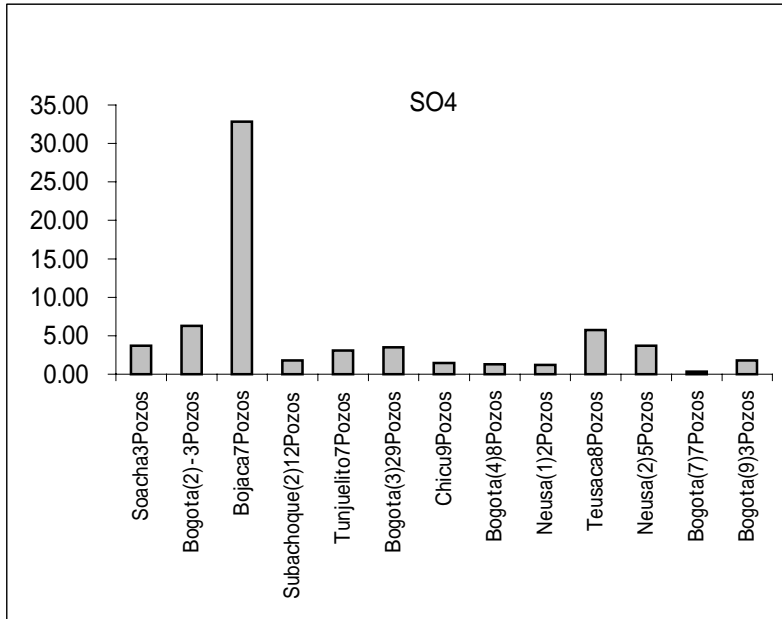
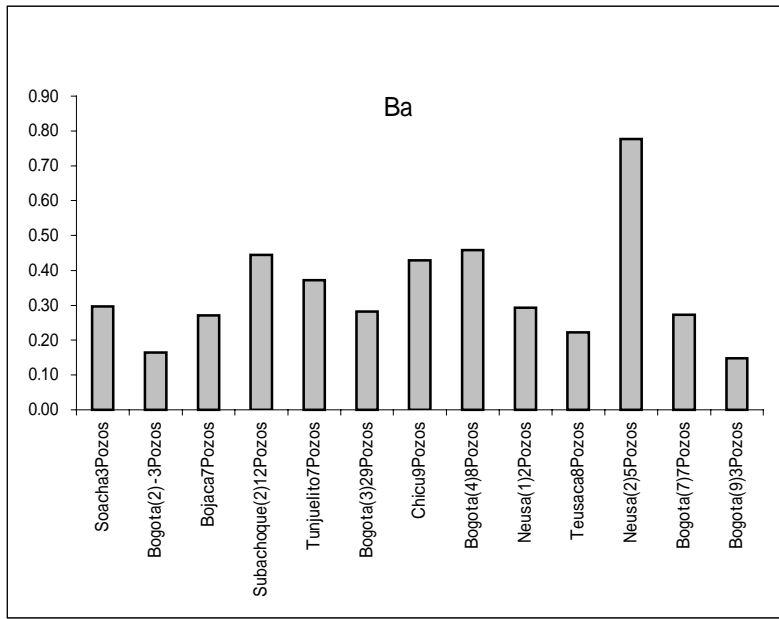


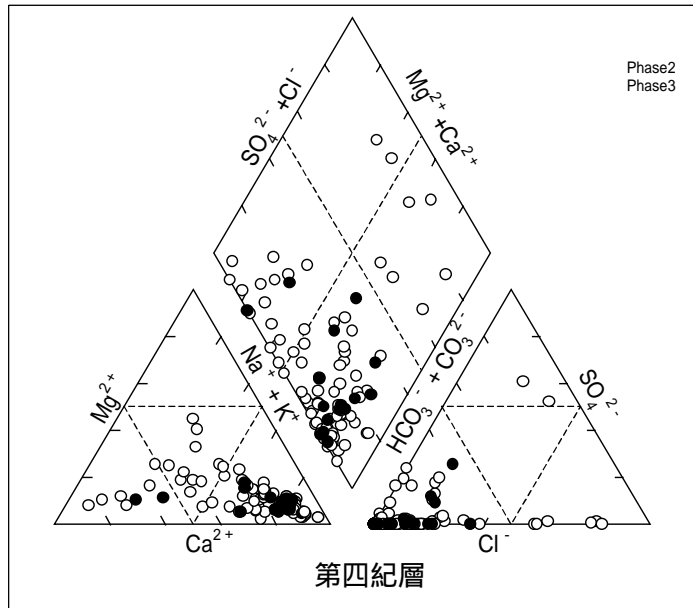
図 4-19 流域別主要水質の平均（第二年次）（続き）

(2) 地下水水質の地球化学的検討

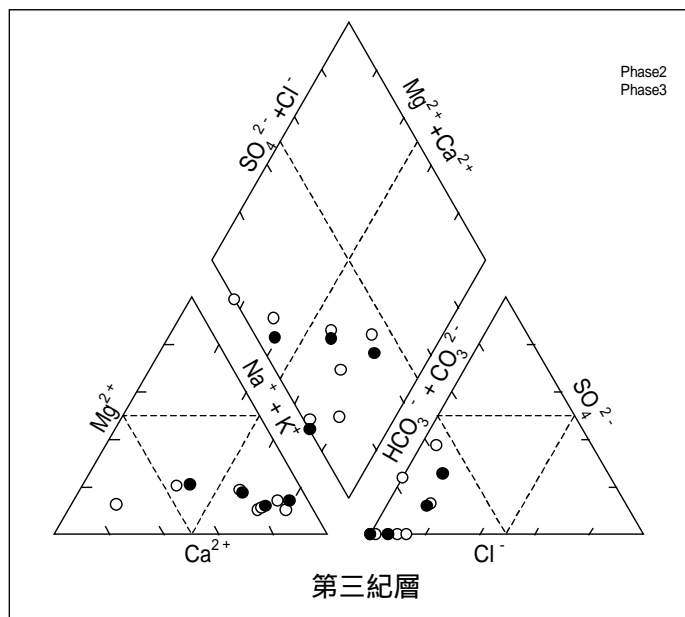
(a) トリリニアダイアグラムによる検討

ボゴタ平原地下水質の地球科学検討をするために、代表例として第二、三年次水質試験結果について、主要イオン8成分によりトリリニアダイアグラムを作成し検討した。 図 4-20に結果をしめす。これらを見ると、第四紀層の地下水は、深層の地下水によく見られるタイプである Na - HCO₃ 型が多く、浅層の地下水によく見られる Ca - HCO₃ 型を少し交えている。

また、海水や化石水に見られる Na - Cl 型や、火山性に見られる Ca - Cl 型も若干見られる。白亜紀層については、大きな特徴はなく、若干 Ca - HCO₃ 型が多いが、帯水層ごとの水質組成に大きな違いは見られない。



第四紀層のトリリニアダイアグラム



第三紀層のトリリニアダイアグラム

図 4-20 トリリニアダイアグラム (第2,3年次)

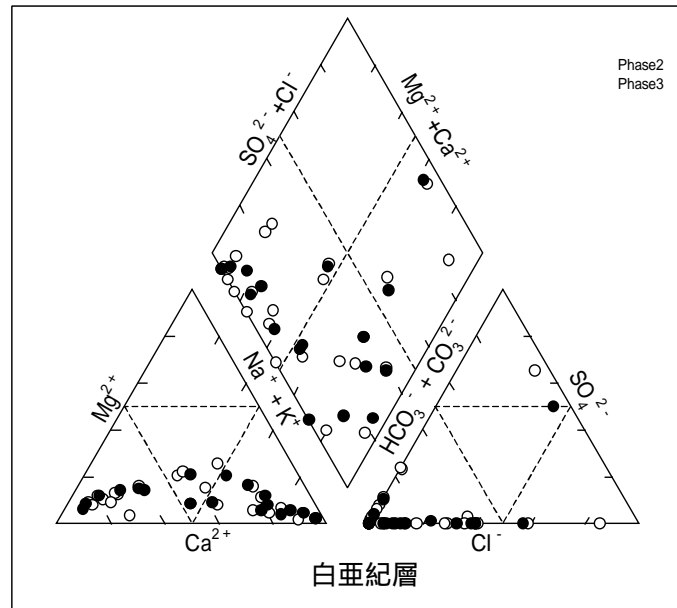


図 4 - 20 トリリニアダイヤグラム (第 2,3 年次) (続き)

(b) ヘキサダイヤグラムによる検討

第二年次および第三年次の試験結果の主要イオン 8 成分によって、井戸毎のヘキサダイヤグラムを作成した。このヘキサダイヤグラムを地形図中に描画したものをサポーティングレポートに収録した。

更に、全てのヘキサダイヤグラムを、クラスター分析を使って、8 成分の濃度による類似グループに分けた。その結果によれば、全試料は統計的に 10 系統に分類される。これについてもサポーティングレポートに記載されている。なお、前掲の表 4-14 には井戸毎にクラスター分類番号が示されている。主要な分類の水質的特徴は、例えば分類 1 (赤色で表示) は Na - HCO₃ 型の水、分類 2 (橙色) は同型の低濃度の水、分類 6 (空色)・7 (紺色) は同型の高濃度の水、分類 4 (黄色) は Ca - HCO₃ 型の水を表している。一般的に地下水は地下での滞留時間とともに粘土等との間でイオン交換を生じ、Ca - HCO₃ 型から Na・K に富む水質に変化するとされていることを考えると、分類 4 (比較的若い Ca - HCO₃ 型の地下水) 分類 1 (Na - HCO₃ 型に進化した地下水) 分類 6・7 (さらに濃度が高くなった Na - HCO₃ 型の地下水) といった水質の進化が予想される。

第四紀層中の水質では、盆地縁辺部から盆地中央部に向かう地下水の流れが水質面から示唆されている。白亜紀層でも、似たような結果が現れている。これらの結果は、別途実施されている地下水流動解析の結果を支持するものである。なお、詳細な検討については、サポーティングレポートを参照。

4.7 アイソトープ分析

4.7.1 アイソトープ分析項目

アイソトープ分析の分析項目を、分析の狙い、井戸選定基準と併せて、表 4-19 に示す。また、アイソトープ分析対象井戸の分布を、図 4-21 に示す。この図中の第一年次の採水地点の色区分は、図 4-22 の区分結果に従っている。なお、第三年次の調査では、トリチウム分析を省略している。その理由は、第一年次の調査で、トリチウム分析の有効な新しい年代の地下水は存在しないことが判明したからである。

Map of Isotope wells

Phase 1 and Phase 3

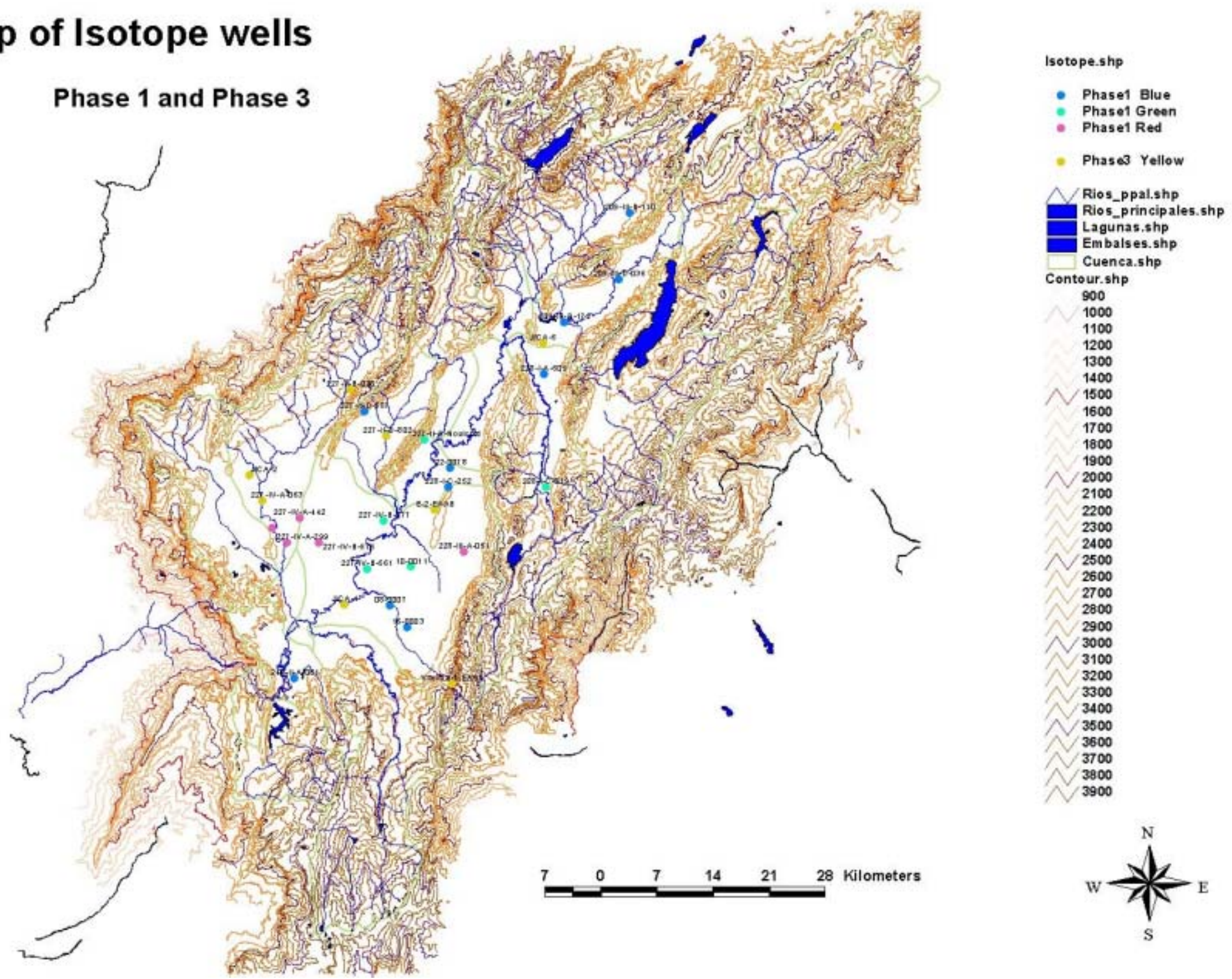


図 4-21 アイソトープ分析井戸分布図

表 4-19 アイソトープ井戸の選定基準

項 目		¹⁴ C	³ H	Dと ¹ H	¹⁸ Oと ¹⁶ O
分析のねらい		古い(5000年以上)地下水の年代測定	ごく新しい(40年程度)地下水の確認	地下水の起源, 混合, 流動などを調べる	
選定の基準		すべての帯水層から選定するが, 白亜紀層を重点とする 流域の中心部の井戸	すべての帯水層から選定するが, 第四紀層を重点とする。 調査域の全体にわたって選定する。		
選定井戸数	第四紀層	1ヶ所(5ヶ所)	14ヶ所	14ヶ所	14ヶ所(5ヶ所)
	第三紀層	1ヶ所	3ヶ所	3ヶ所	3ヶ所
	白亜紀層	3ヶ所(4ヶ所)	3ヶ所	3ヶ所	3ヶ所(4ヶ所)
合 計		5ヶ所(9ヶ所)	20ヶ所	20ヶ所	20ヶ所(9ヶ所)

()は、第三年次の採水ヶ所数

4.7.2 試験結果の概要

アイソトープ試験結果の概要は以下の通りである。

- 炭素 14 の試験結果： 炭素 14 による地下水の年代は、7,700 年～23,000 年を示している。採水した帯水層は主に白亜紀層であり、上記の年代は、涵養域から採水地点の白亜紀層までの流動時間を表すと考えられる。
- トリチウムの試験結果： 計測したトリチウム濃度は全て検出限界 0.7TU 未満であった。トリチウムの半減期が 12.35 年であることから考え、少なくとも、ボゴタ平原の地下水の年齢は、40 年を超えることが確実である。
- 重水素と酸素 18 の試験結果： “ $\delta D - \delta^{18}O$ ” 図上にデータをプロットし、天水線と照合した結果、調査対象の地下水は、基本的には、天水を起源とし域内を循環する地下水により占められていることが示唆された。

4.7.3 アイソトープ分析による検討

アイソトープ分析結果を表 4-20に示す。以下に分析項目ごとの概要を述べる。なお、第 1、3 年次の分析結果の詳細は、サポーティングレポートに掲載している。

(1) ¹⁴C (炭素 14)

一般に、降水が地下へ浸透し、流動していく間にはさまざまな反応によって溶存炭酸が供給されそれにとともに¹⁴C濃度も変化する。これらの二酸化炭素および炭酸水素イオン中のいずれの炭素も¹⁴Cを完全に失った Dead carbon であることから、これらが帯水層中で供給されると地下水中の¹⁴Cの割合は小さくなり、実際の年代よりも古く見積られる可能性がある。したがって、地下水の年齢は 1,690 年～33,170 年よりも新しい可能性が高い。また、第四紀層の地下水と白亜紀層の地下水の¹⁴Cによる年代測定結果を比較した場合、白亜紀層の地下水は第四紀層の地下水より新しい地下水であると結論できる。今回の¹⁴C分析の対象となった白亜紀層の井戸は山地・丘陵の山麓部分に位置し、雨水からの涵養を比較的短時間で受け易い位置にある。一方、第四紀層の井戸は、ボゴタ平原の中央部に位置し、その帯水層は厚い不透水層に覆われてる場合が多く、雨水によって涵養された地下水が帯水層へ到達するには多くの時間を必要とする。また白亜紀層帯水層の透水性が第四紀層帯水層の透水性より高く、白亜紀層の地下水流動は第四紀層の地下水流動より活発であることも¹⁴C分析結果の地下水年齢に現れている。水質分析試験結果によると、第四紀層の地下水は白亜紀層の地下水より深層型(Na-HCO₃型)を示しており、この結果は¹⁴C分析結果と一致している。また人工涵養パイロットスタディを実施した Vitelma の地下水は、15 個のサンプルの中では最も新しい年代の地下水に分類される。

表 4-20 アイソトープ分析結果

No.	井戸	流域名	帯水層	水深(m)	¹⁴ C 年齢(年)	TR	δ ¹⁸ O(‰)	δD(‰)
	<第1年次>							
1	246-II-A-061	BOGOTÁ(1)	Saban-Gdlupe	357	14140±50	0.41	-10.67	-60.76
2	227-II-D-587	CHICU	G. Guadalupe	1000	8230±40	0.50	-11.61	-78.50
3	227-IV-A-233	SUBACHOQUE	Sabana	-	27150±150	0.37	-11.29	-74.16
4	227 IV A-299	SUBACHOQUE	Sap-Subacho	500	23650±100	0.39	-8.82	-69.81
5	228-I C-252	BOGOTÁ(2)	Tertiary	170	24180±110	0.38	-10.97	-63.66
6	08-0007	BOGOTÁ(2)	Guadalupe	450	-	0.40	-11.77	-73.94
7	227-IV-B-561	BOGOTÁ(2)	Sabana	115	-	Na	-10.95	-43.13
8	11-0010	BOGOTÁ(2)	Sabana	251.8	-	0.45	-10.22	-86.52
9	22-0078	BOGOTÁ(2)	Sabana	252	-	0.45	-10.36	-61.42
10	228-I-C-019	TUESACA	F. Sabana	135	-	0.49	-10.82	-33.07
11	209-III-D-172	BOGOTÁ(3)	F. Sabana	253	-	0.35	-10.78	-70.70
12	228-I-A-509	TUESACA	Sabana	112	-	0.33	-11.00	-70.03
13	209-III-D-036	BOGOTÁ(3)	F. Sabana	82	-	0.56	-11.47	-70.38
14	209-III-B-170	NUESA	F. Cacho	-	-	0.42	-10.67	-66.14
15	227-II-D-1115?	BOGOTÁ(2)	Guadalupe	-	-	0.44	-11.48	-41.79
16	227-IV-A-442?	SUBACHOQUE	Sap-Subacho	353	-	0.57	-10.68	-73.77
17	227-IV-B-577?	BOGOTÁ(2)	F. Sabana	526	-	0.44	-12.49	-68.08
18	227 IV A-X6	SUBACHOQUE	Tilata	581	-	0.41	-11.91	-75.35
19	16-0003	BOGOTÁ(2)	F. Sabana	192	-	0.47	-11.36	-66.90
20	10-0011	BOGOTÁ(2)	F. Sabana	120	-	0.44	-11.55	-54.54
	<第3年次>							
21	227-II-B-028	SUBACHOQUE(2)	G. Guadalupe	70	3630±40		-10.46	
22	227-VI-A-063	SUBACHOQUE(2)	G. Guadalupe	448	33170±380		-10.71	
23	227-II-D-802	CHICU	F. Sabana	100	32380±350		-10.51	
24	Vitelmal EAAB	BOGOTÁ(3)	Guadalupe ?		4620±40		-10.39	
25	E-2 EAAB	BOGOTÁ(3)	Guadalupe	389	9430±40		-9.55	
26	JICA1 EAAB	BOGOTÁ(3)	Sabana	196	29750±270		-10.31	
27	JICA2	SUBACHOQUE(2)	Sabana	192	33110±380		-10.37	
28	JICA5	BOGOTÁ(7)	Sabana	188	20640±90		-9.51	
29	JICA6	BOGOTÁ(9)	Tilata	188	1690±40		-10.54	
30	Rio BOGOTÁ 源流				-		-9.99	

TR:トリチウム単位(1TRは水素原子1018個中に1個のトリチウム原子を含む。以前はTUと略称)、Na:検出限界未満、δ値:問題とする試料とSMOW(平均標準海水)の同位体比の差をSMOWの同位体比に対する割合として千分率(‰)で表すものであり、値の正負は各々試料の同位体比がSMOWより大きいか小さいかを表す。

(2) ³H (トリチウム)

トリチウム濃度を決定するため、20 サンプルを分析した。結果的にはすべてのトリチウム濃度は検出限界0.7TU未満であった。トリチウムの半減期が12.35年であることを考えると、ボゴタ平原の地下水は40年より古いことが言える。この結果は、涵養域からサンプリング井戸までの距離や帯水層の深さが深い(GL-80m~GL-1,000m)ことなどから考えると、妥当なものと考えられる。一般に、熱核爆発実験によって生産された人工トリチウムは、その実験地が北半球に集中していたため、北半球に多く南半球に少ない。また、海面からの高度が高いほど濃度は低いとされている。調査地域の標高は2,600m~3,000mであることも考慮すると、トリチウム分析を実施しても、新たな情報が得られる可能性は低いと推定されるため、第三年次の調査ではトリチウム分析は省かれた。

(3) Dと¹⁸O(重水素と酸素18)

第1年次調査結果の重水素と酸素18の分析結果を図4-22に示す。これによると、3タイプの水が識別できる。

ボゴタ川に沿って配列されているNo.1, 2, 5, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 19の井戸水の同位体組成は、図4-22に示すように、世界の天水線(δD=8δ¹⁸O+10)とほぼ平行な傾きを持つ近似直線δD=9.3868δ¹⁸O+35.631の位置にプロットされる。ボゴタ地域の天水線は明らかではないが、この直線が当地域の天水線に近いものと予想される。

一方、Madrid地区の断層密集地域にある井戸No.3, 4, 16, 18では、近似直線がδD=1.7844δ¹⁸O-54.224となり、傾きが小さく天水線と交差する。浸透した雨水が地下の熱源で暖められ周囲の岩石と同位体交換

反応を起こした結果生じたものと考えられる。(岩石中には原子比にして約 60%の酸素があり、このような条件下で水と岩石が同位体交換反応を起こすと、水の酸素同位体比が岩石の値に引き寄せられ¹⁸Oが増加する。一方、岩石中の水素の量は、水中の水素の量に比べて非常に小さいことから、同位体交換反応による水素同位体比の変化はほとんどない。よって近似直線の傾きが小さくなる。)

また、No.7, 10, 15, 17, 20 の井戸の水は、図 4-22のグラフでは天水線から上方にはずれた位置にプロットされ、最も上部にプロットされるNo.10, 15 が涵養域に近い地域に、それより下にプロットされるNo.7, 17, 20 とNo.8 が市街地部に位置する。地下水が地層中を移動する際の鉱物による濾過作用や深部の地層水の混入によって、Dや¹⁸Oの濃度が高くなったことが考えられる。

第3年次の¹⁸O分析サンプル地点は第1年次¹⁸O分析サンプル地点の補間的位置および調査地域のより外周側(白亜紀層の岩石地帯)に配置された。その分析結果は1年次結果とほぼ整合するが、¹⁸Oの濃度の平均値が第1年次の平均値より多少高めである。これは、岩石地帯におけるサンプル数の比率が高くなったため、岩石-雨水との反応の影響を受け¹⁸O濃度が高められたサンプルの比率が高かったためと推定される。

以上の水素-酸素同位体分析結果より、調査地域の地下水は、一部に深部からの地下水の混入の可能性は考えられるものの、基本的には、調査地域の天水を起源とし循環している、と考えられる。

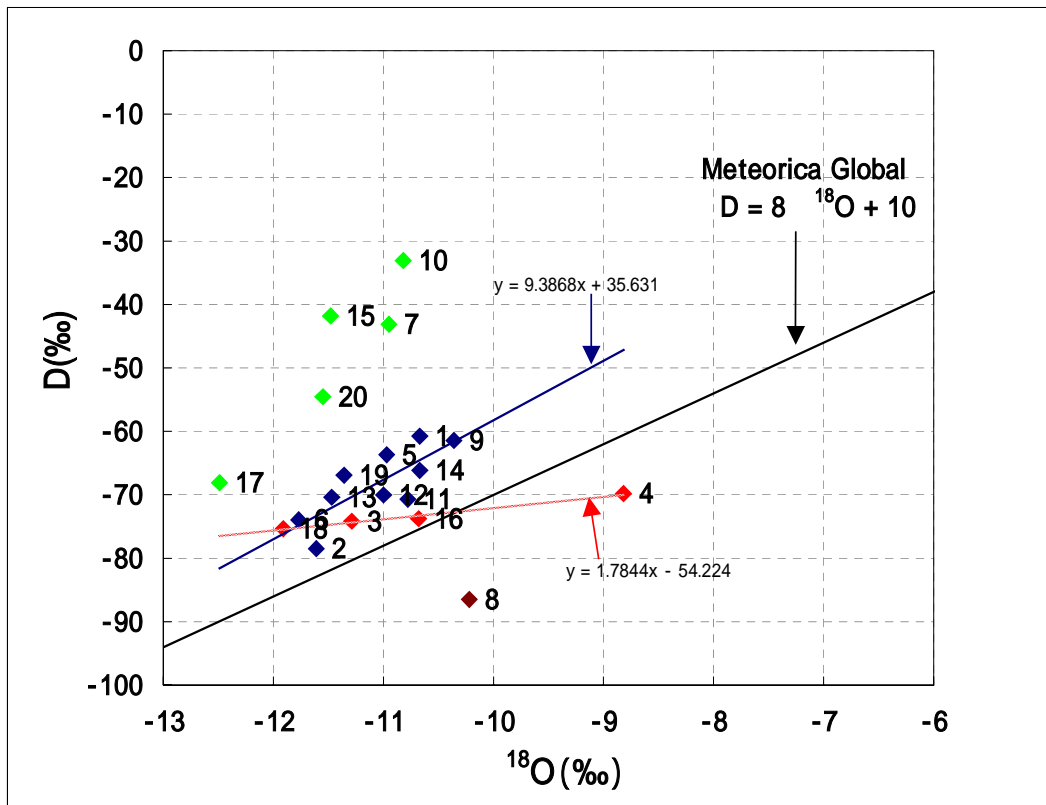


図 4-22 δD および δ¹⁸O の相関

4.8 井戸インベントリー調査

(1) 井戸インベントリーの概要

調査団は調査対象地域に存在する全ての井戸を対象としてインベントリー調査を実施した。井戸インベントリー調査は、INGEOMINAS の井戸データベース、CAR および DAMA に登録された井戸データを収集・整理することによって実施した。この3者を総合することによって、現在調査対象地域にある井戸の大部分を把握することが可能である。表 4-21に、井戸インベントリー調査で調査団が収集・整理した井戸数を示す。同表から、調査対象地域に存在する既存井戸の総数は約 7,081 本と推定される。

表 4-21 調査対象地域の既存井戸数の推定

区分	井戸本数	
	井戸位置が記載されている井戸	井戸位置が記載されていない井戸
INGEOMINAS の井戸データベースに登録されている井戸本数	3,027	694
CAR に登録されている井戸本数	1,672	1,439
DAMA に登録されている井戸本数	248	1
合計	4,947	2,134
全体合計	7,081	

調査団による井戸インベントリーの調査項目を表 4-22に示す。

表 4-22 井戸インベントリーの調査項目

項目	項目	項目
井戸位置	電気検層結果	地下水涵養量(mm/年)
所有者	ガンマ検層結果	井戸水質試験結果(1)
井戸住所	井戸座標	井戸掘削時期
地図上の井戸位置	井戸深度 (m)	土質種類
井戸地盤高	地下水位	水質試験結果(2)
井戸完成日	単位時間揚水量(m ³ /日)	スクリーン位置
井戸施設	帯水層	地質柱状図
地下水位・水質調査項目	透水係数(m/s)	-

(2) 調査対象地域における現況揚水量

データベースに基づき調査対象地域における現状の井戸揚水量を推定した。調査団の井戸データベースには全部で7,081本の井戸データが記録されており、各井戸からの揚水量が記録されている。しかし、全ての井戸データに揚水量の情報が記載されているわけではない。揚水量の記録状況は以下の通りである。

	井戸数	合計揚水量(m ³ /day)
単位時間揚水量および揚水時間が記載されているデータ	2,644	158,690
単位時間揚水量または揚水時間が記載されていないデータ	4,437	不明
合計	7,081	不明

単位時間揚水量および揚水時間が記載されている井戸の日揚水量は以下の関係から推定した。

$$1 \text{ 本の井戸の日揚水量} = \text{単位時間揚水量} \times 1 \text{ 日の揚水時間}$$

一方、単位時間揚水量あるいは揚水時間が不明な井戸については、それらを推定しなければならない。以下に、単位時間揚水量あるいは揚水時間が不明である井戸についてそれを推定する方法とその結果を記載する。

(a) 単位時間揚水量の推定

単位時間揚水量が既知のデータによる単位時間揚水量の分布は図 4-23に示すとおりである。単位時間揚水量の全データの平均値は1.54(1/s)である。したがって、単位時間揚水量が不明の井戸データについて、これらの単位時間揚水量を1.54(1/s)と仮定した。

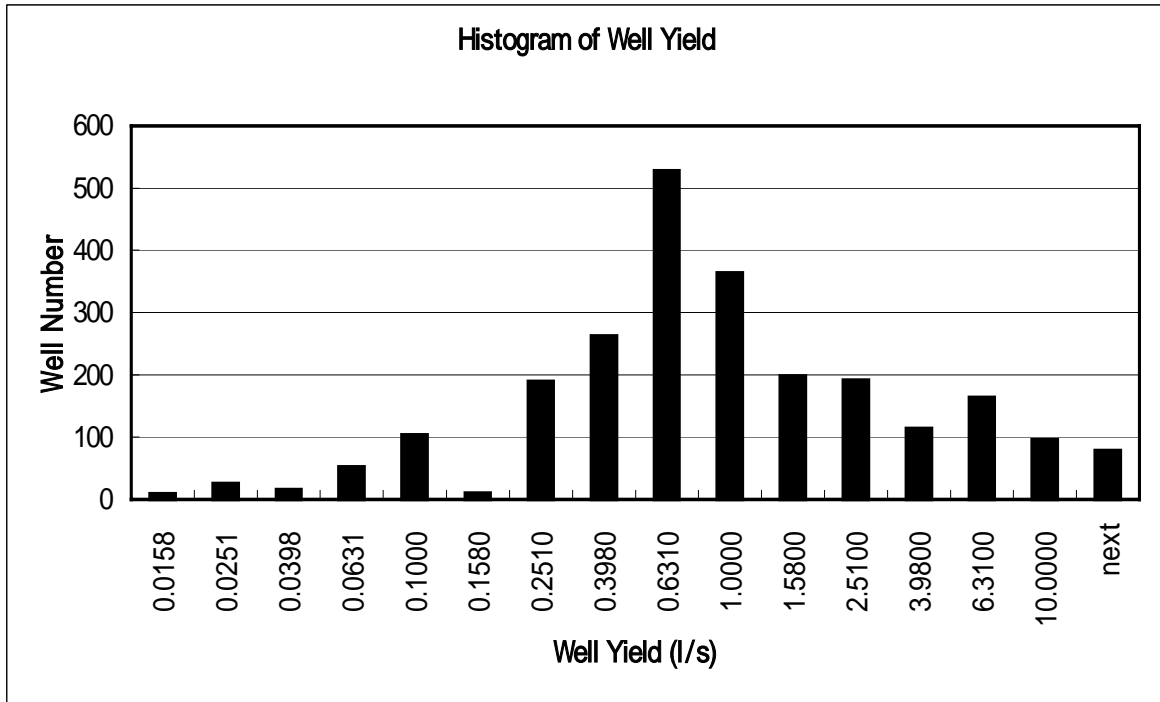


図 4-23 単位時間揚水量ヒストグラム

(b) 1日の平均揚水時間の推定

1日の平均揚水時間が既知のデータによる揚水時間の分布は図 4-24に示す通りであり、揚水時間の平均値は6.54時間/日である。また、図 4-25に示すように単位時間揚水量と揚水時間には明確な関係はない。したがって、1日の平均揚水時間が不明の井戸データに関しては、1日の平均揚水時間として6.54時間/日を使用した。

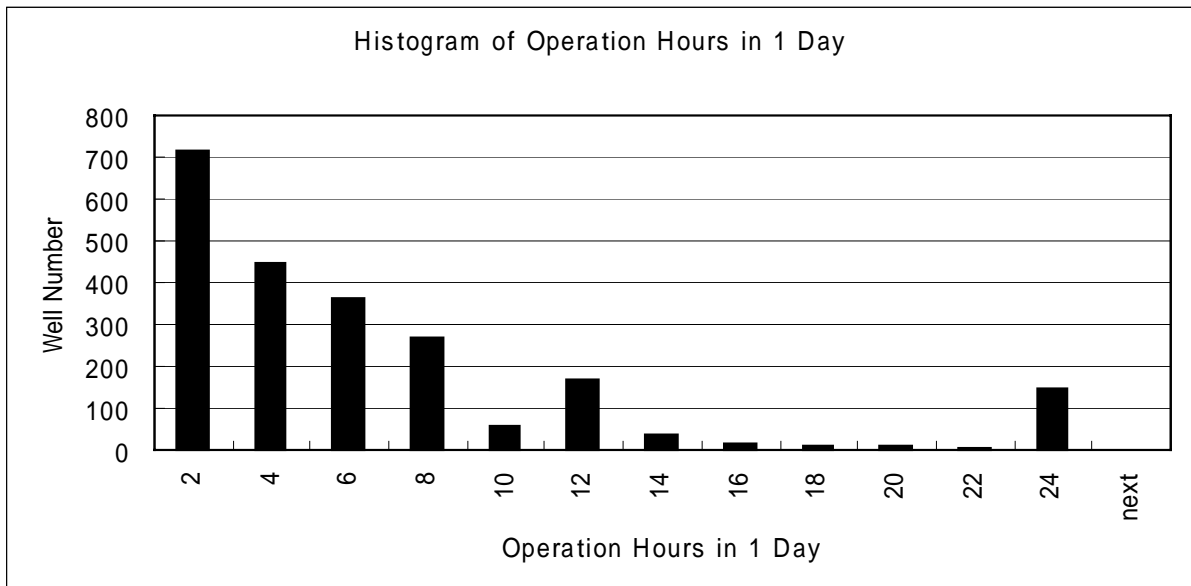


図 4-24 1日当たりの揚水時間ヒストグラム

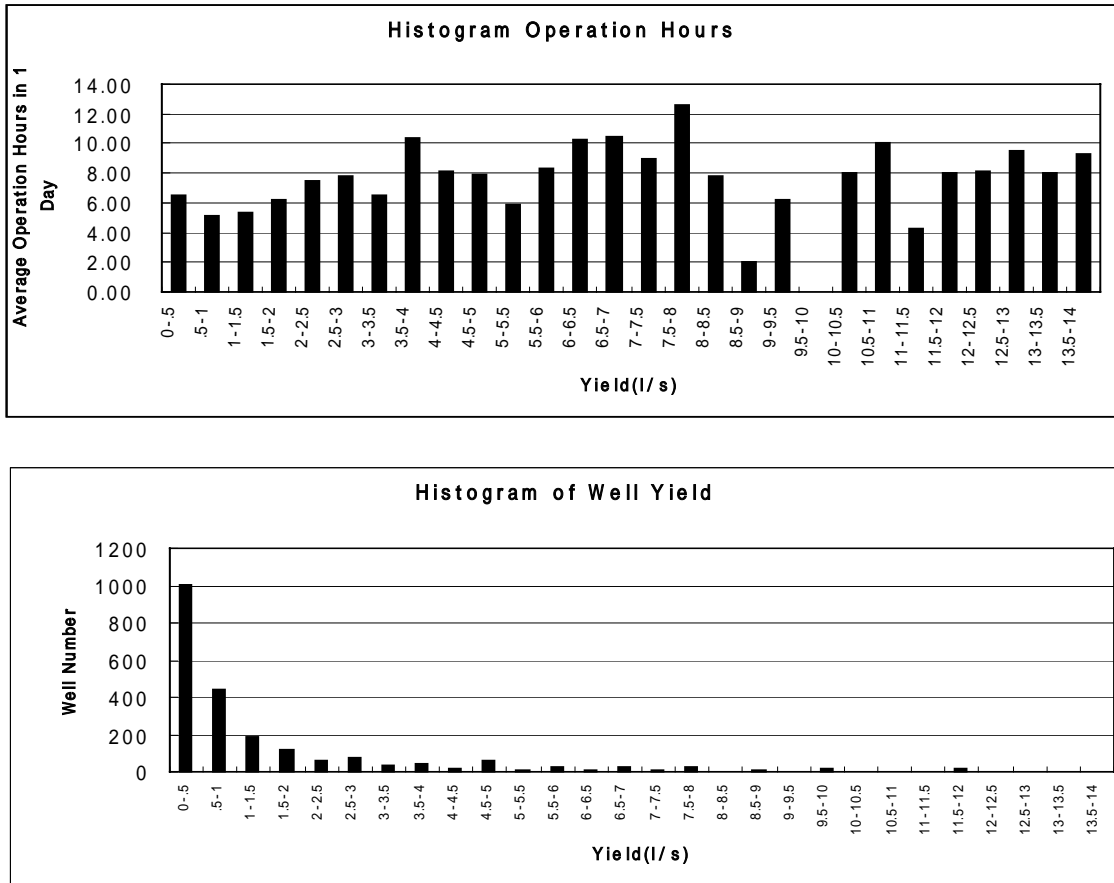


図 4-25 単位時間揚水量と平均揚水時間のヒストグラム

(c) 全体揚水量の推定

上述の分析結果に基づき、調査対象地域の全体揚水量を推定した。その結果を表 4-23に示す。表 4-23に示すように、調査対象地域の全体揚水量は 320,490m³/日である。推定された全体揚水量を他の単位に換算すると、117×10⁶m³/year = 3.7m³/s = 27mm/year となる。

表 4-23 調査対象地域の全体揚水量

井戸データ区分	井戸数	推定単位時間揚水量	1日当たりの推定揚水時間	合計揚水量 (m ³ /day)
単位時間揚水量および揚水時間が記載されている井戸	2,644	既知	既知	158,690
単位時間揚水量または揚水時間が記載されていない井戸	4,437	1.54(l/s)	6.54(時間)	160,800
合計	7,081	-	-	320,490

(3) 地質別の井戸本数および揚水量

現時点までに調査団が整理した井戸データベースには、各井戸が取水している帯水層の区分が示されている。このうち INGEOMINAS の多くの井戸データは帯水層に関する情報がある。その情報に基づき、帯水層ごとの井戸本数および取水量を表 4-24のように推定した。

表 4-24 帯水層別井戸本数および帯水層別揚水量

帯水層区分		井戸本数		井戸揚水量	
		井戸本数	全体井戸本数に占める%	揚水量	全体揚水量に占める%
第四紀	Quaternary	6,570	92.9	248,830	77.6
第三紀	Chaco 層	60	0.8	4,200	1.3
	Guaduas 層	50	0.7	3,900	1.2
	他の第三紀層	50	0.7	700	0.2
白亜紀	Labor and Tierna 層	246	3.5	48,060	15.0
	Pleaners and Dira 層	90	1.3	14,400	4.5
	Chipaque 層	15	0.2	400	0.1
全体	-	7,081	100	320,490	100

井戸データベースに収録されている井戸約7,081本のうち、井戸の帯水層が明記されている井戸数は約3,400本である。表4-24に示すように、井戸本数の面からは、調査対象地域の全井戸のうち約93%は第四紀層を帯水層とし、約2%は第三紀層を帯水層とし、約5%は白亜紀層を帯水層としている。また、井戸の揚水量の面からは、調査対象地域の全揚水量のうち約78%は第四紀層から取水し、約3%は第三紀層から取水し、19%は白亜紀層から取水している。以上のデータが示すように、調査対象地域では、大部分の地下水は第四紀層から取水されており、白亜紀層からの取水は少ない。また第三紀層からの取水は非常に少ない。

(4) 地域ごとの井戸分布

井戸 Inventory 結果から流域ごと井戸本数および揚水量を算出した。その結果を表4-25と図4-26に示す。図4-26は揚水量を1km×kmのメッシュでごとに加算したものを表示している。図4-26からわかるように、ボゴタ平原における井戸の分布は非常に偏っている。ボゴタ平原中央～西部地域で揚水量が非常に多い。ボゴタ市の西部地域、Subachoque 川流域、Chicu 川流域に井戸が集中していることが明らかである。

表 4-25 流域ごと井戸本数および揚水量

流域名	流域面積(km ²)	井戸数	面積当り井戸本数	日揚水量	面積当り日揚水量
Bogota1 - Bogota3	678	1,559	2.3	77,651	114.5
Bogota4 - Bogota6	232	1,141	4.9	45,797	197.4
Bogota7 - Bogota9	557	429	0.8	27,451	49.3
Bojaca	219	311	1.4	21,549	98.4
Chicu	134	1,620	12.0	44,636	333.1
Frio	194	320	1.6	12,476	64.3
Neusa	432	185	0.4	8,333	19.3
Sisga	152	1	0.0	30	0.2
Muna	128	40	0.3	1,298	10.1
Subachoque 1	32	18	0.6	293	9.2
Subachoque 2	386	1,078	2.8	54,751	141.8
Teusaca	353	256	0.7	14,467	41.0
Tomine	368	21	0.7	719	2.0
Tunjuelito	404	103	0.3	11,038	27.3
合計	4,269	7,081	1.7	320,490	75.1

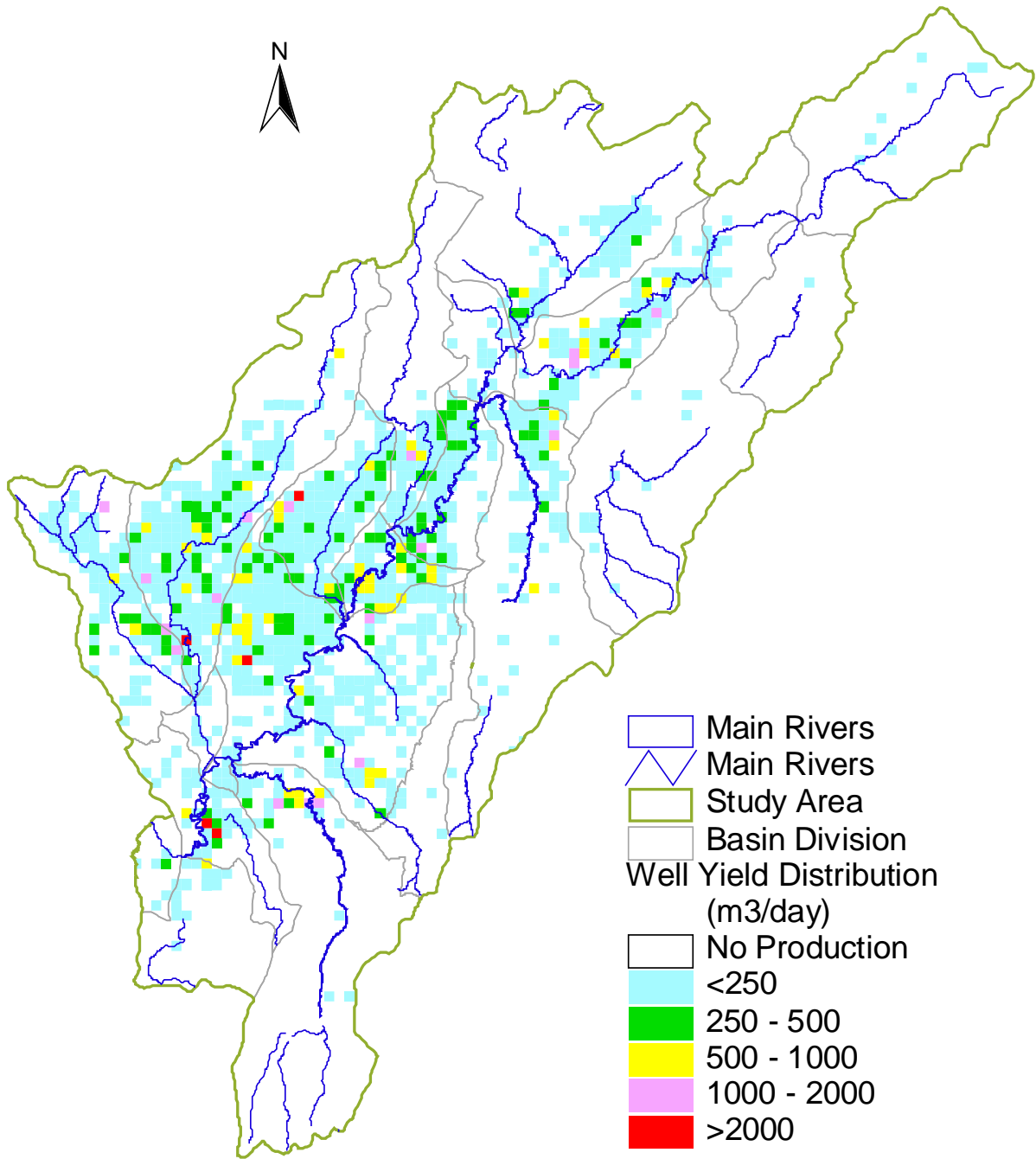


図 4-26 調査地域の揚水量分布

4.9 気象観測

本調査団は、調査対象地域の気象観測を目的として、調査対象地域の 11 個所に気象観測所を設置した。

(1) 気象観測所設置位置

気象観測所設置位置は以下の通りであり、また図 4-27に示す。これらの観測気象観測機器を設置する 11 地点を選定するに当たっては、関係機関である EAAB、CAR、IDEAM、INGEOMINAS と十分な協議を行なった。最終的に選定された 11 個所は、調査対象地域内の主に丘陵・山地部に配置されている。これらの地域は現在まで気象データが得られていなかった地域である。今回設置した 11 個所の気象観測所は、調査対象地域内の既往気象観測ネットワークに組みこまれ、全ての関係機関によって観測結果が利用されている。また、気象観測地点の選定に当たっては、気象データ観測する上で重要な地点であることだけでなく、盗難や破壊に対して安全な地点であることも十分に考慮した。

- | | | |
|---------------|------------------------|------------------------|
| 1) Tomine | 5) El Vino | 9) Aguas claras (Muna) |
| 2) Suesca | 6) Cruz verde (Bojaca) | 10) Dona Juana |
| 3) Casa Loma | 7) Paramo de Guerrero | 11) Manjui (Chia) |
| 4) EL tablazo | 8) Siecha | <合計> 11ヶ所 |

(2) 気象観測項目および気象機器

気象観測項目は、①風向風速、②雨量、③湿度、④温度、⑤日照時間、⑥蒸発量および⑦日射量の 7 項目である。気象観測機器はドイツ AHLBOR 社の製品あり、各機器の名称、仕様および数量は表 4-26 に示す通りである。気象機器の設置は 2002 年 2 月に完了し、その後から観測が開始された。現在気象観測を継続中である。気象観測結果は本調査の気象解析に有効に利用されている。

表 4-26 JICA 設置気象観測機器および付属品

機 器	数量
センサー類	
a) 風向・風速計 (羽根式)	11
b) 気温・湿度計	11
c) 日射計	11
d) 蒸発計 (蒸発タンクおよび超音波測定器)	11
データ保存機器類	
a) デジタル雨量計 (天秤式測定)	11
b) データ保存ユニット	11
c) データ収集ユニット	4
d) 携帯パソコンユニット (観測機器からのデータ入力とプログラミング)	4
エネルギーシステム	
a) ソーラーパネル	11
b) バッテリー	11
c) 電圧安定器	11
その他	
a) データ入力およびデータ管理用ソフトウェア	

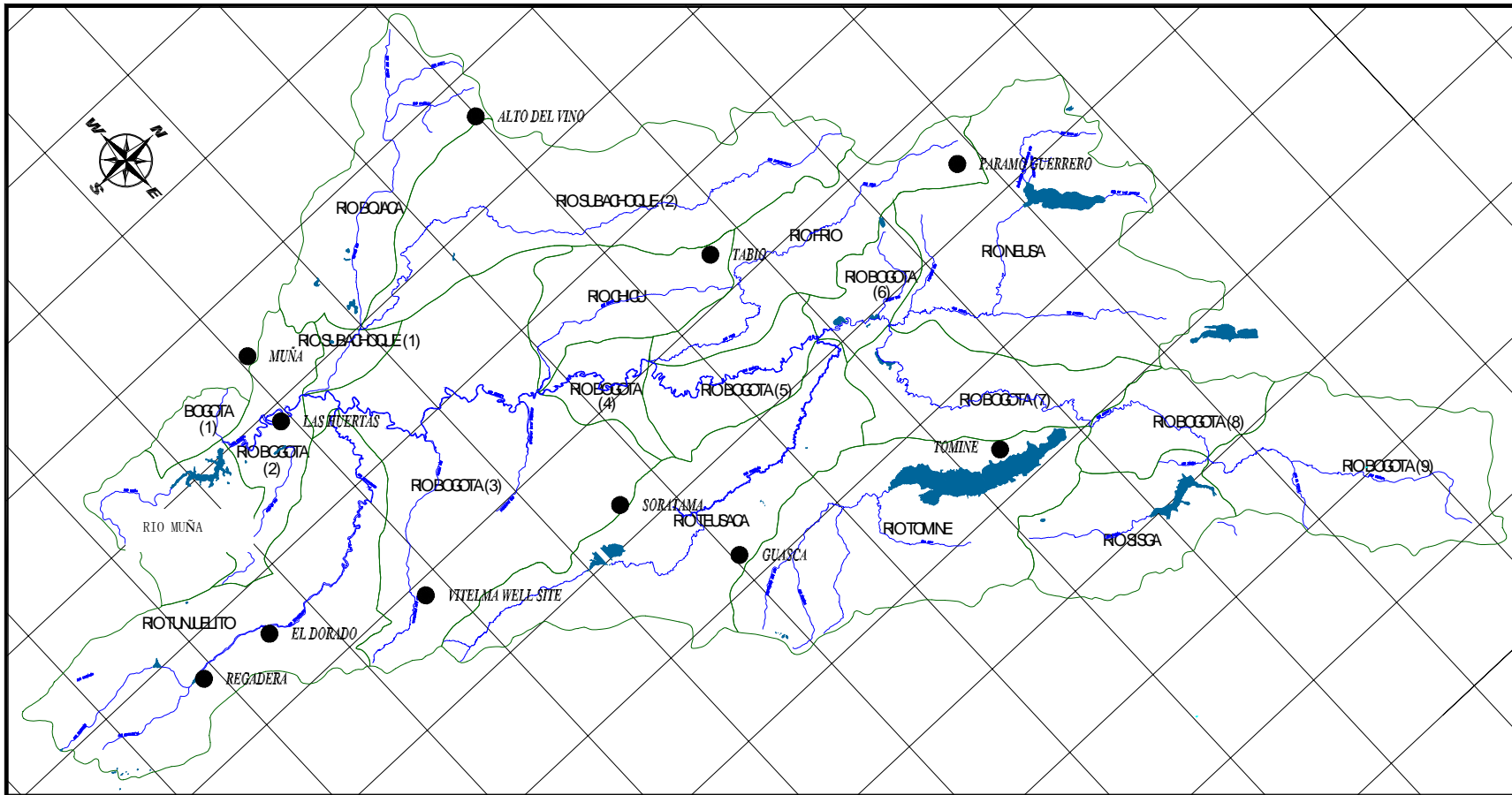


図 4-27 JICA 気象観測所設置箇所

4.10 地下水人工涵養のパイロットスタディ

人工涵養のためのパイロットスタディは、井戸に実際に注水を行なうことによって、人工涵養の可能性や問題点を明らかにし、人口涵養プロジェクトを計画するための基礎データを得る目的で実施した。

(1) パイロットスタディサイトの選定

本調査のフェーズ I において JICA 調査団は、次に示す 4 ヶ所の人工涵養候補地を提案した。

- ① Vitelma
- ② La Aguadora
- ③ La Salle
- ④ Subachque

①～③の位置における人工涵養は白亜紀層を対象としており、④は第四紀層を対象としている。本調査においてはより重要であると考えられる白亜紀層への人工涵養を検討した。①～③の候補地点の中から最終的に①Vitelma サイトをパイロットスタディの実施地点として選定した。その理由は以下の通りである。

- Vitelma サイトの近傍には San Cristobal 川が流れ、パイロットスタディの期間中に十分な水量を確保することが可能である。
- Vitelma サイトには EAAB の沈砂池があり、人工涵養のための清浄な河川水の取得が容易である。
- Vitelma 地域は標高 2,800m であり自噴井戸地域ではないことが予測されるため人工涵養試験に適している。

(2) パイロットスタディのための井戸

EAAB が Vitelma サイトで 2 本の井戸を掘削した。このうち 1 本は涵養井戸、もう 1 本は観測井戸である。この 2 本の井戸を利用してパイロットスタディを実施した。2 本の井戸の概要および地質状況は以下の通りである。

表 4-27 白亜紀試掘井戸の地質状況

井戸名	井戸深度	井戸口径	静水位	地質区分	深度	岩 相
涵養井戸	300m	8 inch	GL-6.63 m	崖錐堆積物	0-22	礫、砂、シルト
				Labor・Tierna 層	22-180	砂岩が卓越した砂岩・頁岩の互層
				Chipaque 層	180-30	頁岩
観測井戸	240m	4 inch	GL- 6.84m	崖錐堆積物	0-36	礫、砂、シルト
				Labor・Tierna 層	36-188	砂岩が卓越した砂岩・頁岩の互層
				Chipaque 層	188-24	頁岩

注) 観測井戸の静水位は、涵養井戸の地盤高に対するもの。

涵養井戸の揚水試験結果によると、涵養井戸の比湧出量は 62m²/日であり、高い井戸生産能力を示す。また、涵養井戸からの揚水の影響はわずか 15 分で 120m 離れた観測井戸で観測された。これは、白亜紀層に掘られた井戸相互間の反応の早さを示すものであり、白亜紀帯水層が高い被圧性を持っている一つの証拠となる。以上の観測結果は白亜紀帯水層における人工涵養の効果が周辺の井戸に短期間で到達することを意味する。

(3) パイロットスタディの手順

パイロットスタディ(人工涵養試験)の実施手順は以下の通りである。

- Vitelma サイトにある EAAB の沈砂池から水をポンプアップし涵養井戸の中に注入した。涵養井戸の近くにコンクリートタンク(体積 400m³)を設置し、沈砂池からポンプアップした水をこのタンク内に入れた。タンクと涵養井戸をパイプで接続し自然流下方式によってタンク内の水を涵養井戸の中に流入させる。流入した水は涵養井戸の深部に設置したスクリーンを通じて帯水層の中に流入する。図 4-29に涵養施設の構造、配置を示す。
- 涵養井戸への注水量はタンク内の水位変化を時間とともに測定することによって計測する。また同時にタンクと涵養井戸とを連結するパイプに設置した流量計で注入水量を観測する。また、観測井戸と涵養井戸には自記水位計を設置し、注水による井戸内の地下水水位の変化を観測した。測定サイ

クルを図 4-28に示す。

- 涵養井戸から周辺への影響は観測井戸の水位を観測することによって評価した。
- パイロットスタディの継続とともに注水量が減少してくることが予測される。注水量の減少は、注水中にタンク内の水位低下速度の変化から推定した。
- 注入量の減少の状態を見計らい、一旦注入を停止し、涵養井戸の中に揚水ポンプを入れ揚水試験を行った。この揚水試験によって涵養井戸の目詰まりを除去した。揚水試験は 3 日間程度継続した。この揚水試験によって、揚水による涵養井戸の目詰まり解消の効果を調査し評価した。揚水試験後、涵養井戸への注水を再開した。

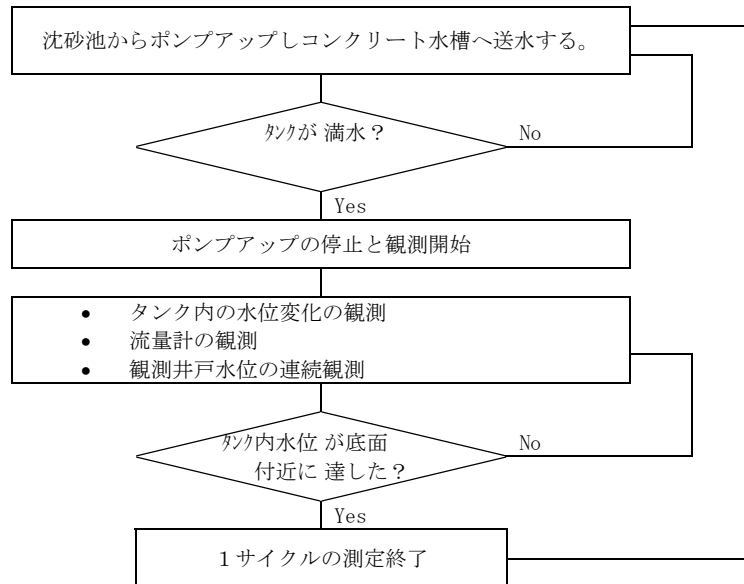


図 4-28 パイロットスタディにおける注水量測定 of 1 サイクル

(4) パイロットスタディの結果

パイロットスタディの結果の例を図 4-30 に示す。図は人工涵養中の涵養井戸内の地下水位を表示したものである。2002 年 11 月 16 日～11 月 26 日間の 10 回の測定結果を示している。この回の観測結果は以下の通りである。

表 4-28 人工涵養試験結果

平均注水量	平均注水水頭	比注水量	揚水試験時の比湧出量
864m ³ /日	8.41m	103m ² /日	69 m ² /日 (揚水量 1296 m ³ /日)

人工涵養の注水効率は、比注水量 (=注水量/水位上昇) で評価される。比注水量は、揚水効率を示す比湧出量において、揚水量を注水量に置き換えたものである。一般に、比注水量は、注水量の増加とともに減少するとされている。表に示した比注水量 103m²/日は注水量 864m³/日に対するものであり、注水量の増加とともに減少していくことが予想される。しかし、揚水試験時の比湧出量と比べ、Vitelm サイトの帯水層の注水効率は揚水効率と同等以上であることが証明された。

また、人工涵養の継続とともに、注水効率が低下することが予想される。現時点では、注水量は 1,300 ~864m³/日に徐々に低下している。井戸周辺の帯水層の目詰まりが原因と考えられる。揚水によって注水量は回復するものと推定される。

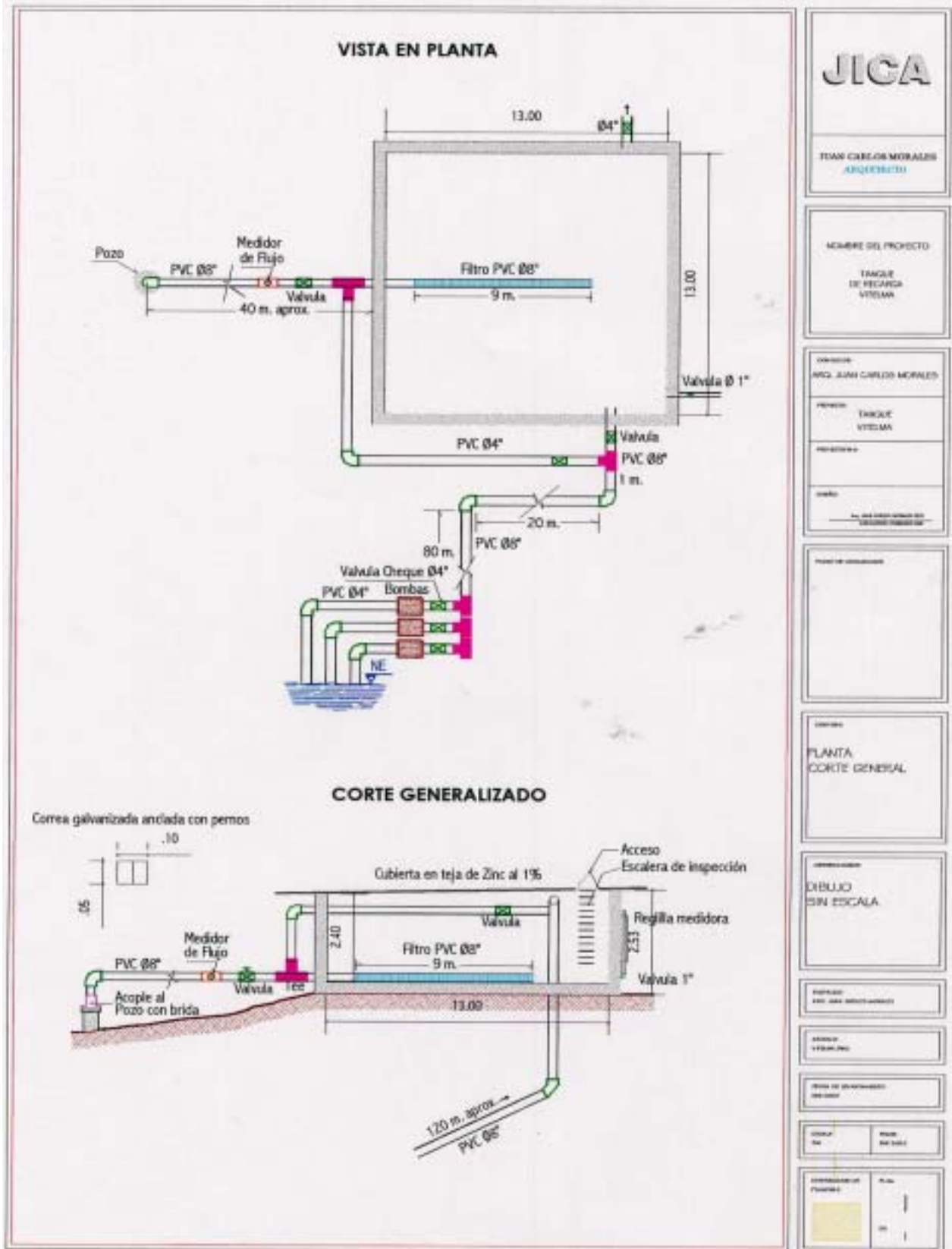


図 4-29 パイロットスタディの実施施設

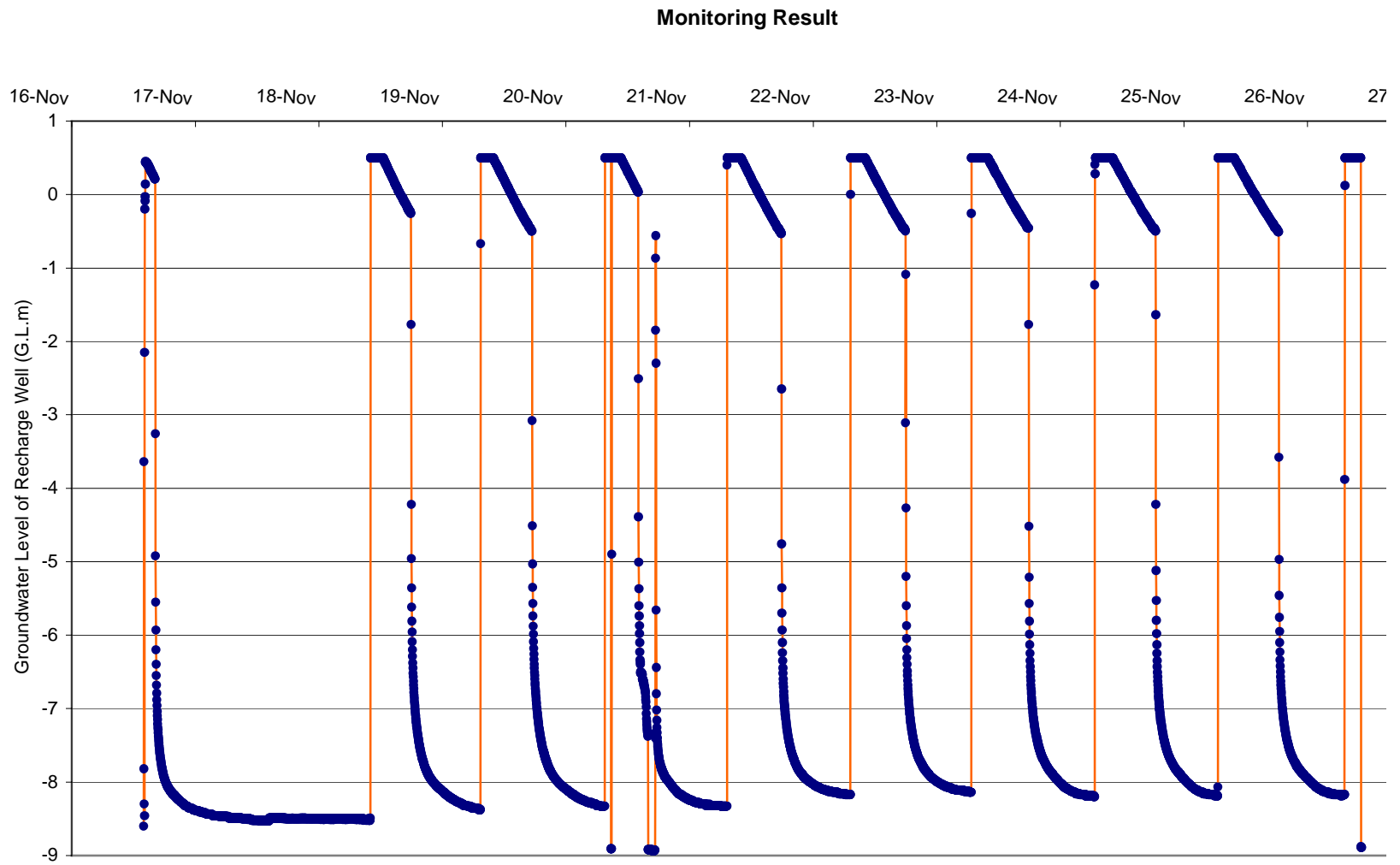


図 4-30 人工涵養試験結果例