

# Hidroquímica e hidromicrobiología



foto / argazkia: Jabier Les

# 4



# Hidroquímica e hidromicrobiología

Nagore Irazabal Tamayo

(Email: [nagore\\_ira@yahoo.es](mailto:nagore_ira@yahoo.es))

Alfonso Antxia Espeleologi Zientzi Elkarte/Sociedad de Ciencias Espeleológicas Alfonso Antxia  
Zabalbide 7- 2º izda – 48006 Bilbao - Bizkaia (Spain)

# 4

## Hidroquímica e hidromicrobiología

### Resumen

Para el estudio de las características físico-químicas de las aguas que se infiltran en la cueva Mendukilo se realizaron siete campañas de muestreo en la cavidad desde enero de 2006 hasta agosto de 2008. Para ello, se seleccionaron cuatro puntos de muestreo, con el objeto de contribuir al conocimiento de la hidroquímica de esta cavidad.

### Palabras clave

Mendukilo, cavidad, hidroquímica

### Hidroquímica

Uno de los métodos para dar seguimiento a la evolución del karst es mantener un estudio sistemático de las características físicas y químicas de las aguas. En las cuevas utilizadas para el turismo, algunos parámetros se transforman con el tiempo, influenciados por el régimen de visitas y la materia que estos aportan al sistema subterráneo.

La cueva Mendukilo es un punto de concentración de las aguas del macizo, con una alimentación por agua de infiltración, acumulada en gours o represas, que llegan a formar pequeños lagos, como en el sector Laminosin.

Para el estudio de las características físico-químicas de las aguas que se infiltran en la cueva Mendukilo se realizaron siete campañas de muestreo de las mismas en la cavidad desde enero de 2006 hasta agosto de 2008. Para ello, se seleccionaron cuatro puntos de muestreo, siendo agua procedente de agua acumulada en zonas de gours o procedente de goteos, cuando los había (figura 1).

Se determinaron en el agua determinados parámetros físico-químicos *in situ* susceptibles de sufrir modificaciones por el



Figura 1. Ubicación de los puntos de muestreo de agua para los análisis químicos. Los puntos se señalan con una H.

1. irudia. Análisi kimikoak egiteko uraren langinketa puntuen kokapena. Puntuak H batez adierazten dira.

transporte y almacenamiento de las muestras con diversos aparatos portátiles. El pH, la temperatura del agua, la conductividad y los TDS se determinaron con un Instrumento Multiparamétrico PC300 de LabProcess. El CO<sub>2</sub> disuelto se determinó con un equipo de análisis HI 3818 de Hanna Instruments, y el O<sub>2</sub> disuelto con un equipo C-200 y reactivos HI93732-01 de Hanna Instruments.

El resto de parámetros se determinó en laboratorio una vez recogidas las muestras de agua y transportadas al mismo en un periodo que oscila entre las 12 y 14 horas después de su recogida y adecuadamente mantenidos a 4 °C. Estos parámetros se determinaron mediante Espectrometría de Absorción Atómica (metales), tritaciación (carbonatos) y Electroforesis Capilar Iónica (compuestos nitrogenados).

A partir de los datos obtenidos (Tabla 1-a), se han realizado los cálculos geoquímicos pertinentes para conocer el estado de saturación mineral de las aguas kársticas y los valores de la presión parcial de CO<sub>2</sub> (PCO<sub>2</sub>). Se han utilizado los programas AQUACHEM y PHREEQC versión 2).

62 |

### Abstract

To study the physicochemical characteristics of water that infiltrates into the cave Mendukilo were carried out seven sampling campaigns in the cavity from January 2006 to August 2008, in order to contribute to the knowledge of the hydrochemistry of this cave.

### Key words

Mendukilo, cave, hydrochemistry

### Laburpena

Mendukilo kobazuloan infiltratu egiten den uraren ezaugarriak aztertze nahiaz, 2006ko urtarriletik 2008ko abuztu arte, lau zonaldeetan zazpi lagin kanpainetan hartutako laginen azterketa egin dugu, kobazulo honen hidrokimikaren jakintzan sakontzeko asmoz.

### Gako-hitzak

Mendukilo, kobazulo, hidrokimika

Tabla 1-a taula Muestreo / Laginketa: 12-02-2006

| Parámetros físico-químicos /<br>Parametro fisiko-kimikoak | Herensugea | Lago Laminosin<br>lakua | Gours<br>(de arriba / goikoa) | Cruce de galería /<br>Galerien elkargunea |
|---|------------|-------------------------|-------------------------------|---|
| Temp. agua (°C) / Uraren temperatura (°C)                 | 8,2        | 8,3                     | 8,3                           | 7,0                                       |
| Temp. aire / Airearen temp. (°C)                          | 8,1        | 8,1                     | 8,3                           | 8,3                                       |
| Conductividad / Eroankortasuna (µS/cm.) (20 °C)           | 272        | 257                     | 256                           | 257                                       |
| pH  | 8,0        | 8,2                     | 8,2                           | 8,2                                       |
| TDS (ppm)   | 163        | 155                     | 154                           | 157                                       |
| Turbidez / Uhertasuna (UNF)                               | 0,3        | <0,3                    | <0,3                          | <0,3                                      |
| Oxidabilidad / Oxidakortasuna (O <sub>2</sub> ) (mg/l)    | 0,5        | 0,6                     | 0,9                           | 0,6                                       |
| Carbono Orgánico Total / Karbono Organikoa (mg/l)         | 1,2        | 1,6                     | 1,6                           | 1,5                                       |
| Amonio (mg/l)   | <0,10      | <0,10                   | <0,10                         | <0,10                                     |
| Oxígeno disuelto / Oxigeno disolbatua (mg/l)              | 11         | 10                      | 10                            | 9,7                                       |
| CO <sub>2</sub> agua / Uraren CO <sub>2</sub>             | 3,5        | 2,5                     | 2,5                           | 2,5                                       |
| Hierro / Burdina (µg/l)                                   | <70        | <70                     | <70                           | <70                                       |
| Manganeso / Manganesoa (µg/l)                             | <2         | <2                      | <2                            | <2  |
| Nitritos / Nitritoak (mg/l)                               | <0,02      | <0,02                   | <0,02                         | <0,02                                     |
| Nitratos / Nitratoak (mg/l)                               | 2,0        | 8,7                     | 7,6                           | 9,5                                       |
| Fluoruros / Fluoruroak (mg/l)                             | <0,04      | <0,04                   | 0,04                          | 0,11                                      |
| Boro / Boroa (mg/l)                                       | <0,3       | <0,3                    | <0,3                          | <0,3                                      |
| Calcio / Kaltzioa (mg/l)                                  | 55,0       | 52,8                    | 51,9                          | 51,6                                      |
| Magnesio / Magnesioa (mg/l)                               | 1,2        | 1,2                     | 1,1                           | 1,1                                       |
| Sulfatos / Sulfatoak (mg/l)                               | 5          | 5                       | 5                             | 6   |
| Cloruros / Kloruroak (mg/l)                               | 4          | 4                       | 3                             | 4   |
| Sodio / Sodioa (mg/l)                                     | 3,0        | 2,5                     | 2,4                           | 2,7                                       |
| Aluminio / Aluminioa (µg/l)                               | <30        | <30                     | <30                           | <30                                       |
| Dureza total/ Guztizko gogort. (mg/l CaCO <sub>3</sub> )  | 142        | 137                     | 134                           | 133                                       |
| Selenio / Selenioa (µg/l)                                 | <1         | <1                      | <1                            | <1  |
| Antimonio / Antimonioa (µg/l)                             | <1         | <1                      | <1                            | <1  |
| Arsénico / Arsenikoa (µg/l)                               | <1         | <1                      | <1                            | <1  |
| Mercurio / Merkurioa (µg/l)                               | <0,2       | <0,2                    | <0,2                          | <0,2                                      |
| Cobre / Kobrea (mg/l)                                     | <0,05      | <0,05                   | <0,05                         | <0,05                                     |
| Cromo / Kromoa (µg/l)                                     | <1         | 13                      | <1                            | <1  |
| Cadmio / Kadmioa (µg/l)                                   | <0,2       | <0,2                    | <0,2                          | <0,2                                      |
| Plomo / Beruna (µg/l)                                     | <2         | <2                      | <2                            | <2  |
| Níquel / Nikela (µg/l)                                    | <5         | <5                      | <5                            | <5  |
| MICROBIOLOGÍA / MIKROBIOLOGIA                             |            |                         |                               |   |
| Bacterias heterótrofas / heterotrofoak 22°C (ufc/ml)      | 1000       | 800                     | 1000                          | 900                                       |
| Coliformes totales / Guztizko koliformeak (ufc/100 ml)    | 1          | 20                      | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  |
| Escherichia coli (ufc/100 ml)                             | AUSENCIA   | AUSENCIA                | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  |
| Enterococos / Enterokokoak (ufc/100 ml)                   | AUSENCIA   | AUSENCIA                | 1                             | AUSENCIA                                  |
| Clostridium perfringens (ufc/100 ml)                      | AUSENCIA   | AUSENCIA                | 1                             | AUSENCIA                                  |

# 4

## Hidroquímica e hidromicrobiología

Muestreo / Laginketa: 11-06-2006

| Parámetros físico-químicos /<br>Parametro fisiko-kimikoak         | Herensugea | Lago Laminosin<br>lakua | Gours (de arriba<br>/ goikoa) | Cruce de galería /<br>Galerien elkargunea |
|---|------------|-------------------------|-------------------------------|---|
| Temp. agua / Urenen temp (°C)                                     | 8,7        | 8,7                     | 8,7                           | 8,2                                       |
| Temp. aire / Airearen temp (°C)                                   | 8,5        | 8,7                     | 8,7                           | 8,7                                       |
| Conductividad / Eroankortasuna (µS/cm.) (20 °C)                   | 272        | 238                     | 268                           | 247                                       |
| pH  | 8,1        | 8,2                     | 8,2                           | 8,3                                       |
| TDS (ppm)   | 176        | 148                     | 163                           | 152                                       |
| Oxígeno disuelto / Oxígeno disolbatua (mg/l)                      | 10,6       | 9,7                     | 6,8                           | 11  |
| CO <sub>2</sub> agua / Urenen CO <sub>2</sub> (mg/l)              | 4,5        | 2,5                     | 3,5                           | 4   |
| Turbidez / Uheretasuna (UNF)                                      | 0,6        | 0,4                     | <0,3                          | <0,3                                      |
| Hierro / Burdina (µg/l)   | <70        | <70                     | <70                           | <70                                       |
| Nitratos / Nitratoak (mg/l)                                       | 2,2        | 9,0                     | 8,1                           | 8,5                                       |
| Calcio / Kaltzioa (mg/l)  | 46,1       | 45,9                    | 55,6                          | 50,0                                      |
| Magnesio / Magnesioa (mg/l)                                       | 1,0        | 0,9                     | 0,9                           | 0,9                                       |
| Sulfatos / Sulfatoak (mg/l)                                       | 7          | 4                       | 4                             | 5   |
| Cloruros / Kloruroak (mg/l)                                       | 4          | 3                       | 2                             | 3   |
| Sodio / Sodioa (mg/l)   | 2,5        | 1,9                     | 1,9                           | 2,1                                       |
| Dureza total / Guztizko gogortasuna (mg/l CaCO <sub>3</sub> )     | 119        | 118                     | 143                           | 129                                       |
| Potasio / Potasioa (mg /l)  | 0,4        | 0,2                     | 0,2                           | 0,2                                       |
| Alcalinidad / Alkalinitatea (mg/l HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) | 179,3      | 142,7                   | 175,1                         | 166,5                                     |
| Fluoruros / Fluoruroak (mg/l)                                     | -          | -                       | -                             | -   |

64 |

### Hidrokimika

Karst-en eboluzioaren jarraipena egiteko metodoetako bat uren ezaugarri fisiko eta kimikoen azterketa sistematikoa egitea da. Turismorako erabiltzen diren leizeetan, parametroetako batzuk denboraren poderioz aldatu egiten dira, bisiten eta haiek lurpeko sistemara ekartzen duten materiaren eraginez.

Mendukiloko leizea mendilerroko uren kontzentrazio gunea da, gours edo presetan metatzen den infiltrazio urak elikatua eta laku txikiak osatzen dituena, adibidez Laminosingo sektorean.

Mendukiloko kobazuloan infiltratzen diren uren ezaugarri fisiko-kimikoen azterketa egiteko, zazpi laginketa egin ziren kobazuloan, 2006ko urtariletik 2008ko abuztura bitartean. Horretarako, lau laginketa puntu hautatu ziren, eta ura gours zonetan metatutakoa zen, edo tanta jarioetakoa, halakorik zegoenean.

(1 irudia).

Uretan parametro fisiko-kimiko jakin batzuk in situ zehaztu ziren, hainbat aparatu eramangarriez laginak garraiatu eta gordetzeko aldaketak izan zitzaizketenak. pH-a, uren temperatura, eroankortasuna eta TDSak LabProcess-en PC300 Tresna Multiparametrikoaz zehaztu ziren. CO<sub>2</sub> disolbatua Hanna Instruments-en HI 3818 analisi ekipo batez zehaztu zen eta O<sub>2</sub> disolbatua Hanna Instruments-en C-200 ekipo batez eta HI93732-01 erreaktiboez. Gainerako parametroak laborategian neurtu ziren, ur laginak jaso eta hara eraman ondoren, jaso eta 4 °C-tan mantendu osteko 12-14 ordutan. Parametro horiek Zurgapen Atomikoko Espektrometria bidez (metalak), tritiazio bidez (karbonatoak) eta Elektroforesi Kapilar Ioniko bidez (konposatu nitrogenatuak) neurtu ziren. Jasotako datuetan oinarrituta (1 taula) dagozkion kalkulu geokimikoak egin dira ur karstikoen saturazio minerala eta CO<sub>2</sub>ren

## Muestreo / Laginketa: 29-10-2006

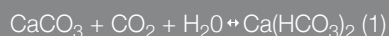
| Parámetros físico-químicos /<br>Parametro fisiko-kimikoak         | Herensugea | Lago Laminosin<br>lakua | Gours (de arriba<br>/ goikoa) | Cruce de galería /<br>Galerien elkargunea |
|---|------------|-------------------------|-------------------------------|---|
| Temp. agua / Uraren tenp (°C)                                     | 8,9        | 9                       | 9                             | 9,2                                       |
| Temp. aire / Airearen tenp (°C)                                   | 8,9        | 9,3                     | 9,1                           | 8,9                                       |
| Conductividad / Eroankortasuna (µS/cm.) (20 °C)                   | 307        | 294                     | 331                           | 286                                       |
| pH  | 8,0        | 8,0                     | 8,1                           | 8,1                                       |
| TDS (ppm)   | 145        | 180                     | 202                           | 76,8                                      |
| Oxígeno disuelto / Oxigeno disolbatua (mg/l)                      | 8,2        | 5,6                     | 9                             | 10  |
| CO <sub>2</sub> agua / Uraren CO <sub>2</sub> (mg/l)              | 7,0        | 9,0                     | 6,5                           | 7,0                                       |
| Turbidez / Uhartasuna (UNF)                                       | 0,4        | 0,5                     | <0,3                          | 0,9                                       |
| Hierro / Burdina (µg/l)   | <70        | <70                     | 103                           | 77  |
| Nitratos / Nitratoak (mg/l)                                       | 2,9        | 10,1                    | 10,2                          | 8,6                                       |
| Calcio / Kaltzioa (mg/l)  | 64,7       | 62,7                    | 74,9                          | 59,6                                      |
| Magnesio / Magnesioa (mg/l)                                       | 1,3        | 1,2                     | 1,3                           | 1,2                                       |
| Sulfatos / Sulfatoak (mg/l)                                       | 7          | 6                       | 5                             | 6   |
| Cloruros / Kloruroak (mg/l)                                       | 6          | 4                       | 4                             | 4   |
| Sodio / Sodioa (mg/l)   | 2,7        | 2,0                     | 2,3                           | 2,4                                       |
| Dureza total / Guztizko gogortasuna (mg/l CaCO <sub>3</sub> )     | 167        | 162                     | 192                           | 154                                       |
| Potasio / Potasioa (mg /l)  | 0,4        | 0,2                     | <0,2                          | 0,2                                       |
| Alcalinidad / Alkalinitatea (mg/l HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) | 201,0      | 189,0                   | 217,0                         | 181,0                                     |
| Fluoruros / Fluoruroak (mg/l)                                     | 0,05       | 0,08                    | 0,05                          | 0,06                                      |

presio partzialaren (Pco2) balioak ezagutzeko. AQUACHEM eta PHREEQC (2. bertsioa) programak erabili dira.

## Kontsiderazio orokorrak.

Urek, haitzetik igarotzean, solidoekin elkarreragiten dute, eta masa eta energia trukatzeko dira bi sistemen artean. Gatzen kontzentrazioa baldintza fisiko eta kimikoen arabera izango da, uraren baldintzena ez ezik, baita masa gaseosoaren eta haitzaren baldintzen arabera ere.

Karst-en oreka kimikoa honela deskribatzen da:



Ekuazioan ikus daitekeenez, haitza, ura eta CO<sub>2</sub> ezinbestekoak

dira erreakzioa gerta dadin. Aitzitik, CO<sub>2</sub>ren presio partzialak, karstogenesia bultzatzeaz gain, prozesuaren norabidea erabakitzen duen funtsezko faktorea da.

Disoluzio batean, CO<sub>2</sub> gehitzean, azido karbonikoa eratzen laguntzen du, uraren pH murriztuz eta haitzarentzat erasokorrago eginez. Oreka ekuazioaren eskuinalderantz mugitzen da, eta haitzaren disoluzioa eragiten du.



Disoluziotik gasa ateratzean, bikarbonatoa karbonatoan eta CO<sub>2</sub>n deskonposatzen da, eta kaltzaren deposizio prozesua gertatzen da.

Oreka horietako bakoitza uraren zikloaren hainbat etapatan gertatuko da. Karst-aren garapenari dagokionez, ura euri gisa erort-

# 4

## Hidroquímica e hidromicrobiología

Muestreo / Laginketa: 21-01-2007

| Parámetros físico-químicos /<br>Parametro fisiko-kimikoak | Herensugea | Lago Laminosin<br>lakua | Gours (de arriba /<br>goikoa) | Cruce de galería /<br>Galerien elkargunea | Toma de río exterior<br>Kanpoko Errekako<br>Hartunea |
|---|------------|-------------------------|-------------------------------|---|--|
| Temp. agua (°C) / Uraren tenperatura (°C)                 | 8,6        | 8,6                     | 8,7                           | 8,1                                       | 9,6  |
| Temp. aire (°C) / Airearen temp. (°C)                     | 8,5        | 8,6                     | 8,6                           | 8,3                                       | 10,5   |
| Conductividad / Eroankortasuna (µS/cm.) (20 °C)           | 297        | 242                     | 290                           | 183                                       | 271  |
| pH  | 8,0        | 8,3                     | 8,2                           | 8,4                                       | 8,3  |
| TDS (ppm)   | 187        | 160                     | 161                           | 172                                       | 171  |
| Turbidez / Uhartasuna (UNF)                               | <0,3       | 0,6                     | <0,3                          | <0,3                                      | 0,8  |
| Oxidabilidad / Oxidakortasuna (O <sub>2</sub> ) (mg/l)    | 0,4        | 0,6                     | 0,8                           | 0,6                                       | 0,8  |
| Carbono Orgánico Total / Karbono Organikoa (mg/l)         | <1,2       | 1,3                     | 1,5                           | 1,4                                       | <1,2   |
| Amonio (mg/l)   | <0,10      | <0,10                   | <0,10                         | <0,10                                     | <0,10  |
| Oxígeno disuelto / Oxigeno disolbatua (mg/l)              | 9          | 9,7                     | 4,4                           | 8,5                                       | -  |
| CO <sub>2</sub> agua / Uraren CO <sub>2</sub>             | 2,5        | 3,0                     | 2,0                           | 3,0                                       | 5,5  |
| Hierro / Burdina (µg/l)                                   | <70        | <70                     | <70                           | <70                                       | 110  |
| Manganeso / Manganesoa (µg/l)                             | <2         | <2                      | <2                            | <2  | 4  |
| Nitritos / Nitritoak (mg/l)                               | <0,02      | <0,02                   | <0,02                         | <0,02                                     | <0,02  |
| Nitratos / Nitritoak (mg/l)                               | 2,4        | 10,0                    | 14,0                          | 11,5                                      | 5,2  |
| Fluoruros / Fluoruroak (mg/l)                             | 0,11       | <0,04                   | <0,04                         | 0,05                                      | 0,07   |
| Boro / Boroa (mg/l)                                       | <0,3       | <0,3                    | <0,3                          | <0,3                                      | <0,3   |
| Calcio / Kaltzioa (mg/l)                                  | 69,4       | 58,8                    | 67,8                          | 65,8                                      | 48,2   |
| Magnesio / Magnesioa (mg/l)                               | 1,4        | 1,2                     | 1,3                           | 1,2                                       | 3,6  |
| Sulfatos / Sulfatoak (mg/l)                               | 7          | 5                       | 6                             | 7   | 16   |
| Cloruros / Kloruroak (mg/l)                               | 6          | 4                       | 4                             | 4   | 7  |
| Sodio / Sodioa (mg/l)                                     | 3,3        | 2,5                     | 2,8                           | 3,0                                       | 4,5  |
| Aluminio / Aluminioa (µg/l)                               | <30        | <30                     | <30                           | <30                                       | 40   |
| Dureza total/ Guztizko gogort. (mg/l CaCO <sub>3</sub> )  | 179        | 151                     | 174                           | 169                                       | 135  |
| Selenio / Selenioa (µg/l)                                 | <1         | <1                      | <1                            | <1  | <1   |
| 66   Antimonio / Antimonioa (µg/l)                        | 3          | 2                       | 2                             | <1  | <1   |
| Arsénico / Arsenikoa (µg/l)                               | <1         | <1                      | <1                            | <1  | <1   |
| Mercurio / Merkurioa (µg/l)                               | <0,2       | <0,2                    | <0,2                          | <0,2                                      | <0,2   |
| Cobre / Kobrea (mg/l)                                     | <0,05      | <0,05                   | <0,05                         | <0,05                                     | <0,05  |
| Cromo / Kromoa (µg/l)                                     | <5         | <5                      | <5                            | <5  | <5   |
| Cadmio / Kadmioa (µg/l)                                   | <0,5       | <0,5                    | <0,5                          | <0,5                                      | <0,5   |
| Plomo / Beruna (µg/l)                                     | <2         | <2                      | <2                            | <2  | <2   |
| Níquel / Nikela (µg/l)                                    | <5         | <5                      | <5                            | <5  | <5   |
| Potasio / Potasioa (mg/l)                                 | -          | -                       | -                             | -   | -  |
| MICROBIOLOGÍA / MIKROBIOLOGIA                             |            |                         |                               |   |  |
| Bacterias heterótrofas / heterotrofoak 22°C (ufc/ml)      | >1000      | 710                     | >1000                         | 950                                       | >1000  |
| Coliformes totales / Guztizko koliformeak (ufc/100 ml)    | 3          | 2                       | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  | >100   |
| Escherichia coli (ufc/100 ml)                             | AUSENCIA   | AUSENCIA                | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  | >100   |
| Enterococos / Enterokokoak (ufc/100 ml)                   | AUSENCIA   | AUSENCIA                | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  | 38   |
| Clostridium perfringens (ufc/100 ml)                      | AUSENCIA   | AUSENCIA                | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  | 54   |

## Muestreo / Laginketa: 16-04-2007

| Parámetros físico-químicos /<br>Parametro fisiko-kimikoak | Herensugea<br>*(goteo) | Lago Laminosin<br>lakua | Gours (de arriba /<br>goikoa) *(goteo) | Cruce de galería /<br>Galerien elkargunea |
|---|------------------------|-------------------------|--|---|
| Temp. agua (°C) / Uraren temperatura (°C)                 | 8,4                    | 8,6                     | 8,6                                    | 8,0                                       |
| Temp. aire (°C) / Airearen tenp. (°C)                     | 8,4                    | 8,6                     | 8,6                                    | 8,1                                       |
| Conductividad / Eroankortasuna (µS/cm.) (20 °C)           | 380                    | 272                     | 283                                    | 251                                       |
| pH  | 8,3                    | 8,3                     | 8,4                                    | 8,3                                       |
| TDS (ppm)   | 214                    | 164                     | 169                                    | 162                                       |
| Turbidez / Uhertasuna (UNF)                               | <0,3                   | 0,4                     | 0,4                                    | 0,4                                       |
| Oxidabilidad / Oxidakortasuna (O <sub>2</sub> ) (mg/l)    | 0,6                    | 0,6                     | 0,6                                    | 0,6                                       |
| Carbono Orgánico Total / Karbono Organikoa (mg/l)         | 1,2                    | <1,2                    | 1,2                                    | 1,2                                       |
| Amonio (mg/l)   | <0,10                  | <0,10                   | <0,10                                  | <0,10                                     |
| Oxígeno disuelto / Oxigeno disolbatua (mg/l)              | 9,7                    | 9,1                     | 7,8                                    | 8,8                                       |
| CO <sub>2</sub> agua / Uraren CO <sub>2</sub>             | 2,5                    | 2,5                     | 1,0                                    | 1,5                                       |
| Hierro / Burdina (µg/l)                                   | <100                   | <100                    | <100                                   | <100                                      |
| Manganeso / Manganesoa (µg/l)                             | 2                      | <2                      | <2                                     | <2  |
| Nitritos / Nitritoak (mg/l)                               | <0,02                  | <0,02                   | <0,02                                  | <0,02                                     |
| Nitratos / Nitratoak (mg/l)                               | 2,5                    | 7,4                     | 3,7                                    | 6,0                                       |
| Fluoruros / Fluoruroak (mg/l)                             | 0,05                   | 0,05                    | 0,12                                   | 0,05                                      |
| Boro / Boroa (mg/l)                                       | <0,3                   | <0,3                    | <0,3                                   | <0,3                                      |
| Calcio / Kaltzioa (mg/l)                                  | 79,5                   | 54,2                    | 52,4                                   | 53,2                                      |
| Magnesio / Magnesioa (mg/l)                               | 1,0                    | 0,9                     | 0,9                                    | 0,9                                       |
| Sulfatos / Sulfatoak (mg/l)                               | 6                      | 5                       | 5                                      | 5   |
| Cloruros / Kloruroak (mg/l)                               | 4                      | 5                       | 4                                      | 4   |
| Sodio / Sodioa (mg/l)                                     | 2,9                    | 2,2                     | 2,6                                    | 2,2                                       |
| Aluminio / Aluminioa (µg/l)                               | <30                    | <30                     | <30                                    | <30                                       |
| Dureza total/ Guztizko gogort. (mg/l CaCO <sub>3</sub> )  | 203                    | 139                     | 135                                    | 136                                       |
| Selenio / Selenioa (µg/l)                                 | <1                     | <1                      | <1                                     | <1  |
| Antimonio / Antimonioa (µg/l)                             | <1                     | <1                      | <1                                     | <1  |
| Arsénico / Arsenikoa (µg/l)                               | <1                     | <1                      | <1                                     | <1  |
| Mercurio / Merkurioa (µg/l)                               | <0,2                   | <0,2                    | <0,2                                   | <0,2                                      |
| Cobre / Kobrea (mg/l)                                     | <0,05                  | <0,05                   | <0,05                                  | <0,05                                     |
| Cromo / Kromoa (µg/l)                                     | <1                     | <1                      | <1                                     | <1  |
| Cadmio / Kadmioa (µg/l)                                   | <0,2                   | <0,2                    | <0,2                                   | <0,2                                      |
| Plomo / Beruna (µg/l)                                     | <2                     | <2                      | <2                                     | <2  |
| Níquel / Nikela (µg/l)                                    | <2                     | <2                      | <2                                     | <2  |
| Potasio / Potasioa (mg/l)                                 | 0,4                    | 0,2                     | 0,2                                    | 0,2                                       |
| MICROBIOLOGÍA / MIKROBIOLOGIA                             |                        |                         |  |   |
| Bacterias heterótrofas / heterotrofoak 22°C (ufc/ml)      | 410                    | 880                     | 140                                    | 7000                                      |
| Coliformes totales / Guztizko koliformeak (ufc/100 ml)    | 17                     | 13                      | 6                                      | 32  |
| Escherichia coli (ufc/100 ml)                             | AUSENCIA               | AUSENCIA                | AUSENCIA                               | AUSENCIA                                  |
| Enterococos / Enterokokoak (ufc/100 ml)                   | AUSENCIA               | 1                       | AUSENCIA                               | AUSENCIA                                  |
| Clostridium perfringens (ufc/100 ml)                      | AUSENCIA               | AUSENCIA                | AUSENCIA                               | AUSENCIA                                  |

\* Goteos (Volumen recogido en 1 hora: 1 l)

\* Tanta jarioak (ordubeteen jasotako bolumena: 1 l)



## 4

## Hidroquímica e hidromicrobiología

Muestreo / Laginketa: 04-06-2007

| Parámetros físico-químicos /<br>Parametro fisiko-kimikoak | Herensugea<br>*(goteo) | Lago Laminosin<br>lakua | Gours (de arriba /<br>goikoa) *(goteo) | Cruce de galería /<br>Galerien elkargunea |
|---|------------------------|-------------------------|--|---|
| Temp. agua (°C) / Uraren temperatura (°C)                 | 8,3                    | 8,4                     | 8,4                                    | 8,0                                       |
| Temp aire (°C) / Airearen tenp. (°C)                      | 8,6                    | 8,8                     | 8,8                                    | 8,5                                       |
| Conductividad / Eroankortasuna (µS/cm.) (20 °C)           | 430                    | 266                     | 350                                    | 261                                       |
| pH  | 8,2                    | 8,3                     | 8,3                                    | 8,3                                       |
| TDS (ppm)   | 466                    | 348                     | 507                                    | 392                                       |
| Turbidez / Uheretasuna (UNF)                              | <0,3                   | 0,7                     | 0,4                                    | 0,4                                       |
| Oxidabilidad / Oxidakortasuna (O <sub>2</sub> ) (mg/l)    | 0,4                    | 0,6                     | 0,5                                    | 0,6                                       |
| Carbono Orgánico Total / Karbono Organikoa (mg/l)         | <1,2                   | 1,5                     | 1,5                                    | 1,6                                       |
| Amonio (mg/l)   | <0,10                  | <0,10                   | <0,10                                  | <0,10                                     |
| Oxígeno disuelto / Oxigeno disolbatua (mg/l)              | 11                     | 11                      | 11                                     | 11,2                                      |
| CO <sub>2</sub> agua / Uraren CO <sub>2</sub>             | 2,5                    | 3,0                     | 3,0                                    | 3,0                                       |
| Hierro / Burdina (µg/l)                                   | <100                   | <100                    | <100                                   | <100                                      |
| Manganeso / Manganesoa (µg/l)                             | <2                     | <2                      | <2                                     | <2  |
| Nitritos / Nitritoak (mg/l)                               | <0,02                  | <0,02                   | <0,02                                  | <0,02                                     |
| Nitratos / Nitratoak (mg/l)                               | 1,5                    | 6,9                     | 4,3                                    | 5,7                                       |
| Fluoruros / Fluoruroak (mg/l)                             | 0,06                   | 0,04                    | 0,07                                   | 0,06                                      |
| Boro / Boroa (mg/l)                                       | <0,3                   | <0,3                    | <0,3                                   | <0,3                                      |
| Calcio / Kaltzioa (mg/l)                                  | 90,5                   | 52,8                    | 77,8                                   | 53,8                                      |
| Magnesio / Magnesioa (mg/l)                               | 1,2                    | 1,0                     | 1,2                                    | 0,9                                       |
| Sulfatos / Sulfatoak (mg/l)                               | 5                      | 4                       | 4                                      | 4   |
| Cloruros / Kloruroak (mg/l)                               | 3                      | 3                       | 2                                      | 2   |
| Sodio / Sodioa (mg/l)                                     | 2,9                    | 2,1                     | 2,6                                    | 2,4                                       |
| Aluminio / Aluminioa (µg/l)                               | <30                    | <30                     | <30                                    | <30                                       |
| Dureza total/ Guztizko gogort. (mg/l CaCO <sub>3</sub> )  | 231                    | 136                     | 199                                    | 138                                       |
| Selenio / Selenioa (µg/l)                                 | <1                     | <1                      | <1                                     | <1  |
| 68   Antimonio / Antimonioa (µg/l)                        | <1                     | <1                      | <1                                     | <1  |
| Arsénico / Arsenikoa (µg/l)                               | <1                     | <1                      | <1                                     | <1  |
| Mercurio / Merkurioa (µg/l)                               | <0,2                   | <0,2                    | <0,2                                   | <0,2                                      |
| Cobre / Kobrea (mg/l)                                     | <0,05                  | <0,05                   | <0,05                                  | <0,05                                     |
| Cromo / Kromoa (µg/l)                                     | <1                     | <1                      | <1                                     | <1  |
| Cadmio / Kadmioa (µg/l)                                   | <0,2                   | <0,2                    | <0,2                                   | <0,2                                      |
| Plomo / Beruna (µg/l)                                     | <2                     | <2                      | <2                                     | <2  |
| Níquel / Nikela (µg/l)                                    | <2                     | <2                      | <2                                     | <2  |
| Potasio / Potasioa (mg/l)                                 | 0,4                    | 0,2                     | 0,3                                    | 0,2                                       |
| MICROBIOLOGÍA / MIKROBIOLOGIA                             |                        |                         |  |   |
| Bacterias heterótrofas / heterotrofoak 22°C (ufc/ml)      | 13                     | 720                     | 7                                      | 230                                       |
| Coliformes totales / Guztizko koliformeak (ufc/100 ml)    | 3                      | 16                      | 9                                      | 52  |
| Escherichia coli (ufc/100 ml)                             | AUSENCIA               | AUSENCIA                | AUSENCIA                               | 1   |
| Enterococos / Enterokokoak (ufc/100 ml)                   | AUSENCIA               | 1                       | AUSENCIA                               | AUSENCIA                                  |
| Clostridium perfringens (ufc/100 ml)                      | AUSENCIA               | AUSENCIA                | AUSENCIA                               | 1   |

\* Goteos (Volumen recogido en 1/2 hora: 1 l)

\* Tanta jarioak (ordu erdian jasotako boluena: 1 l)

## Muestreo / Laginketa: 12-08-2008

| Parámetros físico-químicos /<br>Parametro fisiko-kimikoak | Herensugea | Lago Laminosin<br>lakua | Gours (de arriba /<br>goikoa) | Cruce de galería /<br>Galerien elkargunea |
|---|------------|-------------------------|-------------------------------|---|
| Temp. agua (°C) / Uraren temperatura (°C)                 | 8,8        | 8,8                     | 8,8                           | 8,7                                       |
| Temp aire / Airearen tenp. (°C)                           | 8,8        | 8,5                     | 8,5                           | 9,6                                       |
| Conductividad / Eroankortasuna (µS/cm.) (20 °C)           | 299        | 269                     | 285                           | 269                                       |
| pH  | 7,9        | 7,9                     | 8,0                           | 8,1                                       |
| TDS (ppm)   | -          | -                       | -                             | -   |
| Turbidez / Uhertasuna (UNF)                               | <0,3       | 1,0                     | 0,4                           | <0,3                                      |
| Oxidabilidad / Oxidakortasuna (O <sub>2</sub> ) (mg/l)    | 0,4        | 0,5                     | 0,5                           | 0,6                                       |
| Carbono Orgánico Total / Karbono Organikoa (mg/l)         | <1,2       | 1,3                     | 1,3                           | 1,5                                       |
| Amonio (mg/l)   | <0,10      | <0,10                   | <0,10                         | <0,10                                     |
| Oxígeno disuelto / Oxigeno disolbatua (mg/l)              | 11         | 11                      | 11                            | 11  |
| CO <sub>2</sub> agua / Uraren CO <sub>2</sub>             | 2,5        | 3,0                     | 3,0                           | 3,0                                       |
| Hierro / Burdina (µg/l)                                   | <70        | <70                     | <70                           | <70                                       |
| Manganeso / Manganesoa (µg/l)                             | <2         | 3                       | <2                            | <2  |
| Nitritos / Nitritoak (mg/l)                               | <0,02      | 4,1                     | <0,02                         | <0,02                                     |
| Nitratos / Nitratoak (mg/l)                               | 8,0        | 8,7                     | 3,2                           | 3,8                                       |
| Fluoruros / Fluoruroak (mg/l)                             | <0,04      | <0,04                   | 0,04                          | <0,04                                     |
| Boro / Boroa (mg/l)                                       | <0,3       | <0,3                    | <0,3                          | <0,3                                      |
| Calcio / Kaltzioa (mg/l)                                  | 63         | 1,0                     | 62                            | 51,6                                      |
| Magnesio / Magnesioa (mg/l)                               | 1,1        | 1,2                     | 1,0                           | 1,1                                       |
| Sulfatos / Sulfatoak (mg/l)                               | 5          | 4                       | 4                             | 4   |
| Cloruros / Kloruroak (mg/l)                               | 3          | 3                       | 2                             | 2   |
| Sodio / Sodioa (mg/l)                                     | 2,9        | 2,2                     | 2,3                           | 2,5                                       |
| Aluminio / Aluminioa (µg/l)                               | <30        | <30                     | <30                           | <30                                       |
| Dureza total/ Guztizko gogort. (mg/l CaCO <sub>3</sub> )  | 161        | 147                     | 160                           | 144                                       |
| Selenio / Selenioa (µg/l)                                 | <1         | <1                      | <1                            | <1  |
| Antimonio / Antimonioa (µg/l)                             | <1         | <1                      | <1                            | <1  |
| Arsénico / Arsenikoa (µg/l)                               | <1         | <1                      | <1                            | <1  |
| Mercurio / Merkurioa (µg/l)                               | <0,2       | <0,2                    | <0,2                          | <0,2                                      |
| Cobre / Kobrea (mg/l)                                     | <0,05      | <0,05                   | <0,05                         | <0,05                                     |
| Cromo / Kromoa (µg/l)                                     | <1         | <1                      | <1                            | <1  |
| Cadmio / Kadmioa (µg/l)                                   | <0,2       | 0,7                     | <0,2                          | <0,2                                      |
| Plomo / Beruna (µg/l)                                     | <2         | <2                      | <2                            | <2  |
| Níquel / Nikela (µg/l)                                    | <2         | <2                      | <2                            | <2  |
| MICROBIOLOGÍA / MIKROBIOLOGIA                             |            |                         |                               |   |
| Bacterias heterótrofas / heterotrofoak 22°C (ufc/ml)      | >1000      | >1000                   | >1000                         | 550                                       |
| Coliformes totales / Guztizko koliformeak (ufc/100 ml)    | >100       | AUSENCIA                | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  |
| Escherichia coli (ufc/100 ml)                             | >100       | AUSENCIA                | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  |
| Enterococos / Enterokokoak (ufc/100 ml)                   | AUSENCIA   | AUSENCIA                | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  |
| Clostridium perfringens (ufc/100 ml)                      | AUSENCIA   | AUSENCIA                | AUSENCIA                      | AUSENCIA                                  |

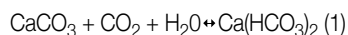
# 4

## Hidroquímica e hidromicrobiología

### Consideraciones generales

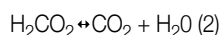
Las aguas, al pasar por la matriz rocosa, interactúan con los sólidos, intercambiando masa y energía entre ambos sistemas. La concentración de las sales dependerá de las condiciones físicas y químicas no solo de las aguas, también de la masa gaseosa y de la roca.

El equilibrio químico del karst se describe:



Como se aprecia en la ecuación, la roca, el agua y el  $\text{CO}_2$  son indispensables para que tenga lugar la reacción. En cambio, la presión parcial del  $\text{CO}_2$  no solo favorece la karstogénesis, es el factor fundamental que determina la dirección del proceso.

En una disolución, al agregar el  $\text{CO}_2$ , favorece la formación del ácido carbónico, reduciendo el pH del agua y haciéndola más agresiva a la roca. El equilibrio se desplaza hacia la derecha de la ecuación, provocando la disolución de la roca.



Al extraer el gas de la disolución, el bicarbonato se descompone en carbonato y  $\text{CO}_2$ , teniendo lugar el proceso de deposición de la calcita.

Cada uno de estos equilibrios va a ocurrir en diferentes etapas

del ciclo del agua. En interés del desarrollo del karst, comienza cuando el agua cae en forma de lluvia, o se deposita por condensación, adquiriendo la primera concentración de  $\text{CO}_2$ , a partir de la concentración de éste gas en la atmósfera.

En el suelo, las concentraciones del gas son más de 10 veces superiores que en la atmósfera, dependiendo del espesor y tipo de suelo, vegetación, desarrollo de la misma, pluviometría, explotación ganadera de la zona y tipo de ganado, entre otras.

En este recorrido, solo el equilibrio representado en la ecuación (2) ha tenido lugar. El proceso de ganancia de  $\text{CO}_2$  por el agua y su transformación en ácido carbónico ha favorecido el descenso del pH de la solución acuosa.

Al hacer contacto con la matriz rocosa y penetrar por las grietas, comienza, dependiendo de la velocidad de circulación, un nuevo intercambio de masa y energía entre el agua y la roca. En la ecuación (1) el equilibrio se desplaza hacia la derecha, comenzando un proceso de disolución, que favorece la ampliación de las fisuras y el transporte de carbonato de calcio en forma de bicarbonato hacia el interior del macizo.

El grado de saturación del agua respecto a la calcita, va a depender principalmente de su velocidad de circulación por el agrietamiento de la roca y el tiempo de contacto entre los sistemas líquido y sólido, pudiendo alcanzar o no un estado de equilibrio.

Al salir a la cueva vuelven a cambiar las características termodinámicas del sistema. Tienen lugar cambios de presiones,

zen denean edo kondentsazio bidez ezartzen denean hasten da;  $\text{CO}_2$ ren lehen kontzentrazioa gas hori eguratsean kontzentratuta lortzen da.

Lurrean, gasaren kontzentrazioak eguratsean baino 10 aldiz gehiago dira, luraren lodiera eta mota, landaredia, landareen garapena, plubiometria, zonako abere ustiapena eta ganadu motaren arabera, besteak beste.

Ibilbide horretan, (2) ekuazioan adierazitako oreka soilik gertatu da. Urak  $\text{CO}_2$  irabazteko eta hura azido karboniko bihurtzeko prozesuak ur disoluzioaren pHa jaistea ekarri du berekin.

Haitzarekin kontaktuan sartzean eta arrailetatik sartzean, uraren eta haitzaren artean masa eta energia truke berri bat hasten da, zirkulazioaren abiaduraren arabera. (1) ekuazioan, oreka eskuinerantz mugitzen da, eta disoluzio prozesu bat hasten da, arrailak zabaltzen eta kaltzio karbonatoa bikarbonato moduan

mendigunearen barnealderantz garraiatzen laguntzen duena.

Urak kaltzitarekiko duen saturazio maila haitzaren arrailetatik zirkulatzen duen abiaduraren arabera eta sistema likidoaren eta solidoaren arteko kontaktu denboraren arabera izango da nagusiki, eta oreka egoera lortu ahal izango du, edo ez.

Kobazulotik irtetean, sistemaren ezaugarri termodinamikoak aldatu egiten dira berriro. Presio aldagetak gertatzen dira, batez ere  $\text{CO}_2$ ren presio partzialean, eta ondoko oreka egoeretako bat gertatzen da:

- $P_{\text{CO}_2}$  airea  $> P_{\text{CO}_2}$  ura: ur sistemak  $\text{CO}_2$  irabazten du, eta oreka eskuinerantz mugitzen da ekuazioan (1).
- $P_{\text{CO}_2}$  airea  $< P_{\text{CO}_2}$  ura: ur sistemak  $\text{CO}_2$  lagatzen dio eguratsari, eta oreka ezkererantz mugitzen da, kaltzio karbonatoa (kaltzita edo aragonittoa) uzteko joeraz.

Ur elikadura estalaktita baten bitartez denean, inplikazio estetiko

principalmente en la presión parcial del CO<sub>2</sub>, dando lugar a uno de los siguientes estados de equilibrio:

- P<sub>CO<sub>2</sub></sub> aire > P<sub>CO<sub>2</sub></sub> agua: el sistema acuoso gana CO<sub>2</sub>, desplazándose el equilibrio hacia la derecha en la ecuación (1).
- P<sub>CO<sub>2</sub></sub> aire < P<sub>CO<sub>2</sub></sub> agua: el sistema acuoso cede CO<sub>2</sub> a la atmósfera, desplazándose el equilibrio hacia la izquierda, tendiendo a depositar carbonato de calcio (calcita o aragonito).

Cuando la alimentación de agua es a través de una estalactita va a tener una mayor implicación estética. Si tiene lugar el primer estado, es decir, el equilibrio se corre a la derecha, comienza un proceso de descalcificación o de redisolución, dependiendo si el agua circula por el exterior de la formación en el primer caso o por el conducto interior en el segundo, que hace perder el brillo y la forma cristalina de la superficie, dando un aspecto opaco y polvoriento.

En el segundo caso, es decir el desplazamiento del equilibrio hacia la izquierda, la formación gana en belleza y tamaño.

## Resultados y Conclusiones

La composición de las aguas en la cueva Mendukilo es predominantemente bicarbonatada cálcica (HCO<sub>3</sub>-Ca). El predominio de estas facies responde a la litología predominante en la zona, correspondiendo además a la composición mineralógica predominante en la cavidad (figura 2).

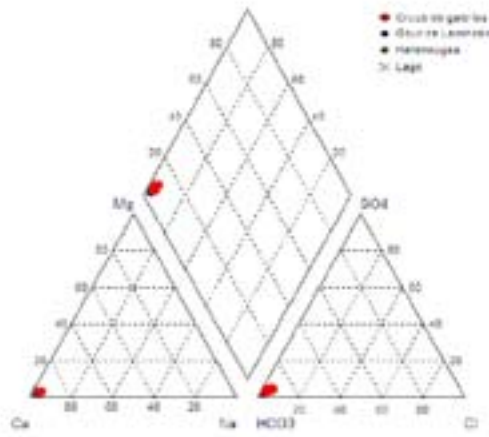


Figura 2. Diagrama de Piper. Todas las muestras clasifican como bicarbonatadas cálcicas.

2. irudia. Piper-en diagrama. Lagin guztiak bikarbonatu kaltzikotzat sailkatzen dira.

Las concentraciones de los iones son semejantes en las muestras, con ligeras variaciones, principalmente con el calcio y el bicarbonato, que presentan los mayores rangos, por ser los más afectados por el tiempo de residencia del agua en la matriz rocosa.

La ubicación de todos los puntos por encima de la curva, en el gráfico que relaciona la conductividad y pH, muestran un agua saturada, con cierto tiempo de contacto con la roca y es característico en las aguas de goteo que permanecen durante cierto tiempo en gours. Todos los puntos muestran un agua saturada, tanto las muestras de goteo como las que no son de goteo (figura 3).

handiagoa izango du. Lehen egoera gertatzen bada, hau da, oreka eskuinerantz mugitzen bada, deskalfifikatze edo berdisoluzio prozesu bat hasten da, lehen kasuan ura egituraren kanpoaldetik ibiltzearen edo bigarren kasuan barne bidetik ibiltzearen arabera. Horrek gainazalari distira eta forma kristalinoa galarazten dizkio, eta itxura opakua eta hautseztatua ematen dio. Bigarren kasuan, hau da, oreka ezkererantz mugitzen denean, egitura edertu eta handitu egiten da.

### Emaitzak eta ondorioak

Mendukiloko kobazuloko uren konposizioa bikarbonatu kaltzikoa (HCO<sub>3</sub>-Ca) da nagusiki. Fazies horiek gailentzea zonan nagusi den litologiaren arabera da eta, gainera, leizean nagusi den konposizio mineralogikoari dagokio (2 irudia). Ioin kontzentrazioak antzekoak dira laginetan, aldaera txikiekin,

batez ere hein handienak dituzten kaltzioa eta bikarbonatoarekin, urak haitzean daraman denboraren eragin handiena jasotzen baitute.

Puntu guztiak kurbaren gaineratik kokatzeak eroankortasuna eta pH-a erlazionatzen dituen grafikoan, ur saturatua erakusten du, haitzarekiko kontaktuan nolabaiteko denbora daramana, eta gours-etan denbora batez egoten diren tanta jarioetako uren bereizgarria da hori. Puntu guztiek ur saturatua erakusten dute, bai tanta jarioetako laginek, bai tanta jarioetakoak ez direnek (3 irudia).

Eroankortasun elektrikoaren eta kaltzio (Ca) eta bikarbonato (HCO<sub>3</sub>) ioien artean dagoen koerlazio handiak, disoluzioan horiek nagusi direla baieztatzen du (2 taula).

Gainerako makroosagaien kontzentrazio baxuek euri uretatik jasotako konposizioa adierazten dutela dirudi, lurraren oso eragin txikiarekin.

# 4

## Hidroquímica e hidromicrobiología

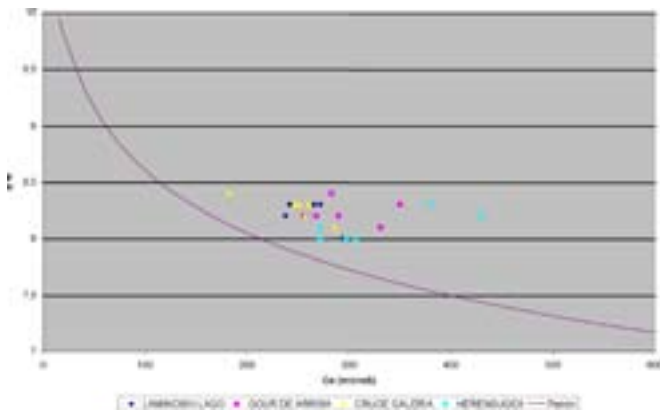


Figura 3. Relación de la conductividad eléctrica y el pH en las aguas muestreadas en la cueva Mendukilo.

3. irudia. Eroankortasun elektrikoaren eta pH-ren arteko erlazioa, Mendukiloko leizeko laginetako uretan.

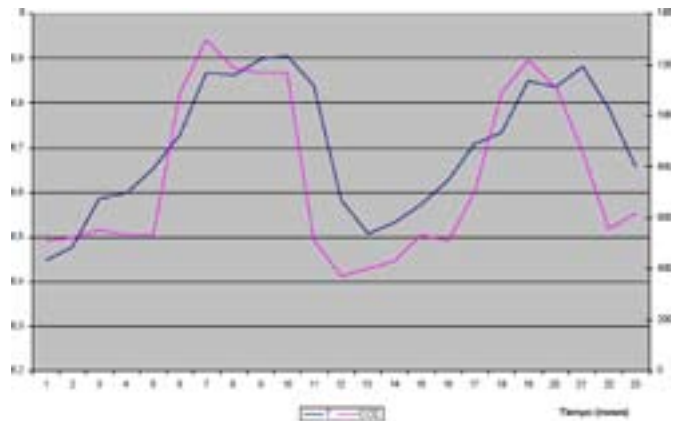


Figura 4. Comportamiento de los promedios mensuales de la temperatura del aire y de la concentración de CO<sub>2</sub> en el sector Laminosin.

4. irudia. Airearen tenperaturaren eta CO<sub>2</sub>ren kontzentrazioaren hileroko batez bestekoen jokabidea, Laminosingo sektorean.

|                     | Ce    | Cl     | CO <sub>2</sub> dis | HCO <sub>3</sub> | Mg    | Na     | O <sub>2</sub> dis | pH     | SO <sub>4</sub> | T agua<br>ura | T aire<br>ura |
|---------------------|-------|--------|---------------------|------------------|-------|--------|--------------------|--------|-----------------|---------------|---------------|
| Ca                  | 0,794 | 0,069  | 0,110               | 0,823            | 0,558 | 0,505  | -0,079             | -0,086 | 0,170           | 0,175         | 0,249         |
| Ce                  | 1,000 | -0,015 | 0,114               | 0,737            | 0,269 | 0,281  | 0,086              | -0,218 | -0,018          | 0,216         | 0,293         |
| Cl                  |       | 1,000  | 0,198               | 0,087            | 0,470 | 0,450  | -0,277             | -0,436 | 0,753           | 0,211         | -0,028        |
| CO <sub>2</sub> dis |       |        | 1,000               | 0,483            | 0,360 | -0,249 | -0,187             | -0,636 | 0,308           | 0,551         | 0,717         |
| HCO <sub>3</sub>    |       |        |                     | 1,000            | 0,486 | 0,251  | -0,122             | -0,343 | 0,314           | 0,448         | 0,525         |
| Mg                  |       |        |                     |                  | 1,000 | 0,600  | -0,202             | -0,568 | 0,588           | 0,242         | 0,169         |
| Na                  |       |        |                     |                  |       | 1,000  | 0,077              | -0,142 | 0,572           | -0,227        | -0,413        |
| O <sub>2</sub> dis  |       |        |                     |                  |       |        | 1,000              | 0,154  | -0,295          | -0,351        | -0,298        |
| pH                  |       |        |                     |                  |       |        |                    | 1,000  | -0,397          | -0,377        | -0,277        |
| SO <sub>4</sub>     |       |        |                     |                  |       |        |                    |        | 1,000           | 0,104         | -0,038        |
| T agua              |       |        |                     |                  |       |        |                    |        |                 | 1,000         | 0,662         |

Tabla 2. Matriz de correlación entre las diferentes variables físicas y químicas medidas en la cueva Mendukilo.  
2. taula. Koerlazio matrizea Mendukiloko leizean neurtutako hainbat aldagai fisiko eta kimikoen artean.

Laminosingo sektorean, tenperaturaren eta CO<sub>2</sub>ren kontzentrazioaren hileroko batez bestekoen kurbek erlazio estua dute, eta eskualdekoaldi beroekin eta hotzekin erlazio garbia dute. CO<sub>2</sub>ren erregimena kobazuloko bisitarien kopuruaren arabera da, baina, lehenago aipatu denez ingurumen azterlanean, ez dirudi airearen tenperaturak eragin handirik izan duenik horregatik.

Ur sistemak gas sistemarekin duen zuzeneko kontaktuak bien arteko masa eta energia trukea bultzatuko du, eta CO<sub>2</sub> disolbatuaren eta airearen tenperaturaren arteko koerlazio handia ikus daiteke (0,72 balioko zuzeneko koerlazioa).

Bestalde, uretan disolbatutako CO<sub>2</sub> gehitzeak azido karbonikoa (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) eratzea bultzatzen du, hortaz, parametro horren aldakuntzek zuzeneko eragina izango dute pH-ren jokabidean (-0,64 balioko alderantzizko koerlazioa).

pH-ren jokabidearen eta bikarbonatoen (HCO<sub>3</sub>) koerlazio baxuak

adierazten duenez, airean lortutako CO<sub>2</sub>ren kontzentrazioak handiak badira ere, ez du eraginik izan kobazuloko prozesu hidrokimikoen jokabidean. Gour-etan hartutako uren emaitzetan ikus daitekeenez, laginketa puntu guztietan eta data guztietan, saturazio maila batekin mantentzen dira makroosagai nagusiei dagokienez: Ca eta HCO<sub>3</sub>.

pHren balioen jokabideak, 7,9tik gorakoak betiere (7,9tik 8,4ra bitartekoak dira), ur zertxobait basikoa adierazten du, bisiten erregimenarekin eta eguratseko CO<sub>2</sub>ren kontzentrazioaren jokabidearekin zuzeneko erlazio gabekoa (5 irudia).

Aztertutako parametroen jokabidea ikusita, esan dezakegu Mendukiloko kobazuloan ezarritako bisita erregimenak ez duela eragin handirik uren konposizio kimikoan, antzeko jokabide orokorra duela laginketa lekuetan, eta jokabide horrek bere horretan mantentzeko joera duela sistemaren dinamika fisiko-

La elevada correlación existente entre la conductividad eléctrica y los iones calcio (Ca) y bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ), confirma el predominio de estos en la solución (tabla 2).

Las bajas concentraciones del resto de los macrocomponentes parecen indicar la composición predominante obtenida del agua de lluvia con muy poca influencia del suelo.

El comportamiento de las curvas de los promedios mensuales de temperatura y concentración de  $\text{CO}_2$ , en el sector Laminosin, mantienen una estrecha relación, con una clara relación con los periodos cálidos y fríos de la región. El régimen del  $\text{CO}_2$  está condicionado por el número de visitantes a la cueva, aunque, como se ha mencionado anteriormente, en el estudio medioambiental, la temperatura del aire no parece haber sufrido una influencia notable por ese concepto.

El contacto directo del sistema acuoso con el gaseoso va a favorecer el intercambio de masa y energía entre ambos, apreciándose una alta correlación entre el  $\text{CO}_2$  disuelto y la temperatura del aire (correlación directa con valor 0,72).

Por otro lado, el incremento de  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua favorece la formación de ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_2$ ), por lo que las variaciones de este parámetro tendrá una influencia directa en el comportamiento del pH (correlación inversa con valor -0,64).

La baja correlación del comportamiento del pH y la concentración de bicarbonatos ( $\text{HCO}_3$ ) indica que, a pesar de las altas concentraciones de  $\text{CO}_2$  alcanzadas por el aire, no ha tenido una influencia en el comportamiento de los procesos hidroquímicos en la cueva. Según se aprecia en los resultados en las aguas tomadas en los gour, que se mantienen, en todos los puntos de muestreo y todas las fechas, con un grado de saturación, respecto a los macrocomponentes principales presentes: Ca y  $\text{HCO}_2$ .

El comportamiento de los valores de pH, siempre superiores a 7,9 (oscilan entre 7,9 y 8,4), indica un agua ligeramente básica, sin una relación directa con el régimen de visitas ni el comportamiento de la concentración de  $\text{CO}_2$  atmosférico (figura 5).

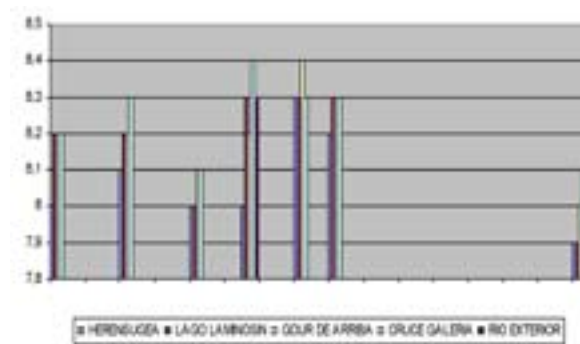


Figura 5. Comportamiento del pH en diferentes fechas.  
5. irudia. PH-ren jokabidea hainbat datatan.

kimikoak ezarritako prozesuetan. Aipagarria da Laminosin laginketa puntuko uretako azken laginketako (2008ko abuztua) Cd ioiaren neurketa puntuala, ez baitzen horren presentziarik detektatu aurreko laginketetan.

## Uraren mikrobiologia

Mendukiloko kobazuloan infiltratzen diren uren ezaugarri mikrobiologikoen azterketa egiteko, bost laginketa egin ziren kobazuloan (2006ko otsailean, 2007ko urtarril, apiril eta ekainean eta 2008ko abuztuan). Horretarako, lehen hautatutako lau laginketa puntuak aukeratu ziren, eta lehen bi ur laginak gour zonetan metatutako uretakoak ziren, eta azken biak tanta jarrietako uretakoak; 2008ko lagina berriz, tanta jarriatik ezean, metatutako uretatik jaso zen (XIX-a taula). Gainera, 2007ko urtarrilean, Mendukiloko kobazuloaren kanpoaldeko errekan ur lagin bat hartu

zen. Laginak pote esteriletan jaso ziren, eta 4 °C-tan mantendu ziren laborategira 12-14 orduz gehienez ere bidali aurretik, ondoren analisi mikrobiologikoa egiteko.

Analisi mikrobiologikoa eginda, bakterio heterotrofoak 22 °C-tan, guztizko bakterio koliformeak, *Escherichia coli*, *Enterokokoak* eta *Clostridium perfringens* aztertu ziren, uraren floraren eta bere balizko kutsaduraren adierazle diren parametro mikrobiologikoa zehazteko.

Jasotako balioetan oinarrituta, kanpoko erreka laginak kutsadura mikrobiologikoa adierazle gehien dituela ondorioztatu da, logikoa denez. Leize barruko urek kutsadura mikrobiologikoa txiki bat dute, kanpotik sartua ziur aski eta, kasu batzuetan, baita kobazuloan sartzen diren bisitariek ekarria ere. Hori da "Galerien elkargunea" edo "Herensugea" laginketa puntuaren kasua; lehena oso hurbilekoa eta sarbi-

# 4

## Hidroquímica e hidromicrobiología

Del comportamiento de los parámetros analizados se puede determinar que, el régimen de visitas implantado en el periodo en la cueva Mendukilo, no afecta en gran medida, a la composición química de las aguas, presentado un comportamiento general, similar en los sitios muestreados, y que ésta se tiende a mantener en los procesos establecidos por la dinámica físico-química del sistema. Como destacable, habría que indicar, la medida puntual del ion Cd en el agua del punto de muestreo Laminosin del último muestreo (agosto de 2008), del que no ha se había detectado su presencia en los muestreos anteriores.

### Microbiología del agua

Para el estudio de las características microbiológicas de las aguas que se infiltran en la cueva Mendukilo se realizaron cinco campañas de muestreo en la cavidad (en febrero de 2006, en enero, abril y junio de 2007, y agosto de 2008). Para ello, se escogieron los cuatro puntos de muestreo seleccionados previamente, siendo las dos primeras muestras procedentes de agua acumulada en zonas de gours y las dos últimas aguas procedentes de goteos, excepto la muestra de 2008 que debido a la inexistencia de goteos se cogió del agua acumulada (Tabla 1). Además en enero de 2007 se tomó una muestra de agua en el río exterior de la cueva de Mendukilo. Las muestras se recogieron en botes estériles, manteniéndose a 4°C hasta su envío a laboratorio en un plazo no superior a 12-14 horas para su posterior análisis microbiológico.

Se realizaron análisis microbiológicos en los que se determinaron bacterias heterótrofas a 22 °C, bacterias *coliformes totales*, *Escherichia coli*, *Enterococos* y *Clostridium perfringens*, con el fin de determinar parámetros microbiológicos indicadores de la flora del agua y de su posible contaminación.

A partir de los valores obtenidos, se determina que la muestra del río exterior es la muestra que resulta con más indicadores de contaminación microbiológica, como es lógico. Las aguas de dentro de la cueva presentan una pequeña contaminación microbiológica procedente, probablemente, del exterior, y, en algunos casos, también de los visitantes que entran a la cueva, como es el caso del punto de muestreo “Cruce de Galería” o “Herensugea”, muy cercano y accesible el primero para los visitantes en las que en varias ocasiones nos hemos encontrado pequeños objetos o restos de comida, por ejemplo, hecho que no ha ocurrido en los demás puntos de muestreo, al estar estos más alejados e inaccesibles de las visitas.

Por otro lado, la contaminación presente parece variar dependiendo de la época del año aunque también se ha visto que ha aumentado en el último muestreo. Esta contaminación parece estar relacionada con el aporte de agua infiltrada del exterior y de la contaminación que ésta pueda añadir, así como de la contaminación aportada, quizás, por las visitas. Es destacable este aumento de contaminación, de la que se debe hacerse un seguimiento, para comprobar esta posibilidad a lo largo del tiempo.

de errazekoa da bisitariarentzat, eta batzuetan objektu txikiak edo janari arrastoak aurkitu ditugu adibidez, eta ez da horrelakorik gertatu gainerako laginketa puntuetan, bisitariengandik urrutirago eta ezkutatuago daudenez.

Bestalde, badirudi kutsadura aldatu egiten dela urte sasoiaren arabera, baina azken laginketan handitu egin dela ere ikusi da. Dirudenez, kutsadura horrek kanpotik sartutako urarekin eta horrek gehi lezakeen kutsadurarekin dauka zerikusia, eta baita ere, beharbada, bisitek ekar lezaketenarekin. Aipagarria da kutsaduraren handitze hori, eta horren jarraipena egin behar da, denborarekin izan dezakeen eragina aztertzeko.

Ez da antzematen alde handirik tanta jarioetatik edo gours-etan geratutako uretatik datorren flora mikrobiologikoaren artean, baina oro har, bakterioen kopurua zertxobait txikia-

goa da tanta jarioetatik datozen uretan.

Aztertutako parametro mikrobiologikoetan jasotako balioak aztertuta, kutsadurak azken laginketan gora egin duela ondoriozta dezakegu eta, ziur aski, uretara objektuak edo materia organikoaren hondarrak botatzearen arabera aldatu egiten dela. Izan ere, hori agerikoa izan da laginak azken aldiz hartu diren datan, janari hondarrak (ogia...) eta hainbat objektu (goxokien estalkiak, pegatina arrastoak, jostailu txikien piezak...) aurkitu zirenez hainbat lekutan. Gainera, kutsadura infiltrazio urak kanpotik ekartzen duenaren araberrakoa ere bada

No se aprecia gran diferencia entre la flora microbiológica procedente de goteos o de agua estancada en gours,

aunque por lo general, la cantidad de bacterias es ligeramente menor en el agua procedente de los goteos.

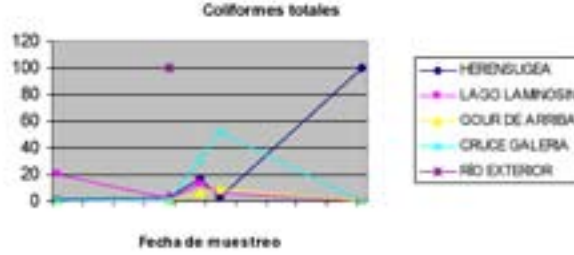
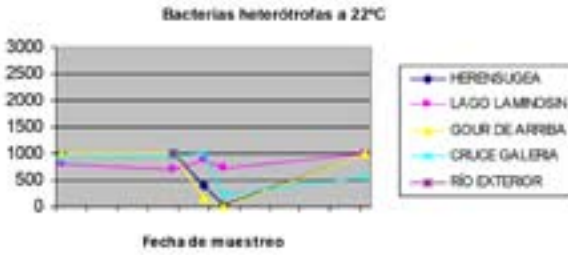


Figura 6-a. Relación de la fecha de muestreo y la concentración de bacterias heterótrofas a 22°C en las aguas muestreadas en la cueva Mendukilo.

Figura 6-b. Relación de la fecha de muestreo y la concentración de bacterias coliformes totales en las aguas muestreadas en la cueva Mendukilo.

6-a irudia Laginketa dataren eta bakterio heterotrofoen 22°C-ko kontzentrazioaren arteko erlazioa, Mendukiloko leizeko laginetako uretan.

6-b irudia Laginketa dataren eta guztizko bakterio koliformeen kontzentrazioaren arteko erlazioa, Mendukiloko leizeko laginetako uretan.

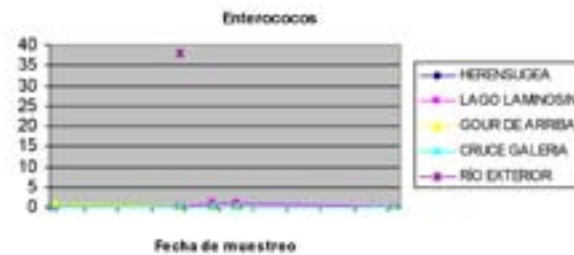
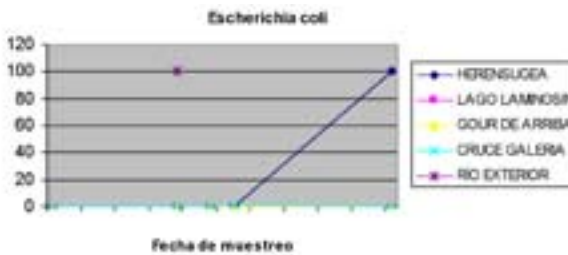


Figura 6-c. Relación de la fecha de muestreo y la concentración de bacterias Escherichia coli en las aguas muestreadas en la cueva Mendukilo.

Figura 6-d. Relación de la fecha de muestreo y la concentración de Enterococos en las aguas muestreadas en la cueva Mendukilo.

6-c irudia Laginketa dataren eta Escherichia coli bakterioen kontzentrazioaren arteko erlazioa, Mendukiloko leizeko laginetako uretan.

6-d irudia Laginketa dataren eta Enterokoko bakterioen kontzentrazioaren arteko erlazioa, Mendukiloko leizeko laginetako uretan.

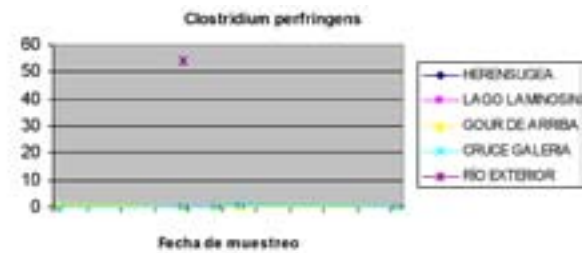


Figura 6-e. Relación de la fecha de muestreo y la concentración de Clostridium perfringens en las aguas muestreadas en la cueva Mendukilo.

6-e irudia Laginketa dataren eta Clostridium perfringens bakterioen kontzentrazioaren arteko erlazioa, Mendukiloko leizeko laginetako uretan.

Tras estudiar los valores obtenidos a partir de los parámetros microbiológicos analizados se puede determinar que ésta se ha incrementado en el último muestreo. Probablemente la contaminación varía en función del aporte de objetos o restos de materia orgánica al agua, visible en la fecha de la última toma de muestras, ya que, se

encontraron restos de comida (pan...) y objetos varios (envoltorios de caramelos, restos de pegatinas, piezas de pequeños juguetes...) en determinados puntos. Por otra parte la contaminación también depende del aporte externo del agua de infiltración.



# 4

## Hydroquímica e hidromicrobiología

### Bibliografía básica utilizada Erabilitako oinarritzko bibliografia

- Fagundo, J.R., Pajón, J.M., Valdés, J.J., Rodríguez, J.E. y Arellano, D.M. (1987). Naturaleza de los procesos de disolución de los minerales calcita, dolomita y yeso en aguas naturales del occidente de Cuba. *Voluntad Hidráulica*, 76: 30-42.

- John D. Hem. Study and interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water (Third Edition). (1989). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254. USGS Science for changing world. United States Government Printing Office.

- Jesús M. Pajón<sup>1</sup>, Juan R. Fagundo<sup>2</sup>. Análisis químico-físico de campo en hidroquímica del karst. 1Centro de Antropología. Departamento de Arqueología. Calzada de Buenos Aires No. 111, e/n Agua Dulce y Diana, Cerro, Ciudad de La Habana, Cuba. CP: 12600. 2Centro Nacional de Termalismo.

- Llamas, J. (1993). Hidrología General. Principios y Aplicaciones. Ed. Universidad del País Vasco (España).

- AquaChem (versión 3.7). (1997). Aqueous Geochemical Data Analysis and Plotting Waterloo Hydrogeologic.

- David L. Parkhurst and C.A.J. Appelo. User's guide to phreeqc (version 2). (1999). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. By Water-Resources Investigations Report 99-4259.

- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 111 (4): 9-25. Instituto Geológico GeoMinero (España). ISSN 0366-0176.

- Irazabal, N. & Varios. (2001). "El Karst de Pagasarri". Libro monográfico. Editado por Estudios Territoriales de la Diputación Foral de Bizkaia.

ISBN: 9788477522192

- Thorstenson, D.C. and Parkhurst, D.L. (2002). Calculation of individual isotope equilibrium constants for implementation in Investigations Report 02-4172, 129 pp.

- Facundo, J.R., González, P. (2005). Hidrogeoquímica. Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional (CENAMENT). Ministerio de Salud Pública. La Habana, Cuba.

- Irazabal, N. & Otero V. (2006). "Estudio hidroquímico de la Cueva de Pozalagua". *Revista Euryale* nº 1. pp-58-65. Bilbao. (ISSN: 1886-4309)

- Irazabal, N. (2008). "Aspectos hidroquímicos de las cuevas de la Isla de Pascua, Rapa Nui". *Revista Euryale* nº 2. pp-62-67. Bilbao. (ISSN: 1886-4309)

### Dedicado / Eskainia

"Las mañanas cambiaron su signo conocido. Ahora el agua, su tibieza, su magia soñolienta es diferente".

"¡Cómo me duele la tierra de las raíces sólo de recordarlo. No se si llueve o lloro". (Gioconda Belli)

Maitasunez, Asier, Aran, Iñakiri. Agian bihar ere argituko dau baina nire bihotzerako egunak ez dau distira bera izango.

