



**HAL**  
open science

# Accès à l'eau souterraine des populations vulnérables en zone aride : un problème de ressource, de gestion ou d'information ?

Elisabeth Lictevout

## ► To cite this version:

Elisabeth Lictevout. Accès à l'eau souterraine des populations vulnérables en zone aride : un problème de ressource, de gestion ou d'information ?. Hydrologie. Université Montpellier, 2018. Français. NNT : 2018MONTG059 . tel-02045888

**HAL Id: tel-02045888**

**<https://theses.hal.science/tel-02045888>**

Submitted on 22 Feb 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR  
DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER  
PAR LA VALIDATION DES ACQUIS DE L'EXPERIENCE**

**Année universitaire 2017-2018**

**En Sciences de l'Eau**

**École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau**

**Unité de recherche – Intitulé de l'Unité de recherche**

**SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE RECHERCHE**

**Présentée par Elisabeth LICTEVOUT**

**Le 20 décembre 2018**

**Référent : Christian LEDUC**

**Devant le jury composé de**

**Severin PISTRE, Professeur, HSM - UM, Montpellier**

**Christian Leduc, Directeur de Recherche IRD, UMR G-EAU-IRD, Montpellier**

**Catherine BERTRAND, Maître de conférences, UMR 6249-UFC, Besançon**

**Emilio CUSTODIO, Professeur Émérite, UPC, Barcelone**

**Elsa MARTIN, Maître de conférences, CESAER, Agrosup Dijon**

**Yves TRAVI, Professeur Émérite, UMR EMMAH – Avignon**

**Hervé Jourde, Professeur, HSM - UM Montpellier**

**Véronique Léonardi, Maître de conférences, HSM - UM Montpellier**

**Représentant École Doctorale, Président du jury**

**Référent**

**Rapporteur**

**Rapporteur**

**Examineur**

**Examineur**

**Examineur**

**Examineur**



**UNIVERSITÉ  
DE MONTPELLIER**

## Résumé

Les zones arides abritent 35% de la population mondiale et affichent parmi les plus hauts niveaux de pauvreté. La faible quantité et l'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations et des écoulements compliquent non seulement l'exploitation de la ressource mais aussi la compréhension de ces hydro-systèmes. Cependant, depuis les origines de l'histoire humaine, les populations ont su domestiquer l'eau des zones arides, tant superficielle, que souterraine. Mais les dernières décennies ont vu certaines zones arides devenir le théâtre du développement d'activités industrielles aux usages d'eau intensifs qui posent des problèmes de gestion et d'accès à l'eau des usagers, en particulier des populations vulnérables. Dans le nord du Chili, le Désert d'Atacama est l'une des zones les plus arides au monde. Depuis les années 90, avec l'installation de grands projets miniers, la région a connu une croissance démographique et économique constante. L'eau souterraine y est intensivement utilisée pour les activités minières, l'approvisionnement des populations et l'agriculture. Afin de comprendre si les problèmes d'accès à l'eau souterraine de l'aquifère Pampa del Tamarugal, région de Tarapacá, sont dus au fait que la ressource est limitée, que la gestion des eaux souterraines doit être améliorée, ou encore à un manque d'information scientifique sur cette ressource, une approche multi et interdisciplinaire a été mise en place. Cette approche est constituée de deux grandes parties : d'une part, la caractérisation des ressources en eau souterraines de l'aquifère Pampa del Tamarugal. Pour cela, les données brutes existantes et leurs conditions de production ont été analysées et un nouveau réseau hydrométrique a été conçu grâce à l'analyse multicritère couplée à une analyse SIG. Ensuite, la réalisation d'une carte piézométrique actualisée et la comparaison de cette carte avec les données piézométriques des dernières décennies ont permis de comprendre l'évolution de l'aquifère. L'étude géologique détaillée et l'analyse hydrochimique et isotopiques de sources et forages a permis de caractériser la recharge de l'aquifère, entre autres de définir le rôle prépondérant du substratum mésozoïque sur les écoulements notamment dans la couverture cénozoïque. Pour pallier au manque de données historiques, une approche complémentaire a été mise en place consistant en l'intégration des connaissances des populations locales indigènes pour l'élaboration du modèle hydrogéologique conceptuel. D'autre part, la gestion des ressources en eaux souterraines de l'aquifère Pampa del Tamarugal a été analysée, en s'attachant notamment à comprendre le rôle de l'information scientifique et technique et les stratégies et discours des acteurs sur cette gestion et sur les usages. Finalement, l'étude d'un système ancestral de gestion de l'eau a permis de générer l'information nécessaire à sa préservation en tant que patrimoine hydraulique de zone aride mais également à sa réutilisation pour la gestion actuelle de l'aquifère. Ces travaux de recherche ont permis d'améliorer la compréhension des mécanismes de recharge, ainsi que des écoulements et de l'évolution de la ressource en eaux souterraines sous pression anthropique dans une zone aride et montagneuse telle que le nord du Chili. Ils ont aussi permis de préciser les contraintes limitant l'accès à l'eau des populations vulnérables dans la zone d'étude, et le rôle de l'information scientifique dans la gestion de la ressource en eaux souterraines.

## Abstract

Drylands are home to 35% of the world's population and have among the highest levels of poverty. The small quantity and spatio-temporal heterogeneity of rainfall and runoff complicate not only the exploitation of the resource but also the understanding of those hydro-systems. However, since the origins of human history, in arid areas, people have been able to domesticate both surface and ground water the water. But the last decades have seen some arid areas become the scene of the development of industrial activities with intensive water uses that pose problems of management and access to water for users, particularly vulnerable populations. In the north of Chile, the Atacama Desert is one of the most arid areas of the world. Since the 1990s, with the installation of major mining projects, the region has experienced constant demographic and economic growth. Groundwater is extensively used for mining, domestic supply and agriculture. In order to understand if the problems of access to the groundwater of the Pampa del Tamarugal aquifer, in the Tarapacá region, are due to a limited resource, management issues, or to a lack of scientific information, a multi-disciplinary and interdisciplinary approach has been put in place. This approach consists of two main parts: first, the characterization of the groundwater resources of the Pampa del Tamarugal aquifer. For this, the existing raw data and their production conditions have been analysed and a new hydrometric network has been designed with a multi-criteria analysis coupled with a GIS analysis. Then, the realization of an updated piezometric map and the comparison of this map with the piezometric data of the last decades allow to understand the evolution of the aquifer. Based on a detailed geological study and hydrochemical and isotopic analysis of sources and boreholes, the recharge of the aquifer has been characterized with the preponderant role of the Mesozoic substratum on the flows especially in the Cenozoic cover. To compensate for the lack of historical data, a complementary approach has been put in place consisting of integrating the local and indigenous knowledge for the development of the conceptual hydrogeological model. On the other hand, the management of the groundwater resources of the Pampa del Tamarugal aquifer was analyzed, with particular attention to understanding the role of scientific and technical information and the strategies and discourses of the actors on this management and on uses. Finally, the study of an ancient water management system has generated the information necessary for its preservation as a water heritage an arid zone but also in order to reuse this system for the current management of the aquifer. This research has improved the understanding of the Pampa del Tamarugal recharge mechanisms, as well as the flow and evolution of groundwater resources under anthropogenic pressure in an arid and mountainous area such as northern Chile. They also clarified the constraints limiting access to water for vulnerable populations in the study area, and the role of scientific information in the management of groundwater resources.



## Resumen

Las zonas áridas albergan 35% de la población mundial y tienen entre los niveles más altos de pobreza. La pequeña cantidad y la heterogeneidad espacio-temporal de las precipitaciones y de la escorrentía complican no solo la explotación del recurso sino también la comprensión de estos sistemas hidrológicos e hidrogeológicos. Sin embargo, desde los orígenes de la historia de la humanidad, las personas han podido domesticar el agua de las zonas áridas, tanto superficiales como subterráneas. Pero en las últimas décadas, algunas zonas áridas se han convertido en el escenario del desarrollo de actividades industriales con usos intensivos del agua que plantean problemas de gestión y acceso al agua para los usuarios, especialmente las poblaciones vulnerables. En el norte de Chile, el desierto de Atacama es uno de los más áridos del mundo. Desde la década de 1990, con la instalación de importantes proyectos mineros, la región ha experimentado un crecimiento demográfico y económico constante. El agua subterránea se utiliza para la minería, el suministro de agua potable y la agricultura. Para comprender si los problemas de acceso al agua subterránea del acuífero de Pampa del Tamarugal, en la región de Tarapacá, se deben al hecho de que el recurso es limitado, o a problemas de gestión o a una falta de información científica sobre este recurso, se ha implementado un enfoque multidisciplinario e interdisciplinario. Este enfoque consta de dos partes principales: primero, la caracterización de los recursos hídricos subterráneos del acuífero de la Pampa del Tamarugal. Para ello, se han analizado los datos brutos existentes y sus condiciones de producción y se diseñó una nueva red hidrométrica utilizando análisis de criterios múltiples junto con un análisis SIG. Luego, la realización de un mapa piezométrico actualizado y la comparación de este mapa con los datos piezométricos de las últimas décadas permitieron comprender la evolución del acuífero. El estudio geológico detallado y el análisis hidroquímico e isotópico de fuentes y pozos, permitieron caracterizar la recarga del acuífero, entre otro para definir el papel preponderante del basamento mesozoico sobre los flujos especialmente en las formaciones cenozoica. Para compensar la falta de datos históricos, se ha implementado un enfoque complementario que consiste en integrar el conocimiento de las poblaciones locales indígenas para el desarrollo del modelo hidrogeológico conceptual. Por otro lado, se analizó la gestión de los recursos hídricos subterráneos del acuífero de la Pampa del Tamarugal, con una atención especial al papel de la información científica y técnica y a las estrategias y discursos de los actores sobre esta gestión y los usos. Finalmente, el estudio de un antiguo sistema de gestión del agua ha generado la información necesaria para su conservación como patrimonio hidráulico de zonas áridas, pero también para su reutilización para la gestión actual del acuífero. Esta investigación ha mejorado la comprensión de los mecanismos de recarga, así como el flujo y la evolución de los recursos de agua subterránea bajo presión antropogénica en una zona árida y montañosa como el norte de Chile. También evidenció las presiones que limitan el acceso al agua para las poblaciones vulnerables en el área de estudio y el papel de la información científica en la gestión de los recursos de aguas subterráneas.

## Remerciements

Aux membres du jury, pour avoir accepté de consacrer leur temps à juger mon travail ;

A Véro et Hervé, pour m'avoir poussé, accompagné, épaulé dans cette belle aventure et pour leur amitié, constante, sans faille, quelle que soit la distance et le temps ;

A mes filles, Luna et Amelia, compréhensives, curieuses et passionnées ; et à Carlos, pour son support inconditionnel, par tous les temps. Tous les trois ont toujours supporté mes longues heures de travail, soirées, weekend et jours fériés, sans jamais se plaindre ;

A mes parents, qui m'ont donné la passion d'explorer le monde, et la force de ne jamais abandonner ce que l'on a commencé, et ce en quoi on croit ;

Et à tous ceux qui ont formé mes équipes de travail au Guatemala, aux Philippines, en Jordanie, et bien sûr, au Chili. Pour tous ces merveilleux moments partagés.

# ACCES A L'EAU DES POPULATIONS VULNERABLES EN ZONE ARIDE : UN PROBLEME DE RESSOURCE, DE GESTION OU D'INFORMATION ?

## Sommaire

Résumé .....	ii
Liste des illustrations .....	viii
Liste des tableaux .....	ix
Introduction .....	1
<b>1. Les données : information existante et acquisition .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Contexte .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1.1 La gestion de l'eau (souterraine) au Chili .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1.2 Le nord du Chili : un contexte complexe .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2. Les données hydroclimatiques brutes: une source importante d'incertitude ...</b>	<b>18</b>
<b>1.2.1. Analyse des séries de données et informations existantes (modifié Lictevout et Gocht (2017) .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2. La conception d'un nouveau réseau de mesure en zone aride (Lictevout et Gocht, 2017) .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3. Connaissances locales des ressources en eau et suivi participatif : quelle utilité et comment les intégrer ? .....</b>	<b>35</b>
<b>1.4. Système traditionnel d'alimentation en eau en zone aride : étude des galeries souterraines de l'Oasis de Pica.....</b>	<b>39</b>
<b>1.5. Conclusion du chapitre 1 .....</b>	<b>60</b>
<b>2. La ressource : Caractérisation des processus hydrogéologiques du bassin de la Pampa del Tamarugal .....</b>	<b>62</b>
<b>2.1. Evolution des ressources en eau souterraines dans la zone nord et aride du Chili</b>	<b>62</b>
<b>2.2. Processus hydrogéologiques contrôlant la recharge en zone aride.....</b>	<b>75</b>
<b>2.2.1. Zone centrale du bassin versant Pampa del Tamarugal (Oasis de Pica)....</b>	<b>76</b>
<b>2.2.2. Zone sud du bassin versant Pampa del Tamarugal (Huatacondo et Mani)</b>	<b>92</b>
<b>2.3. Conclusion du chapitre 2 .....</b>	<b>94</b>
<b>3. Les usages et la gestion des eaux souterraines de la Pampa del Tamarugal .....</b>	<b>96</b>
<b>3.1. Le rôle des études scientifiques, contraintes socioéconomiques et enjeux politiques dans l'accès à l'eau (Lictevout and Faysse, 2018) .....</b>	<b>96</b>
<b>3.2. Conclusion du chapitre 3 .....</b>	<b>106</b>

<b>Conclusion</b> .....	107
<b>Références bibliographiques</b> .....	109
<b>Annexe 1 : Références personnelles</b> .....	118
<b>Annexe 2 : Matériel supplémentaire</b> .....	120
<b>Annexe 3 : Publications personnelles</b> .....	129

## Liste des illustrations

Figure 1 : Distribution mondiale des régions de pénurie physique et économique de l'eau.....	2
Figure 2: Localisation de la zone d'étude.....	11
Figure 3: Variations interannuelles des précipitations moyennes annuelles. ....	13
Figure 4: Coupe schématique E-W des mouvements du flanc occidental de la Cordillère des Andes au Plio-Pléistocène.....	14
Figure 5: Représentation conceptuelle des circulations souterraines au niveau régional et principaux modèles de recharge de la Pampa del Tamarugal.....	15
Figure 6: Evolution temporelle des droits d'eaux souterraines alloués dans l'aquifère de la Pampa del Tamarugal .....	17
Figure 8: Exemples d'une station pluviométrique (A) et de jaugeage (B) .....	18
Figure 9: Localisation des stations pluviométriques et de jaugeage du réseau de mesure DGA20	
Figure 10: Aquifères de la Région de Tarapacá .....	21
Figure 7: Target scheme of stakeholders .....	27
Figure 11: Hierarchical structure, weights and compensability in composite programming .	31
Figure 12 (a) Decision alternatives identified for the network; (b) new optimized hydrometric network of Tarapaca. ....	32
Figure 13 : (a) Paléo-chenaux de direction Nord-Sud dans la Formation El Diablo au nord des sources de Tamentica ; (b) Sources et habitations de Tamentica. ....	37
Figure 14 : Localisation des forages utilisés pour les campagnes piézométriques de 2012 et 2013.....	63
Figure 15 : Relevé topographique d'un puits de l'aquifère PdT.....	64
Figure 16 : Résultat de l'analyse exploratoire des données piézométriques de 2012 et 2013 ...	65
Figure 17 : Variogrammes des données piézométriques des groupes A et B.....	65
Figure 18: Cartes piézométriques de 1960, 1995 et 2013 de l'aquifère PdT.....	67
Figure 19 : Analyse exploratoire des données piézométriques de 1960 et 1995.....	69
Figure 20 : Différences piézométriques entre les campagnes de 1960 et 1995 .....	70
Figure 21 : Différences piézométriques entre les campagnes de 1995 et 2013 dans la partie nord de l'aquifère PdT .....	71
Figure 22 : Différences piézométriques entre les campagnes de 1995 et 2013 dans les zones centre et sud de l'aquifère PdT .....	73
Figure 23: Modèle conceptuel de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal .....	76
Figure 24 : Colonne stratigraphique de la Formation Altos de Pica.....	77
Figure 25 : Interprétation de la ligne sismique 1F003i (d'après Scheihing et al. (2017)).....	78
Figure 26: Géologie de la zone d'étude et localisation des galeries souterraines, sources et forages avec données hydrochimiques et isotopiques. ....	80
Figure 27: Coupes géologiques et hydrogéologiques de l'aquifère de Pica.. ....	83

Figure 28: a et b : Photos d’affleurement d’ignimbrite de Tambillo et Sources.....	84
Figure 29: Diagramme de Piper.....	86
Figure 30: Diagrammes binaires.....	88
Figure 31: Analyses isotopique ( $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ ) de sources et forages de la zone d’étude.....	89
Figure 32: Modèle conceptuel de recharge de l’aquifère de Pica.....	91
Figure 33 : Diagram of a typical filtration gallery.....	40
Figure 34 : Map of the identified socavones of the Pica area.....	45
Figure 35 : (a) Geological setting of the socavones of Pica area; (b) Geological and hydrogeological Cross-section.....	46
Figure 36 : (a) y (b) Calcium carbonate covering carved steps and ladder in El Carmen socavon. (c): Stalactites in San Matías.....	48
Figure 37 : Steps in the main galleries.....	51
Figure 38 : Baked clay tiles channel in Comiña socavon.....	52
Figure 39 : Elements of the socavones visible on the ground surface.....	53
Figure 40 : Satellite view of the ground surface elements of the socavones.....	54
Figure 41 : Typical shaft well (Lumbrera) in Pica area.....	55
Figure 42 : Pseudo-sections of apparent resistivity.....	56

## Liste des tableaux

Tableau 1: Croissance démographique de la région de Tarapacá.....	16
Table 2: List and definition of criteria selected.....	28
Table 3: Criteria scale and units.....	29
Table 4: Criteria ponderation according to the three MCA techniques used in this work.....	30
Tableau 5 : Variations piézométriques des forages des études Castillo (1960) et JICA (1995).....	68
Tableau 6 : Caractéristiques des points d'eau utilisés pour l'analyse hydrochimique et isotopique.....	82
Tableau 7 : Données physico-chimiques des sources échantillonnées dans les galeries souterraines.....	85
Table 8 : Unused water rights subject to tax in the PdT Aquifer (l/s) (adapted from DGA, 2018). .....	102
Table 9 : Main characteristics of the socavones of the area of Pica.....	50

## Introduction

La pénurie d'eau et l'accès à l'eau sont devenus parmi les principaux enjeux du 21<sup>ème</sup> siècle. Aujourd'hui, 1,9 milliard de personnes (27% de la population mondiale) vivent dans des zones qui peuvent être potentiellement affectées par une pénurie d'eau sévère ; en 2050, il est estimé que cette situation affectera entre 2,7 et 3,2 milliard de personnes en fonction des différents scénarios de changement climatique (Burek et al., 2016). Avec le scénario actuel, la pénurie d'eau menace de déplacer entre 24 et 700 millions de personnes dans les zones arides et semi-aride de la planète d'ici à 2030 (UN, 2010).

On distingue la pénurie d'eau physique (lorsqu'il n'y a pas assez d'eau pour faire face à toutes les demandes, y compris l'environnement) de la pénurie d'eau économique (provoquée par le manque d'investissement en eau ou le manque de capacité humaine pour satisfaire les demandes en eau) (Figure 1, Earthscan and IWMI (2007)). La plupart des analyses se focalisent sur le caractère limité de l'approvisionnement en eau (e.g. Mehta, 2007). Il s'avère, cependant, que la pénurie d'eau a été utilisée historiquement pour promouvoir des intérêts politiques et économiques, par exemple, créer des opportunités pour les investissements ou faciliter l'introduction de nouvelles réglementations (Bakker, 2000 ; Mehta, 2003 ; Urteaga, 2014). Un certain nombre d'études de cas documentées mettent en évidence la création et la « naturalisation » (idée qu'il s'agit d'un phénomène purement naturel omettant les actions et les décisions humaines qui ont déclenché le phénomène) de la pénurie - ou de l'abondance - de l'eau à différentes fins politiques et économiques (Bakker, 2000 ; Dolatyar et Gray, 2000 ; Kaika, 2003 ; Barnes, 2009 ; Urteaga, 2014). La plupart des études de cas rapportées proviennent de zones arides ou semi-arides, où l'eau est rare dans sa forme superficielle. Dolatyar et Gray (2000) démontrent que la pénurie d'eau a servi de prétexte à la guerre au Moyen-Orient, mais n'a jamais été la cause de la guerre. Mehta (2003) relate une étude de cas en Inde où la pénurie d'eau était attribuée aux faibles précipitations et aux sécheresses fréquentes et ont justifié la mise en œuvre d'un programme de construction de barrages hydroélectriques. Kaika (2003) a étudié le cas de la sécheresse qui a frappé Athènes entre 1989 et 1991. Se basant sur une étude aux chiffres très pessimistes, l'État présentait la crise comme d'origine naturelle alors qu'il s'agissait en réalité d'investissement insuffisant dans l'infrastructure pour soutenir la croissance démographique. Cela a ensuite justifié l'application de mesures d'urgence et la privatisation de l'eau. Urteaga (2014) analyse le cas du bassin versant de Chira au Pérou, ciblé pour la production de biocombustible (éthanol). Pour elle, les acteurs politiques et économiques ont utilisé une étude technique favorable quant à la disponibilité des ressources en eau pour soutenir un discours sur l'abondance de l'eau. Ils ont pu ainsi obtenir et sécuriser les ressources nécessaires au développement du projet au détriment des autres usagers, notamment les agriculteurs. Ces exemples montrent que la production et l'utilisation des connaissances scientifiques dans la gestion de l'eau peuvent être politisées et que l'expertise technique peut constituer un instrument de pouvoir social.

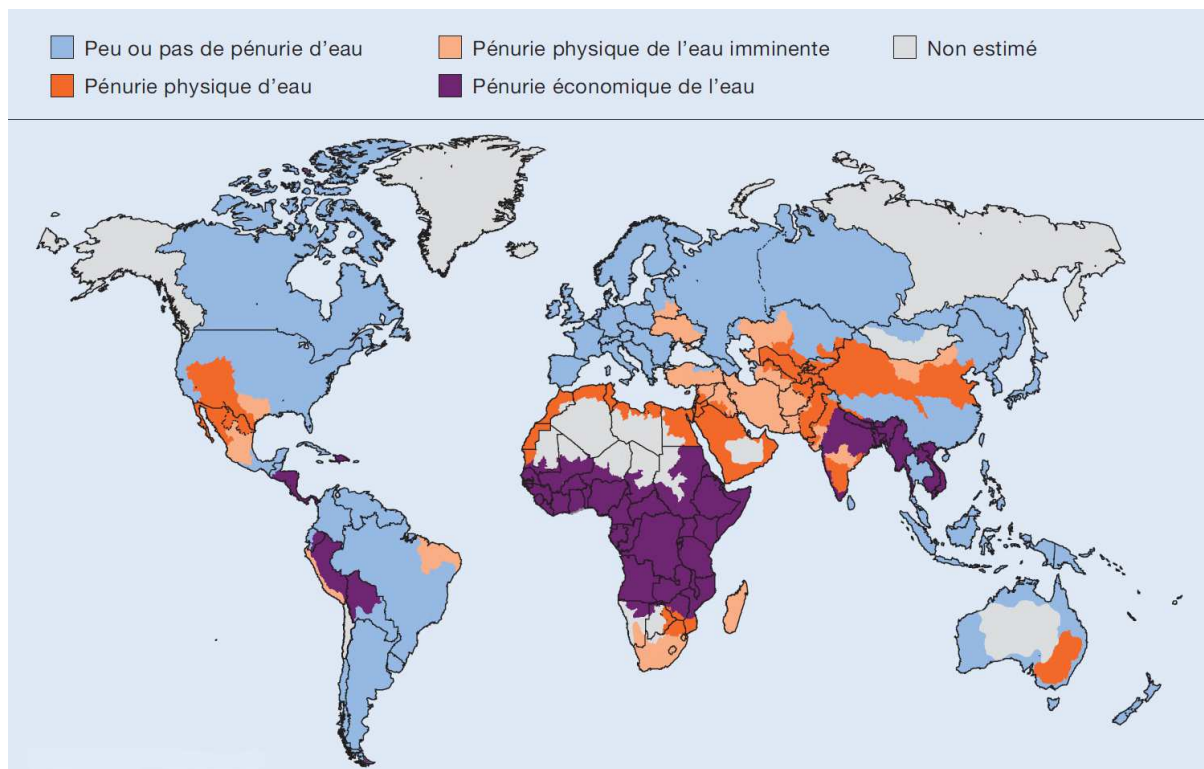


Figure 1 : Distribution mondiale des régions de pénurie physique et économique de l'eau (d'après Earthscan and IWMI (2007).

Les zones arides représentent 40% des terres émergées du globe. Elles abritent environ 35% de la population mondiale, soit deux milliard d'êtres humains, dont 90% dans les pays en voie de développement, et affichent parmi les plus hauts niveaux de pauvreté de la planète (FAO, 2011 ; UN, 2011). Parmi les indicateurs de cette pauvreté, l'accès à l'eau potable occupe une place majeure. Au cours des dernières décennies, certaines zones arides ont été le théâtre du développement d'activités industrielles très rentables et d'intérêt économique majeur. L'accès à l'eau y devient alors un enjeu majeur, tant pour les populations locales et les acteurs industriels que pour les autorités qui sont alors confrontées à des problèmes de gestion des eaux souterraines. Cependant, peu de données et d'informations sont disponibles sur les ressources en eau des zones arides, l'acquisition y est souvent difficile et seules les zones d'intérêt économique sont équipées de stations de mesure des variables météorologiques, hydrologiques et hydrogéologiques qui permettent d'évaluer et de caractériser les ressources en eau souterraine. Les raisons sont leur éloignement, la difficulté d'accès, les conditions extrêmes (climat, altitude, sécurité), et la faible densité de population qui implique souvent un manque d'intérêt pour la production de données et d'informations.

Les zones arides sont caractérisées par des précipitations faibles, dispersées, sporadiques et inférieures à l'évaporation potentielle qui est en général très élevée (Joly, 2006 ; FAO, 2011). En conséquence, les ressources en eau superficielles sont souvent inexistantes et les réserves disponibles et permanentes dans ces zones sont principalement souterraines (Joly, 2006). La topographie et l'orographie jouent un rôle majeur dans la distribution des précipitations (Michaud et al., 1995). Dans les régions arides et montagneuses, les précipitations sont dues à la formation de tempêtes convectives intenses qui se développent très rapidement sur les hauteurs. Les événements de précipitation sont très localisés, hétérogènes dans l'espace et dans



le temps. Par conséquent, la caractérisation de l'hétérogénéité temporelle et spatiale des variables hydrométéorologiques nécessite une quantité de données plus importante que dans les plaines ou les régions où les précipitations sont contrôlées par des systèmes frontaux (Volkman et al., 2010). La plupart des réseaux d'observation existant dans les régions arides et montagneuses ne capturent pas de manière adéquate la variabilité des précipitations, car ils ont souvent un nombre insuffisant de stations, implantées surtout dans des sites relativement accessibles et à basse altitude (Volkman et al., 2010). De même, le suivi des débits est particulièrement difficile dans les zones arides. Le régime hydrologique et la morphologie des cours d'eau sont caractérisés par des écoulements faibles ou intermittents (Joly, 2006) dans des chenaux dont l'emplacement au sein de lits très larges et secs varie au gré des crues subites qui génèrent des débits très élevés (Lictevout et Gocht, 2017). Les ressources en eau souterraine y sont encore souvent mal connues.

Les réseaux hydrométriques ont pour objectif l'observation des phénomènes hydrologiques à différentes échelles de temps et d'espace. Ces informations sont complétées par des campagnes de terrain qui génèrent des données spatiales qui ne peuvent pas être capturées par le réseau. Cependant, les variations spatiales et temporelles des variables hydrologiques insuffisamment représentées par les données disponibles sont source d'importantes incertitudes qui génèrent des erreurs sur les résultats des modèles géologiques et hydrogéologiques numériques (Nilsson et al., 2007). Selon cet auteur, l'autre source d'incertitude est définition incomplète du cadre conceptuel. Mishra et Coulibaly (2009) ont examiné plusieurs études visant à quantifier l'impact de la densité des réseaux de mesures hydrométrique sur la précision des estimations. Ils démontrent que la précision se dégrade considérablement au-dessous d'un certain nombre de stations et ne s'améliore pas de manière significative au-dessus. De plus, la localisation et la distribution spatiale des stations sont au moins aussi importantes que la densité et affectent la précision des données. Les erreurs des données peuvent être causées par une résolution temporelle inadéquate, la couverture ou localisation spatiale médiocre, ainsi que par une erreur dû à l'équipement (Mishra et Coulibaly, 2009 ; Volkman et al., 2010).

Si la conception et la mise en place d'un réseau hydrométrique qui génère des données fiables et représentatives s'avèrent indispensable pour mieux caractériser les ressources en eau souterraines des zones arides, il ne portera ses fruits que plusieurs dizaines d'années après, quand pourront être exploitées des séries de données suffisamment longues. Les campagnes de terrain ponctuelles n'intègrent pas toujours l'échelle temporelle et sont limitées par les ressources et, surtout, le temps disponible.

On ne peut pourtant pas attendre des décennies avant d'évaluer les ressources en eau, notamment dans les contextes où la demande en eau et la pression sur la ressource augmentent. Ces informations sont indispensables à une gestion durable d'aquifères et bassins versants soumis à de fortes pressions affectant la quantité et la qualité de l'eau. Dans ces cas, l'utilisation des connaissances locales sur l'eau et l'environnement, quand elles existent, ainsi que le suivi participatif constituent un potentiel encore peu exploré.

Dans les contextes où les données manquent pour la définition de paramètres et la validation de modèles prédictifs, Johannes (1998) suggère que l'information peut provenir de deux sources : d'une part les connaissances acquises dans des contextes et systèmes similaires,

d'autre part les connaissances locales. Bien que l'hydrodynamisme d'un milieu marin côtier est probablement plus simple qu'un hydrosystème continental souterrain, Johannes (1998) affirme que, dans le cas des communautés de pêcheurs traditionnels, cette connaissance s'est avérée encyclopédique dans certaines régions. Les connaissances locales sont un ensemble de faits et concernent l'ensemble du système de concepts, de croyances et de perceptions que les gens ont du monde qui les entoure. Quand elles sont développées par les sociétés ayant une longue histoire d'interaction avec leur environnement naturel, souvent isolées du reste du monde, on parle de connaissances traditionnelles ou indigènes (FAO, 2004 ; UNESCO, 2018). Failing et al. (2007) définissent les connaissances écologiques traditionnelles comme un ensemble cumulatif de connaissances, de pratiques et de croyances concernant la relation entre les êtres vivants et leur environnement. Raymond et al. (2010) distinguent les connaissances tacites (qui ne peuvent pas être articulées mais potentiellement expertes) des connaissances implicites (pas encore articulées) et explicites (articulées). Les connaissances locales sont en général tacites, et les connaissances scientifiques explicites car articulées et valorisées au travers de rapports, publications, etc. Ils distinguent aussi les connaissances traditionnelles, locales et scientifiques, différenciées par leur intégration aux règles et normes culturelles traditionnelles comme résultat des relations passées entre l'homme et l'environnement. Les connaissances locales sont généralement basées sur l'expérience et l'observation et par conséquent elles sont spécifiques du contexte. Elles ont tendance à être exprimées de manière plus holistique et moins réductionniste que celle de la science occidentale (Becker et Ghimire, 2003 ; Folke, 2004).

Les connaissances locales sont souvent rejetées par la science, ainsi que par beaucoup de gestionnaires, qui les considère insuffisamment objectives et rigoureuses en termes de méthode et de documentation (Joly, 2006). Par opposition, les contributions scientifiques au processus décisionnel en matière d'environnement sont souvent acceptées sans réserve, sans exprimer explicitement le degré d'incertitude associé à celles-ci (Failing et al., 2007). Budds (2009) en donne un clair exemple au Chili où elle a étudié le cas de la vallée La Ligua. Elle affirme que les résultats d'une étude hydrogéologique sont discutables car ils n'ont pas correctement tenu compte des incertitudes du modèle numérique, et donc des précisions des simulations. Elle distingue deux types d'incertitudes : celles intrinsèques à la modélisation hydrogéologique et celles spécifiques à l'étude réalisée à La Ligua. Cette étude cependant a justifié les décisions prise par les gestionnaires sur la gestion des ressources en eau de la vallée.

Le problème inverse se produit également, quand les communautés rejettent systématiquement les informations scientifiques car jugées peu dignes de confiance ou ignorant les conditions locales.

Il existe cependant de nombreuses opportunités d'intégration et complémentarité entre les connaissances locales et scientifiques. Pour Failing et al. (2007), les connaissances locales génèrent des hypothèses tandis que la science les teste. Mais pour considérer l'utilisation des connaissances locales, certaines conditions doivent cependant être vérifiées: l'existence de communautés caractérisées par leur lien ancestral à l'environnement, ce qui implique aussi l'absence de discontinuité dans la transmission des connaissances d'une génération à l'autre, telle que reportée dans le cas étudié par Failing et al. (2007) et Faust et Smardon (2001) présentent diverses approches pour évaluer les connaissances environnementales locales en

fonction des types de communautés. En effet, certaines communautés sont résidentes et exploitent les ressources locales mais leur présence relativement récente réduit la valeur temporelle de leurs connaissances.

Ainsi, dans les régions arides, où la pression socio-économique est croissante et les enjeux politiques sont importants, l'accès à l'eau souterraine et sa gestion durable est une question d'actualité. Pour y répondre, la communauté scientifique est souvent prise à partie. Cependant, celle-ci se heurte à un manque de données acquises in situ qui rend complexe et risqué l'élaboration de scénarios basés sur des modèles numériques. Mais face à des pressions locales, politiques et économiques, comment acquérir des données dans ces zones géographiques d'accès difficile et comment suppléer ce manque de données ?

Cependant, une fois que l'information scientifique sur les ressources en eau souterraine est produite, un autre problème se pose à la communauté scientifique : comment communiquer ces résultats pour qu'ils soient effectivement intégrés dans les plans de gestion et pour qu'ils aient un impact durable sur l'accès à l'eau, notamment des populations les plus vulnérables ? Là encore, les enjeux et les contraintes socio-politico-économiques jouent un rôle majeur, mettant en péril le rôle même de l'information scientifique. Comment aborder alors la problématique de l'accès à l'eau souterraine en zone aride ? Est-ce un problème de ressource ? De gestion et d'usages ? Ou est-ce un problème de connaissance et d'accès à cette connaissance ?

Afin de pouvoir répondre à ces différentes questions, mes travaux de recherche se sont concentrés sur la compréhension des problèmes d'accès à l'eau dans le nord du Chili. L'insuffisance d'information, tant sur la ressource que sur les usages, ne permettait pas de répondre en premier abord à ces questions. Deux grands volets ont donc été définis pour aborder cette problématique : i) caractériser le fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude, en particulier analyser des données disponibles et générer de nouvelles données – par le biais de la conception d'un réseau de mesure et par l'intégration des connaissances locales - nécessaires à la compréhension des processus de recharge et l'évolution de la ressource au cours des dernières décennies ; ii) comprendre les mécanismes de gestion, non seulement au niveau institutionnel, mais également au niveau de leur mise en œuvre effective sur le terrain. Finalement, et sur la base de l'analyse de ces deux volets, j'ai cherché à comprendre le rôle de l'information scientifique (caractérisation de la ressource) dans les modalités de gestion de la ressource en eaux souterraines, en particulier le rôle de l'accès à l'information scientifique relatif à cette ressource dans l'accès à l'eau des populations vulnérables. Il serait intéressant de comparer, voire d'extrapoler, les résultats obtenus dans le nord du Chili à d'autres zones arides.



*Village de Mocha, Quebrada de Tarapacá.*

## 1. Les données : information existante et acquisition

Dans ce premier chapitre, je présente tout d'abord les données générales du contexte du site d'étude qui permettent de comprendre les travaux de recherches présentés ensuite (§ 1.1).

Afin de comprendre les processus de recharge et d'évaluer l'état de la ressource, j'ai procédé à la compilation, la systématisation et l'analyse de l'information existante (Lictevout et al., 2013), pour ensuite évaluer les données brutes disponibles. Je présente donc ensuite l'analyse critique i) des séries de données disponibles et ii) de leurs conditions d'acquisition (réseau hydrométrique). Constatant les faiblesses du réseau existant et, par conséquent, l'incertitude générée sur les résultats des modèles existants, j'ai travaillé sur la conception d'un réseau de mesure optimal. Cette partie est tirée d'un article publié en premier auteur (Lictevout et Gocht, 2017) (§ 1.2).

La faiblesse des données existantes pour la caractérisation des processus hydrogéologiques de la zone d'étude m'ont amené à envisager l'utilisation des connaissances locales et ancestrales, ainsi que la mise en place d'un suivi participatif des ressources en eaux pour générer des données. Ce travail est présenté dans le sous-chapitre 1.3.

Le quatrième sous-chapitre étudie un système d'alimentation traditionnel de l'oasis de Pica, les galeries ou aqueducs souterrains. C'est l'un des systèmes de gestion de l'eau les plus anciens dans les zones arides. Originaires de l'ancienne Perse, ils se sont répandus dans d'autres cultures jusqu'en Chine, à l'est et en Amérique latine, à l'ouest. Les galeries souterraines les plus connues du continent sud-américain sont situées dans l'oasis de Pica, dans le désert d'Atacama. Dans le cadre d'un effort visant à améliorer la planification de l'utilisation des sols et à préserver le patrimoine hydraulique de l'un des endroits les plus arides du globe, ce travail vise à identifier et décrire les galeries souterraines de l'oasis de Pica, appelées localement socavones. L'exploration et le relevé topographique des galeries souterraines, ainsi que la prospection géoélectrique ont permis d'identifier 24 socavones. Leurs caractéristiques principales ont été décrites ainsi que leur environnement géologique et hydrogéologique. Bien qu'ils présentent des traits communs avec les galeries souterraines décrites dans le monde entier, ils possèdent également des caractéristiques propres soulignant leur originalité. La plupart des socavones sont aujourd'hui abandonnées en raison de changements physiques et socio-économiques, tout comme dans d'autres régions du monde. Néanmoins, cette étude conclut qu'ils peuvent toujours avoir un rôle à jouer dans la gestion des eaux souterraines d'une zone aride. Ce sous-chapitre reprend un article en premier auteur que je viens de soumettre au journal « Journal of Arid Environment ».

### 1.1. Contexte

#### 1.1.1 La gestion de l'eau (souterraine) au Chili

La gestion des ressources en eau au Chili repose sur un système de droits d'eau privés. Elle est régie par le Code de l'eau de 1981, l'une des réformes «méolibérales» mises en place par le régime militaire du général Augusto Pinochet (1973-1990) et qui ont considérablement réduit



le rôle de l'État dans l'économie et la société (Budds, 2013). Le cadre juridique et institutionnel du Code chilien de l'eau répond aux principes de l'économie de marché libre. L'eau n'est pas seulement considérée comme une propriété privée, mais également comme un produit entièrement commercialisable (Bauer, 2004 ; Budds, 2009). L'État joue donc un rôle limité dans la gestion de l'eau (Bauer, 2004 ; Lajaunie et al., 2011 ; Budds, 2013) et les droits d'eau sont gérés de la même manière que la propriété privée (Rinaudo et Donoso, 2018). L'eau de surface est gérée indépendamment de l'eau souterraine.

Certains auteurs (e.g. Valdés-Pineda et al., 2014) considèrent que le système actuel d'attribution des droits d'eau est efficace d'un point de vue économique car le marché chilien de l'eau a contribué à une croissance économique significative du marché industriel (agriculture, mines et foresterie). Pour Bauer (2004), les avantages économiques du Code de l'eau sont dus à la forte sécurité juridique des droits qui a encouragé les investissements privés mais le système actuel d'attribution des droits d'eau est également très inefficace et inéquitable d'un point de vue social et environnemental. Dans ce contexte, la compétition et les conflits liés à l'utilisation de l'eau se sont intensifiés (Lajaunie et al., 2011 ; Costumero et al., 2017).

Au Chili, l'utilisation des eaux souterraines était insignifiante jusqu'aux années 1990. Depuis lors, elle a rapidement augmenté avec la « fermeture » de certains bassin-versants à l'acquisition de nouveaux droits d'eau de surface (Molle, 2003) et l'installation d'activités économiques et industrielles à forte demande en eau qui se sont développées dans des zones sans accès aux eaux de surface (Lajaunie et al., 2011 ; Rinaudo et Donoso, 2018). Pour satisfaire leurs besoins en eau, les compagnies minières tentent d'acheter des droits d'eau, en particulier aux petits agriculteurs. Les prix élevés (jusqu'à 100 000 USD pour 1 l/s) expliquent que beaucoup sont disposés à vendre. La désalinisation de l'eau de mer constitue une seconde option pour satisfaire les besoins en eau des mines, mais implique des coûts énergétiques élevés en production et en transfert vers les zones de consommation qui limitent son utilisation (Oyarzún and Oyarzún, 2011 ; Valdés-Pineda et al., 2014).

Malgré les tensions croissantes sur l'utilisation de l'eau, il n'y a pas de processus décisionnel clair pour l'allocation des eaux souterraines dans le but d'équilibrer les objectifs économiques, sociaux et environnementaux (Budds, 2009 ; Rinaudo et Donoso, 2018).

La Direction Générale de l'Eau (DGA) est l'administration chilienne rattachée au Ministère des Travaux Publics chargée de la police de l'eau, du suivi et de l'évaluation des ressources en eau (entre autres grâce à la gestion du réseau de mesure) et d'accorder des droits d'eau consignés dans un registre national (CNA). En pratique, le rôle de la DGA se limite généralement à gérer des situations de crise (Budds, 2009). Le Code de l'eau prévoit trois mesures juridiques permettant à la DGA d'intervenir dans des situations de conflit concernant l'utilisation des eaux souterraines ou la surexploitation des aquifères :

- La DGA peut réduire temporairement les droits d'eau souterraine alloués s'il est prouvé que les taux d'extraction ont un impact direct sur le niveau des eaux souterraines ou sur les usages existants. Cette mesure a été utilisée dans le cas des eaux de surface, mais jamais pour les eaux souterraines (Rivera, 2015 ; Donoso et Vicuña, 2016).

- La DGA peut déclarer un aquifère «zone de restriction» ou « zone d’interdiction » quand au moins l’une des conditions suivantes est remplie (DGA, 2008, 2013): i ) une baisse générale des niveaux piézométriques, affectant les usages ; ii) des prélèvements d'eau souterraine dépassant le taux de recharge, provoquant une baisse des niveaux piézométriques et réduisant le volume d'eau stocké dans l'aquifère de plus de 5% du volume total sur une période de 50 ans ; iii) une diminution de 10% du débit moyen d’été des sources et des eaux de surface, affectant les droits d'eau existants; iv) un risque de contamination des eaux souterraines par des eaux polluées ou l'intrusion saline ; v) un risque environnemental dans les zones protégées. Lorsqu'une zone de restriction ou d’interdiction est déclarée, l'attribution de nouveaux droits permanents sur l'eau est suspendue, bien que, dans une zone de restriction, des droits d'eau temporaires puissent être attribués.

Cependant, étant donné que le code ne prévoit aucune mesure de réduction permanente de l'utilisation de l'eau dans ces zones, la capacité de la DGA à réduire la surexploitation des eaux souterraines à long terme est minime.

Le Code de l'eau stipule qu'une association d'usagers des eaux souterraines (*comunidad de aguas subterráneas*) doit être créée lorsqu'un aquifère a été déclaré zone de restriction ou d’interdiction. Le nombre de voix allouées aux usagers des eaux souterraines au sein de l'association est proportionnel à leurs droits. Théoriquement, 159 associations d'usagers des eaux souterraines auraient dû être créées en 2016. Cependant, seules 13 associations ont été établies, principalement dans les régions de Copiapó et de Ligua-Petorca (DGA, 2016). La participation des usagers est faible, en particulier les petits usagers car les votes reposent sur l’attribution au prorata des droits d’eau. En outre, les usagers ont tendance à considérer le processus comme imposé par l’État (Rinaudo et Donoso, 2018).

La gestion des ressources en eau au Chili reste un défi. Premièrement, il y a généralement peu d'informations sur la disponibilité des eaux de surface dans chaque bassin et encore moins sur la disponibilité des eaux souterraines. Les processus hydrogéologiques sont encore mal compris, en particulier la recharge et l'interaction entre les eaux souterraines et les eaux de surface (Lajaunie et al., 2011). Deuxièmement, le registre des droits d’eau n’est pas exhaustif (il ne couvrirait que 20% du total des droits d’eau alloués selon Lajaunie et al. (2011)). En effet, les régularisations de droits d’eau anciens et les transactions de droits d’eau n’y sont pas consignées. De plus, un droit d’eau peut changer d’usage et de propriétaire sans que la DGA n’en soit informée. Il est donc difficile voire impossible de contrôler et d’estimer avec précision les extractions.

### 1.1.2 Le nord du Chili : un contexte complexe

#### *Contexte géographique et climatique*

L'extrême nord du Chili est considéré comme l'une des régions les plus arides du monde (Maliva et Missimer, 2012). La région de Tarapacá est située entre les latitudes 18°56' et 21°36' sud et entre la longitude 68°5' et l’océan Pacifique (Figure 2). C’est l'une des 15 divisions administratives du Chili. Elle est limitée au nord par la région d'Arica-Parinacota, au sud par

la région d'Antofagasta, à l'est par la Bolivie, et à l'ouest par l'océan Pacifique. La combinaison de circulations océaniques et atmosphériques complexes - à savoir le courant de Humboldt et l'anticyclone du Pacifique - et les caractéristiques orographiques du littoral et de la Cordillère des Andes confèrent à la région des conditions arides à hyperarides<sup>1</sup>. La région a un climat désertique selon la classification de Köppen, à l'exception d'une zone limitée dans la partie nord de l'Altiplano et de la Cordillère des Andes qui bénéficie d'un climat semi-désertique (Maass et Lobos, 2015).

La région est formée d'ouest en est par les unités géomorphologiques suivantes: la Côte Pacifique et la Cordillère de la Côte (de 0 à 1500 m), la Dépression Centrale (de 900 à 1100 m), le Piedmont andin et la Précordillère (de 1100 à 5700 m), l'Altiplano (de 3700 à 4000 m) et la Cordillère des Andes (de 4000 à 600 m) (Figure 2).

---

<sup>1</sup> Le courant de Humboldt est un courant océanique froid de direction sud-nord le long de la côte ouest de l'Amérique du Sud. Il refroidit l'atmosphère de basse altitude et condense l'humidité de la zone côtière (causant le brouillard côtier appelé Camanchaca au Chili). Cette humidité est limitée verticalement par l'air chaud de l'anticyclone du Pacifique (inversion thermique à 1 000 m). De l'autre côté, la Cordillère des Andes limite à l'est la circulation d'air humide et chaud provenant du bassin amazonien.



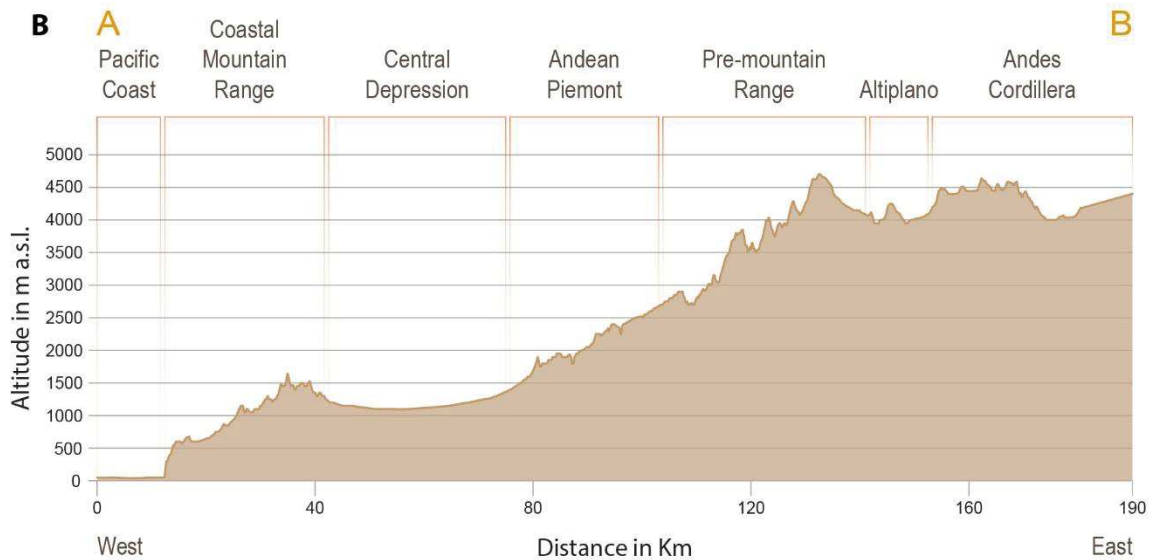
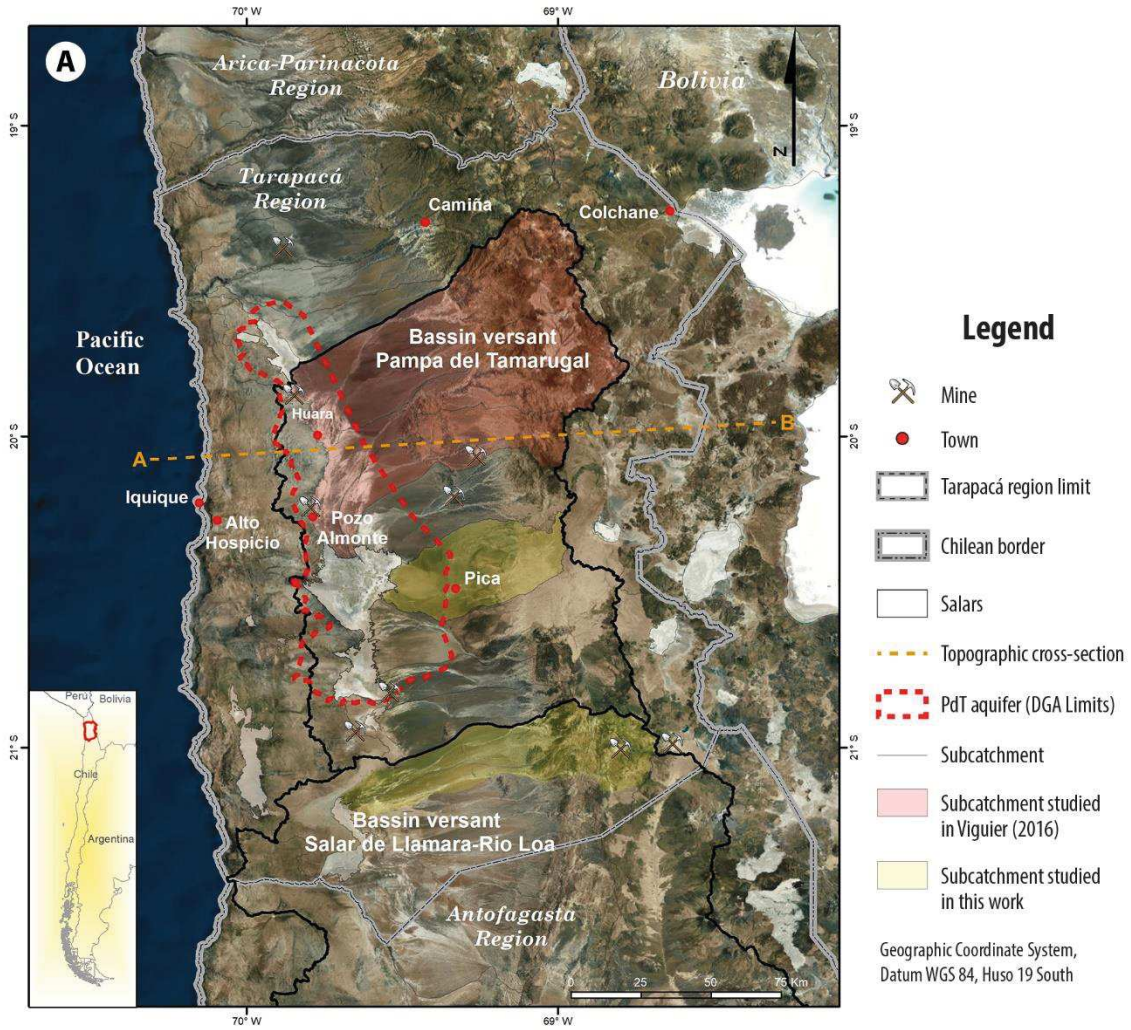
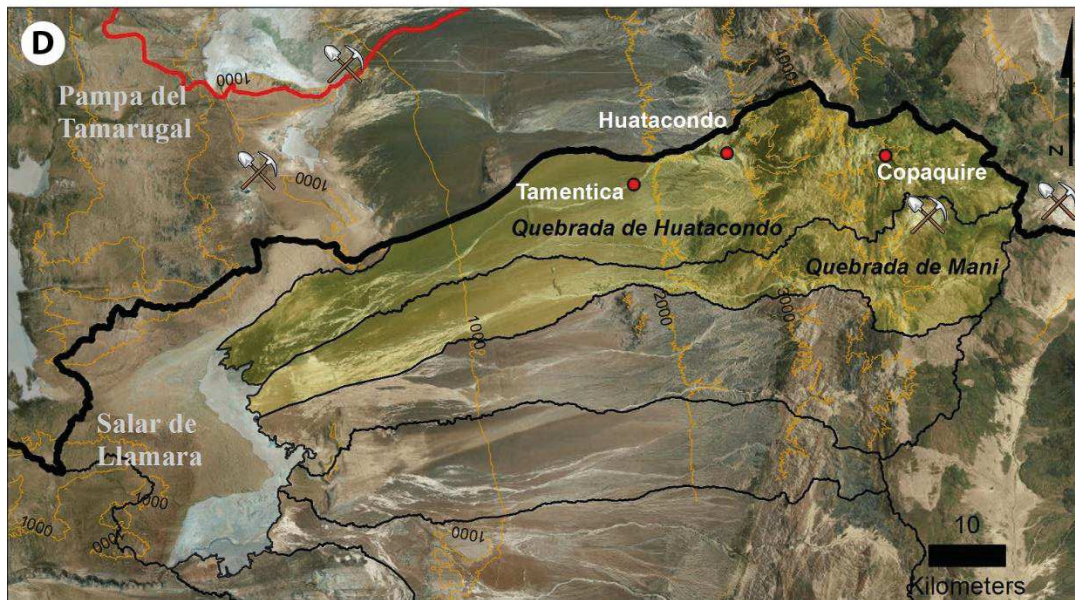
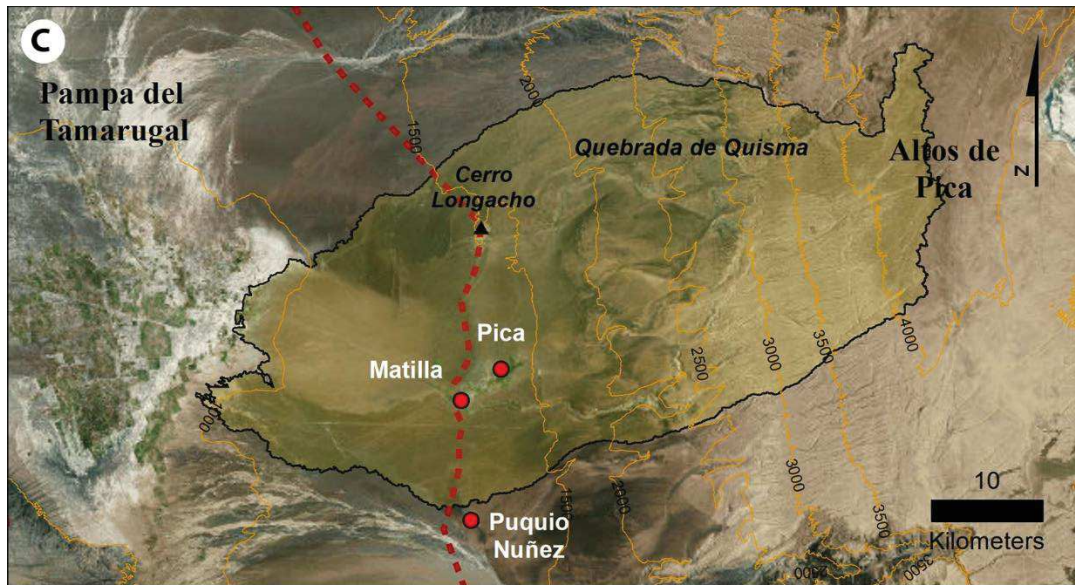


Figure 2: Localisation de la zone d'étude. *Cette page* : (A) Région de Tarapacá, nord du Chili ; (B) Coupe transversale topographique Est-Ouest avec les différentes unités géomorphologiques ; *Page suivante* : (C), (D), (E) Zones d'études, respectivement Pica, Pampa del Tamarugal et Huatacondo-Mani.







Les précipitations annuelles moyennes sont proches de zéro sur la côte (0,5 mm), la Cordillère de la Côte (56 mm) et la Dépression Centrale (0,7 mm). Elles augmentent ensuite avec l'altitude, selon un gradient régional de 3,5 mm/100 mètres entre 2000 m (limite inférieure des précipitations) et 3000 m, et de 20 mm/100 mètres au-dessus de 3000 m (DICTUC, 2008). Les précipitations moyennes sont calculée à partir des séries de données supérieures à 30 ans des stations pluviométriques régionales (DGA et Direction Météorologique du Chili) Dans la Précordillère et de l'Altiplano, les précipitations annuelles moyennes avoisinent les 80 mm et atteignent 150 à 180 mm au-dessus de 4000 m asl (Lictevout et al., 2013). Les précipitations dans la Cordillère, l'Altiplano et la Précordillère ont une origine amazonienne (Chaffaut et al., 1998) et se produisent durant l'été austral (décembre à mars). Elles ont un caractère intense et sporadique à l'origine de crues subites. La variabilité interannuelle des précipitations est extrêmement élevée, influencée par des phénomènes globaux, tels qu'ENSO (Montecinos et Aceituno, 2003) (Figure 3).

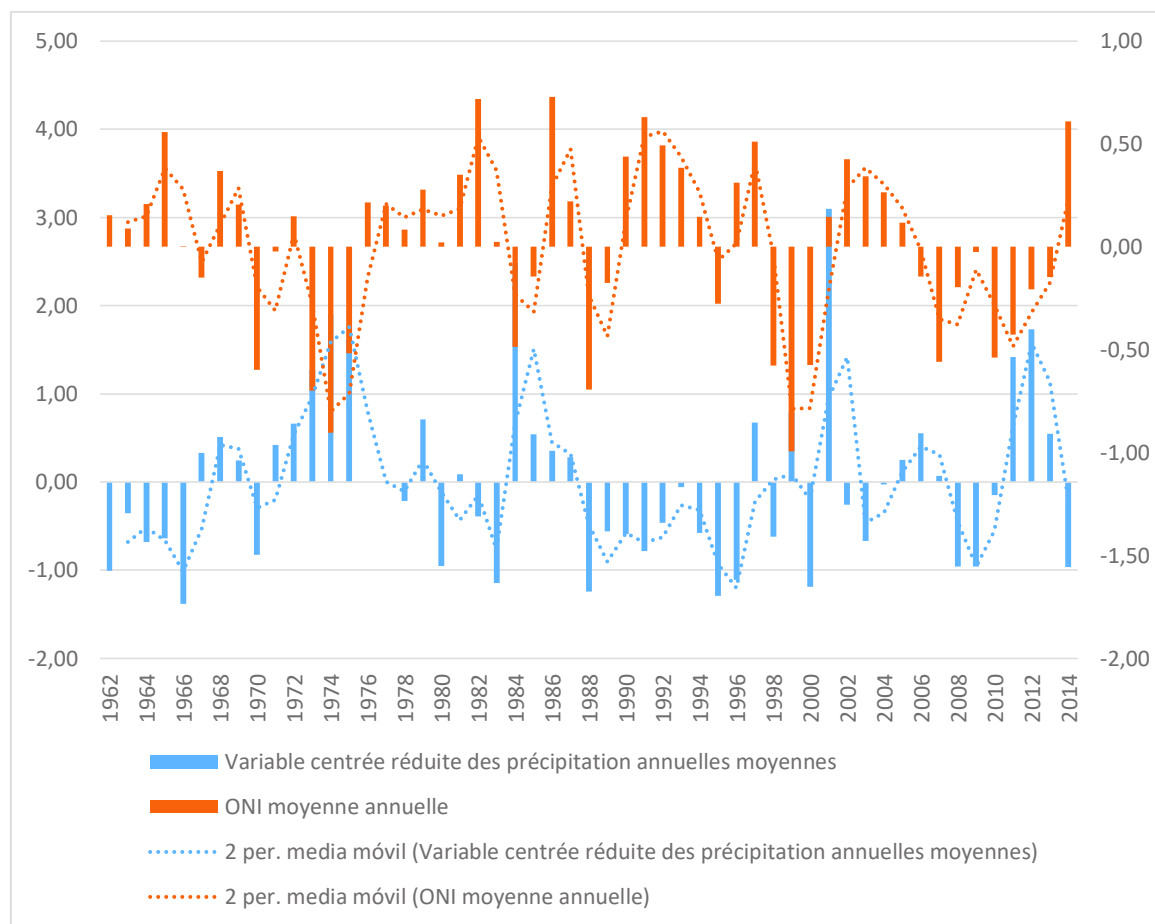


Figure 3: Variations interannuelles des précipitations moyennes annuelles de la station pluviométrique de Collacagua (à 4000 m d'altitude, dans l'Altiplano) et de l'Index Océanique El Niño (ONI). Élaboration propre à partir des données (DGA, 2017a; NOAA, 2017).

Du fait de ce contexte géomorphologique varié et complexe, peu d'infrastructures routières existent dans la partie orientale du site d'étude depuis le Piedmont andin jusqu'à la Cordillère. La majeure partie du territoire est donc particulièrement isolée avec un relief accidenté et escarpé d'accès difficile voire inexistant. Seules les zones d'intérêt économique (mines) offrent de bonnes routes d'accès.

### Contexte géologique

La zone d'étude est située sur la zone de subduction entre les plaques de Nazca et Sud-Américaine. Le soulèvement de l'Altiplano et la conséquente évolution de son flanc occidental (Figure 4) a commencé au début de l'Oligocène il y a environ 30 Ma (Jordan et al., 2010 ; Schlunegger et al., 2010). Ce soulèvement a conduit à l'inclinaison vers l'ouest de la Précordillère et de la Dépression Centrale (Jordan et al., 2010) et a été accompagné d'une importante activité volcanique (Blanco et Ladino, 2012). La Dépression Centrale est un bassin avant-arc rempli de dépôts sédimentaires silicoclastiques non marins et de flux pyroclastiques – ignimbrites - (jusqu'à 1100 m d'épaisseur), produits de l'éruption et de l'érosion de l'arc volcanique de la Cordillère des Andes depuis la fin de l'Oligocène jusqu'à la période moderne (Moreno et Gibbons, 2007). Cette couverture sédimentaire (Formation Altos de Pica) recouvre en discordance majeure le socle volcano-sédimentaire, métamorphique et plutonique pré-oligocène ((Lamb et al., 1997 ; Farías et al., 2005 ; Hartley et Evenstar, 2010 ; Jordan et al., 2010, 2014). La Cordillère des Andes se compose de stratovolcans andésitiques actifs et dormants (Moreno et Gibbons, 2007). La zone côtière se compose principalement de roches ignées du Paléozoïque supérieur et du Mésozoïque.

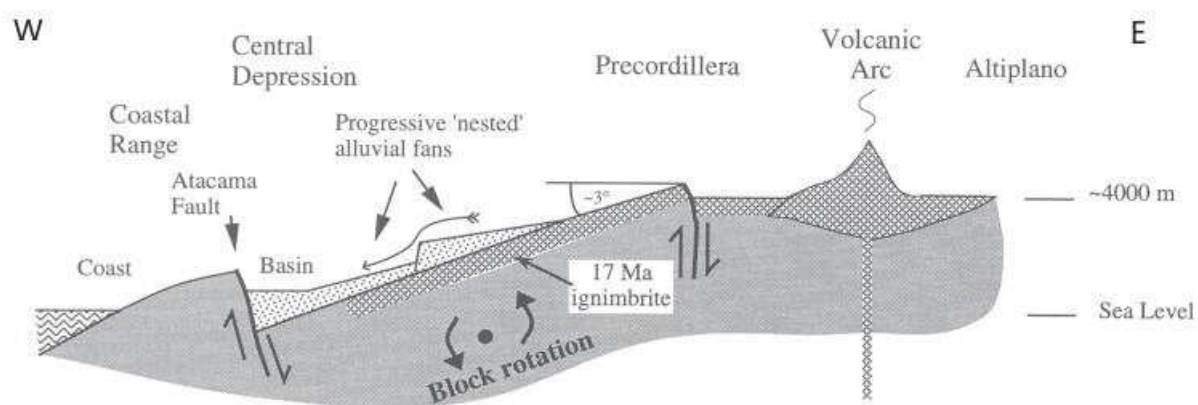


Figure 4: Coupe schématique E-W des mouvements du flanc occidental de la Cordillère des Andes au Plio-Pléistocène, au niveau du bassin avant-arc situé dans le nord du Chili (d'après Lamb et al., 1997)

### Contexte hydrologique et hydrogéologique

L'hydrologie des zones arides est caractérisée par l'aridité et l'endoréisme (Joly, 2006). Le nord du Chili n'est pas une exception avec ses bassins versants endoréiques dans l'Altiplano et la Dépression centrale et ses bassins versants aréiques de la Cordillère de la Côte.

Dans la Précordillère, les sols fins et les pentes abruptes favorisent le ruissellement de surface rapide. Les écoulements se propagent en aval par des vallées et canyons appelés quebradas qui incisent, avec une orientation est-ouest, la Précordillère et le piedmont et génèrent d'immenses cônes alluviaux dans la dépression centrale. La majorité des écoulements sont intermittents, sauf dans l'Altiplano et la zone haute de la Précordillère.

D'importantes réserves d'eaux souterraines se sont accumulées dans les dépôts sédimentaires et volcano-sédimentaires d'âge oligo-miocène de l'Altiplano et de la Dépression centrale. L'aquifère Pampa del Tamarugal (PdT, Figure 2) est considéré comme l'un des plus grands du nord du Chili. Le socle volcano-sédimentaire, métamorphique et plutonique qui en constitue le

substratum, est considéré comme imperméable ou avec une perméabilité beaucoup plus faible que les formations cénozoïques sus-jacentes.

A cause de l'absence de précipitation dans la Dépression Centrale, la recharge est allochtone et provient des précipitations dans la Précordillère et l'Altiplano (au-dessus de 2000 m). Plusieurs modèles de recharge ont été proposés (Figure 5) : Houston (2002) suggère que la recharge provient principalement des circulations sub-superficielles en réponse aux crues périodiques. Cette approche a été utilisée pour élaborer les modèles conceptuel et numérique de l'aquifère PdT (Rojas et Dassargues, 2007 ; Rojas et al., 2010). Magaritz et al. (1990), repris par Pacific Consultant International (1995), Risacher et al. (1998), Jayne et al. (2016), proposent un modèle de recharge régional qui met en jeu des circulations profondes provenant des parties les plus hautes de la Cordillère des Andes et émerge au niveau du substratum de la Pampa del Tamarugal à travers un système de failles. Viguier (2016) propose un modèle de recharge au travers des circulations de surface et souterraines dans le piémont.

Le climat de la zone a été principalement hyperaride depuis  $12 \pm 1$  Ma (Jordan et al., 2014). Plusieurs études ont montré que, durant les 20 derniers millénaires, les niveaux piézométriques dans le désert d'Atacama peuvent être corrélés avec les événements humides dans les Andes centrales (18-8 ka BP), au cours desquels des quantités de précipitations exceptionnellement élevées sont tombées dans l'Altiplano (Betancourt, 2000 ; Rech et al., 2002 ; Gayo et al., 2012). En effet, la datation de l'eau montre que la principale recharge a eu lieu à la fin du Pléistocène et à l'Holocène (Fritz et al., 1981 ; Magaritz et al., 1989 ; Viguier, 2016) avec une recharge actuelle estimée à 10% du volume total de l'aquifère (Viguier, 2016). Autour de Pica, la présence de zones humides indiquent qu'une recharge importante des eaux souterraines a eu lieu entre 12,5 et 8,8 ka BP (Blanco et Ladino, 2012 ; Blanco et Tomlinson, 2013). Par conséquent, une grande partie de la ressource en eau souterraine est considérée fossile.

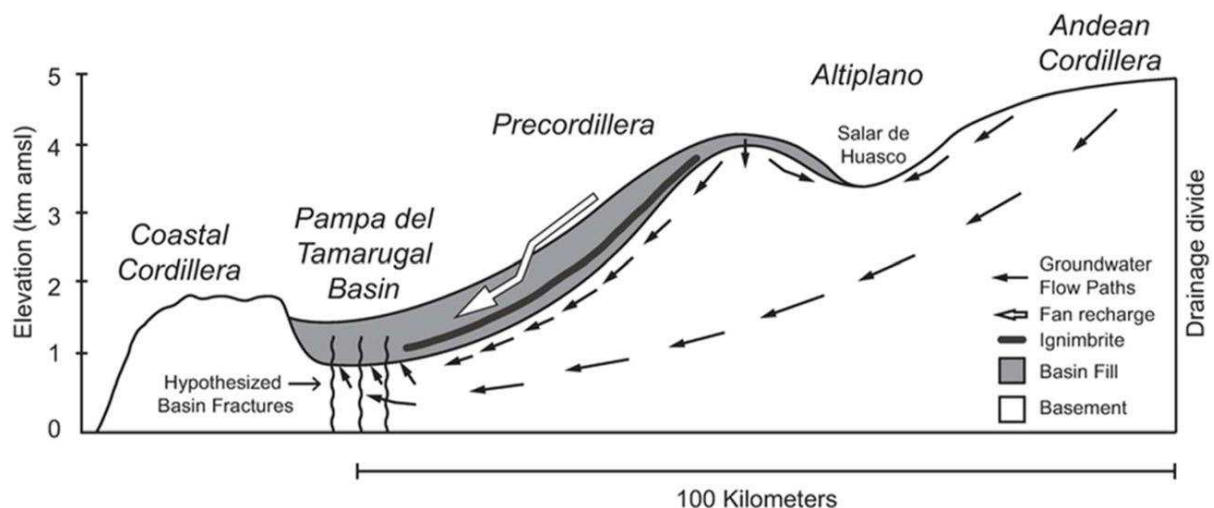


Figure 5: Représentation conceptuelle des circulations souterraines au niveau régional et principaux modèles de recharge de la Pampa del Tamarugal depuis la Précordillère, l'Altiplano et la Cordillères des Andes (D'après Dingman et Galli, 1965 ; reprise dans Magaritz et al., 1990 ; et Jayne et al., 2016).

Les eaux de surface et souterraines de la région de Tarapacá présentent un large éventail de valeurs de salinité naturelle comprises entre 50 et 350 000 ppt (Solides Dissous Totaux). Dans certaines zones, les eaux de surface et les eaux souterraines présentent des concentrations

élevées d'arsenic, de bore et de fluor pouvant atteindre plus de 10 fois les recommandations de l'OMS (WHO, 2011 ; Ferreccio et al., 2013 ; Gamboa et al., 2013 ; Amaro et al., 2014 ; Viguier, 2016). La population rurale locale n'a pas d'autre choix que d'utiliser cette eau pour l'approvisionnement en eau. Les conséquences sur la santé humaine de la population ont été peu étudiées.

Les ressources en eau de la région sont l'objet d'études depuis des décennies mais, curieusement, de fortes incertitudes subsistent à ce jour, de sorte qu'aucun scénario fiable pour l'évolution des principaux aquifères ne peut être établi. Jusqu'à récemment, les limites de l'aquifère PdT n'étaient pas bien définies et l'évolution générale des niveaux piézométriques était inconnue. Les écoulements souterrains et leurs interactions avec les eaux de surface n'ont pas été décrits et sont considérés par l'autorité de l'eau (DGA) comme des compartiments indépendants. Par conséquent, le mécanisme de recharge est mal compris. En général, l'importance de la géologie dans les modèles hydrogéologiques de la PdT est largement sous-estimée (Lictevoud et al., 2013). De plus, toutes les études utilisent les données générées par le réseau hydrométrique régional géré par la DGA, qui présente de graves lacunes (Lictevoud et Gocht, 2017). Mais la plus grande incertitude concerne le taux d'extraction et d'utilisation de l'eau, conséquence directe du manque de prérogatives et de ressources de la DGA pour contrôler les droits d'eau.

#### *Contexte socioéconomique et culturel*

La population de la région de Tarapacá était estimée à 330 000 habitants en 2017 (INE, 2017) soit une densité de 7,1 habitants au km<sup>2</sup>. La population urbaine est fortement majoritaire (93,8%, INE, 2017) concentrée dans trois villes de plus de 10 000 habitants. La population rurale est principalement constituée par les groupes ethniques aymara et quechua dont l'activité principale est l'agriculture de subsistance.

Depuis les années 1990, avec l'installation de grands projets miniers (cuivre dans la Précordillère et nitrate dans la Dépression Centrale), la région a connu une croissance démographique et économique constante (Tableau 1: Croissance démographique de la région de Tarapacá).

Tableau 1: Croissance démographique de la région de Tarapacá

Province	Commune	Resident population				
		Census 1992	Census 2002	Census 2017	% variation (1992 y 2002)	% variation (2002 y 2017)
Iquique	Iquique	144 447	168 397	191 468	13,7	4,1
	Alto Hospicio	5 511	49 436	108 375	119,2	15,0
	Pozo Almonte	6 209	9 407	15 711	67,0	37,0
	Camiña	1 420	1 287	1 250	-2,9	8,6
Tamarugal	Colchane	1 554	1 474	1 728	17,2	45,3
	Huara	1 931	2 522	2 730	8,2	26,0
	Pica	2 332	34 998	9 296	-73,4	130,5
Total région		163 404	236 021	330 558	44,4	40,1

Source : Élaboration propre sur la base des données de l'Institut National des Statistiques

Ce boom économique a induit une augmentation de la demande en eau, à la fois pour l’approvisionnement de la population et des mines qui ont besoin d’eau pour la transformation et le transport du cuivre ainsi que pour la transformation du nitrate.

L'aquifère de la PdT est la principale ressource en eau de la région, exploitée depuis la fin des années 1980 pour l'approvisionnement en eau des populations (principalement la population urbaine via la concession à une entreprise privée), l'agriculture et l'industrie minière. La présence des trois principaux types d’usagers de l’eau génère des conflits et des pressions sur la ressource. Dans ce contexte, la DGA a officiellement déclaré l'aquifère comme "zone de restriction" en 2009 en fonction des droits d’eau déjà alloués dans la PdT (Figure 6).

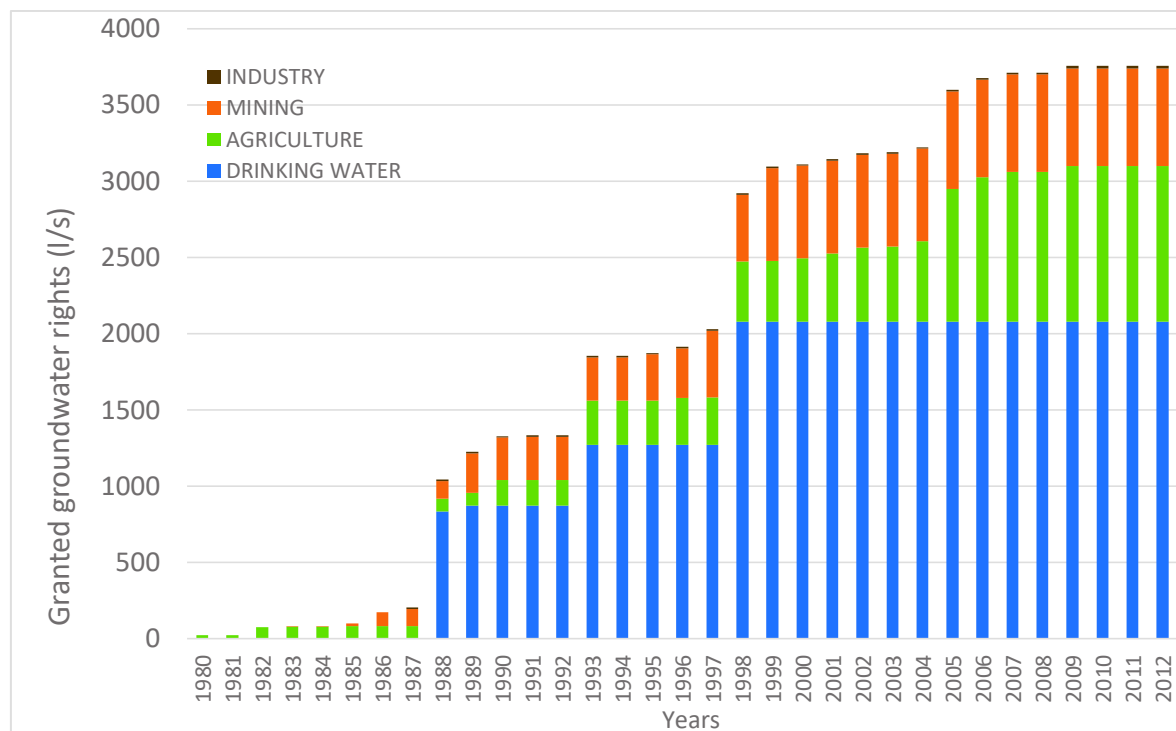


Figure 6: Evolution temporelle des droits d’eaux souterraines alloués (en débit) dans l'aquifère de la Pampa del Tamarugal (Source : Élaboration propre sur la base des données de (DGA, 2017b).

Dans ce contexte de préoccupation pour l'utilisation excessive de l'eau pour les activités minières, en 2010, la Commission Nationale pour la Recherche Scientifique et Technologique (CONICYT) et la Région de Tarapacá ont créé un centre de recherche sur les ressources en eau (CIDERH), sous les auspices de l’université régionale (UNAP), dans le cadre d’un programme national de décentralisation de la science. Ses objectifs étaient les suivants: i) étudier les ressources en eaux de surface et souterraines dans les zones arides en vue de la mise au point d’une approche intégrée de la gestion des ressources en eau; ii) développer des innovations technologiques afin d'accroître l'approvisionnement en eau provenant de sources naturelles et de promouvoir la réutilisation de l'eau.



## 1.2. Les données hydroclimatiques brutes: une source importante d'incertitude

« En zone aride, c'est l'irrégularité qui est la règle » (Joly, 2006).

« Because of the minuscule amounts of water and their meteoric variability the discipline of arid zone hydrology is one of the highest forms of art and science » (Kotwicky, 1986)

### 1.2.1. Analyse des séries de données et informations existantes (modifié Lictevout et Gocht (2017))

Le réseau officiel de suivi hydrométrique de la région de Tarapacá comprend au total 37 stations, 25 stations pluviométriques – dont 12 pluviomètres digitaux (données horaires) et 13 manuels - et 12 stations de jaugeage. Neuf pluviomètres qui avaient des séries de données historiques ont été abandonnés. Sept pluviomètres sont exploités et entretenus par d'autres entités (sociétés minières, armée) qui transfèrent les données à la DGA. L'évaluation de chaque station a permis de constater que 28% des pluviomètres ne sont pas horizontaux, 32% ont des obstacles à proximité (câbles et poteaux électriques, arbres et murs) et 28% des pluviomètres sont situés au fond de vallées ou dans la pente (sous l'effet d'ombre de la pluie) (Figure 7). Ces problèmes conduisent en général à une sous-estimation de la quantité de pluie tombée.



Figure 7: Exemples d'une station pluviométrique (A) et de jaugeage (B) de la Région de Tarapacá

La région compte douze jauges de débit en fonctionnement, treize ayant été abandonnées malgré leur série de données historique. Les stations de jaugeage présentent des problèmes structurels dus à une mauvaise construction et aux effets à long terme de l'eau et des conditions environnementales : l'érosion du fond affecte 66% des stations et 58% ont un mauvais contrôle hydraulique ou présentent des obstacles qui ne permettent pas un flux laminaire. De plus, 33% des stations ne sont pas bien situées ou mal conçues par rapport à leur emplacement (Figure 7).

La durée des enregistrements est très variable, comprise entre un an et 50 ans: seul un tiers des pluviomètres a une série de données supérieure à 30 ans et sont suivis depuis le début sans rupture dans l'acquisition des données (Tableau 1 et 2 en Annexe 2).

La répartition géographique des pluviomètres n'est pas uniforme, ni à l'échelle de la région ni des bassins versants (Figure 8). Sur les 20 bassins versants qui ont une pluviométrie et des



écoulements (temporaires ou permanents), 11 ne disposent pas d'information pluviométrique et le reste n'a pas de données en tête de bassin ; 14 bassins versants ne disposent pas de données de jaugeage, dont certains présentant des écoulements permanents (trois bassins). Aucun bassin versant ne dispose de données de jaugeage à l'exutoire. La densité des stations pluviométriques à l'échelle de l'Altiplano est conforme à la recommandation de WMO (2008) avec 967 km<sup>2</sup> par station. Mais les bassins versants de la Dépression Centrale, du Salar de Llamara et Camiña présentent une densité six fois inférieure en moyenne à ces recommandations, affectant la représentativité des stations concernées.

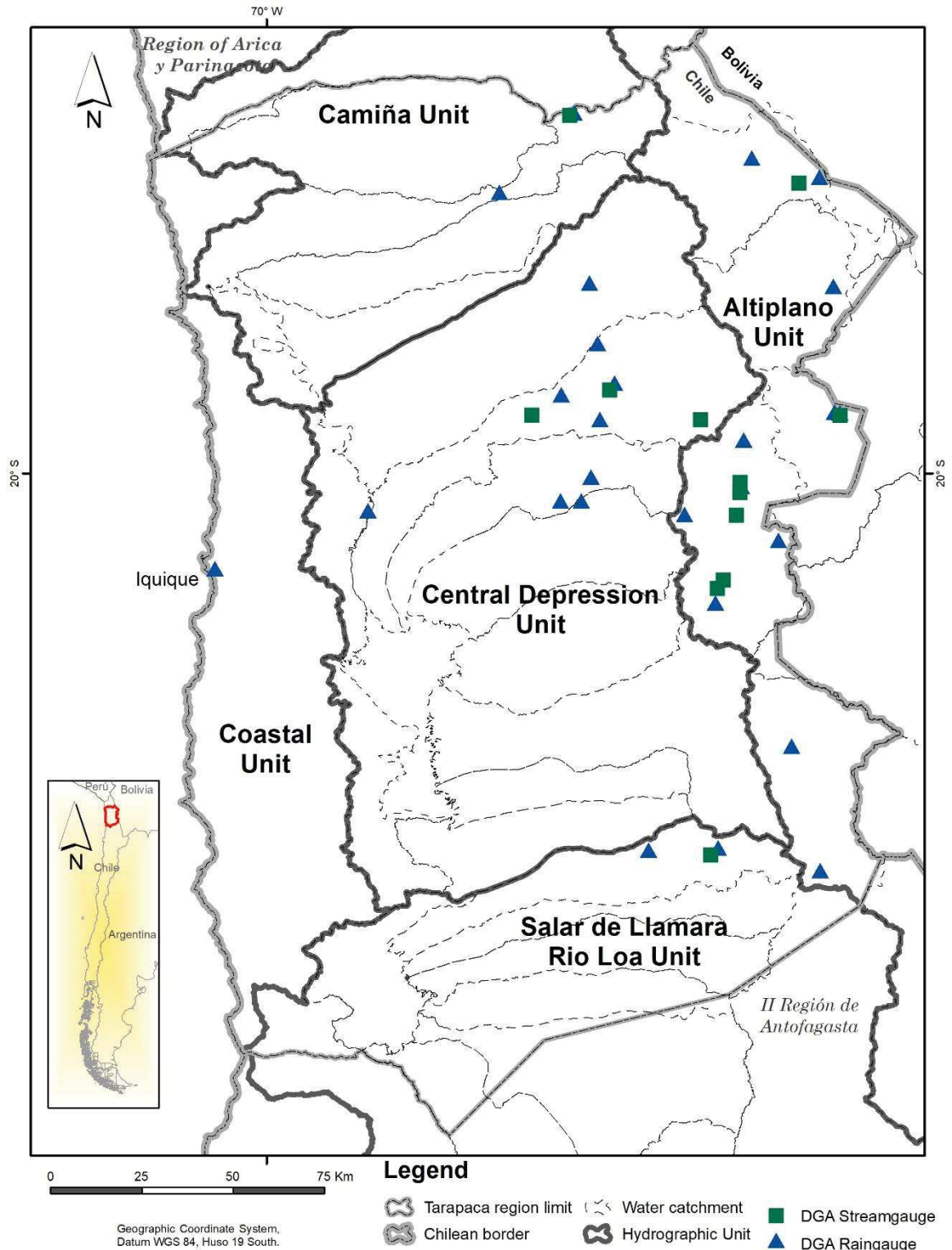


Figure 8: Localisation des stations pluviométriques et de jaugeage du réseau de mesure de la DGA en fonction des bassins versants.

La corrélation entre les données de précipitation des différents pluviomètres de la région est faible sauf dans l'Altiplano (coefficient de corrélation  $R^2$  compris entre 0,8 et 0,95) où les caractéristiques physiographiques sont plus homogènes. Dans la Précordillère, la corrélation est faible, même entre stations proches ( $R^2 < 0,6$ ). Au sein d'un même bassin versant, la

corrélation pluie-débit et la corrélation des débits de stations de jaugeages voisines (amont-aval) est encore plus faible (respectivement  $R^2 < 0,2$  et  $R^2 < 0,4$ ), ce qui signifie que les données de jaugeage ne sont pas représentatives du ruissellement des bassins versants.

Finalement, la région possède 36 piézomètres qui contrôlent seulement deux aquifères (Pampa del Tamarugal avec 34 piézomètres, Salar de Huasco avec 2 piézomètres) sur les 6 aquifères officiellement reconnus (Figure 9). En fait, la région compte beaucoup plus d'aquifères mais ils n'ont pas été étudiés. La fréquence des mesures est trimestrielle voire quadrimestrielle. Dix piézomètres ont une série de données supérieure ou égale à 30 ans, 17 piézomètres ont une série de données comprise entre 20 et 30 ans de 26 ans, huit piézomètres ont une série de donnée entre 10 et 20 ans (Tableau 3 en Annexe 2). Cependant, les caractéristiques des forages (profondeur, zone captée, etc.) et leur stratigraphie sont connues seulement pour 12 d'entre eux, tous localisés dans l'aquifère Pampa del Tamarugal, ce qui rend donc difficile l'élaboration de cartes piézométriques pour le suivi de l'évolution de l'aquifère PdT.



Figure 9: Aquifères de la Région de Tarapacá reconnus et délimités par la DGA et réseau de suivi piézométrique

En conclusion, les séries de données existantes sont peu représentatives des variables qu'elles mesurent, tant d'un point de vue temporel que spatial. Ceci est dû, d'une part, à une trop faible densité de stations, et, d'autre part, à une mauvaise localisation des stations ou à une infrastructure inadaptée. Etant donné que ce sont les seules données existantes, il n'est pas envisageable de ne pas les utiliser. Cela engendre cependant une incertitude difficilement quantifiable sur les résultats d'analyse et/ou de modélisation des hydrosystèmes de la zone d'étude.

Dans une perspective de moyen-long terme, la conception d'un réseau de mesure s'est donc révélée prioritaire.

### 1.2.2. La conception d'un nouveau réseau de mesure en zone aride (Lictevout et Gocht, 2017)

#### *État de l'art*

Design of hydrometric networks has received considerable attention since the 1970s ((Mishra and Coulibaly, 2009). Numerous methodologies have been developed to respond to the diverse problems of network-design in different contexts, usually for temperate areas, characterized by availability of data-records from different sources, abundant resources, easy access and high security. Applicability of a certain method depends on numerous factors: data and budget availability, population density and economic potential of a region, objectives of the network, climatic and geographic characteristics etc. (WMO, 2008) developed guidelines for optimal network design, which include recommendations for minimum densities of rain- and streamflow gauges for different climatic and geographic zones.

For many years, much effort has been put into the development of statistical methodologies (Nunes et al., 2004) that seek to minimize the overall uncertainty about rainfall or streamflow modelling error (Chacon-Hurtado et al., 2016). Among them, the most widely applied methods are the variance reduction approach and the dimension reduction methods. Odom (2003, 2005) used the principal component analysis (PCA) and clustering-based method which allow for the determination of the degree of data redundancy among sampling sites and assessment of the benefits of primary site data collection.

Other widely used methods are based on spatial interpolation techniques: Kriging allows estimation of the value at an unobserved location as a weighted average of observed values based on the key assumption of stationarity (Fisher, 2013). Adhikary et al. (2015) used Kriging for the optimization of a rain-gauge network. They found the removal and relocation of redundant stations to improve network performance. Furthermore, external drift kriging (KED) allows for the use of spatially continuous secondary data to improve the interpolation of primary point-scale observations: Volkmann et al. (2010) improved rainfall interpolation by incorporating secondary stationary (elevation) and dynamic (radar) data. However, the assumptions of stationarity, spatial continuity and homogeneity limit the applicability of statistical and geostatistical approaches to homogenous hydrologic regions. These do not hold in arid and mountainous catchments where biases in the rainfall distribution on both short and long time scales occur (Michaud et al., 1995; Mishra and Coulibaly, 2009; Volkmann et al., 2010).



Entropy-based methods seek to minimize transinformation between stations: observations should be independent from each other. Small transinformation values indicate the stations to share less common information and to be more independent, high values indicate a duplication of information (Mishra and Coulibaly, 2009). The merit of entropy theory is its direct definition of information and quantification of uncertainty (Li et al., 2012), since the purpose of network design is to reduce the uncertainty associated with the estimation of variables at non-monitored locations (Alfonso et al., 2010).

Halverson and Fleming (2015) made one of the first attempts to apply network theory to the optimization of streamflow gauges based on small membership community (efficient measurements), high betweenness (capture of the hydrological processes heterogeneity at larger scale) and index stations with a large number of intracommunity-links (network with some degree of redundancy and therefore resilient to station failure) ((Halverson and Fleming, 2015; Chacon-Hurtado et al., 2016).

Methods using basin physiographic characteristics exploit the correlation between topography and spatial distribution of mean annual precipitation as well as the correlation between rainfall and runoff. The regression equations in many similar regions tend to have similar slope coefficients and similar intercept values, indicating that local climatic conditions govern the relationship between topography and the spatial distribution of precipitation. However, they differ for convective and advective environments (Mishra and Coulibaly, 2009).

Optimization approaches are increasingly used in network design since optimally locating hydrometric stations can be seen as a multi-objective optimization problem where several criteria need to be satisfied simultaneously (Li et al., 2012). The advantage of multi-objective optimization and multi-criteria analysis (MCA) is their provision of different feasible solutions under different scenarios (Alfonso et al., 2010). A wide range of MCA techniques and optimization tools has been applied to hydrometric network design either for maximizing benefit from the network or minimizing its cost. Volkmann et al. (2010) postulate a need for optimization methods in regions where a priori guidelines cannot be applied with confidence. MCA consists of a group of techniques for evaluating, through ranking or scoring, the overall performance of decision options against multiple criteria measured in different units. Weights can be assigned to criteria to differentiate relative importance. MCA techniques improve the transparency, auditability and analytic rigor of decisions (Hajkowicz and Higgins, 2008). Hajkowicz (2007) described MCA process in eight steps: 1) selection of decision options; 2) selection of evaluation criteria; 3) generation of performance measures; 4) transformation of criteria into commensurate units; 5) criteria weighting; 6) ranking or scoring the options; 7) sensitivity analysis, and 8) decision based on MCA model results. Since the 1960s, many techniques have been developed to solve MCA problems. Recent review papers identify hundreds of them (Hajkowicz, 2007; Hajkowicz and Higgins, 2008; Huang et al., 2011). Comparative studies have shown that results from different MCA methods are in close agreement and that there is no clear methodological advantage of any single technique. The techniques most commonly used in the environmental field are multi-criteria value functions, outranking approaches, distance to ideal point methods, pairwise comparison, and fuzzy set analysis.

Other MCA-techniques have been used for hydrometric network design, like questionnaire-based stakeholder surveys or sampling strategies. Surveys allow the assessment of the need to continue or abandon gauging stations depending upon the type of data requirements of the stakeholders in the basin. They highlight a set of parameters, e.g. record length, flood prediction accuracy, data usability for certain projects. The stations are assessed with regard to their contribution to the full set of priority parameters. The higher the total points of a particular station, the higher its relative value and benefit (Davis et al., 2010). Methods driven by sampling strategies investigate the number of gauges, rainfall sampling, and discharge measurement intervals to assess the effectiveness of different sampling options (Mishra and Coulibaly, 2009). For example, for contexts with high space-time heterogeneity of precipitation, Volkmann et al. (2010) propose a high spatial resolution sampling campaign before the network design is accomplished.

In recent years, geographic information systems (GIS) have been increasingly used in network design, particularly as a complementary tool in MCA as reported by Huang et al. (2011). GIS analysis provides a complete set of feasible locations based on geographical criteria, e.g. users' needs, distances, land use, slope, elevation, etc. The capacity of GIS for integrating spatial information makes it well suited for decision-making procedures that have to account for multiple factors (Shepherd et al., 2004).

Mishra and Coulibaly (2009) detected a trend towards the combination of different methods, either using the output from one method as an input into another model or using the different methods in parallel in a MCA. Chacon-Hurtado et al. (2016) proposed a framework for classifying the different approaches. They suggested that the driving criteria should consider model performance in order to ensure that the model adequately represents the states and processes of the catchment, thus reducing model uncertainty. They considered different scenarios, namely station relocation, augmentation and reduction.

Each design-method introduced above privileges certain aspects of the set of features (constraints) that influence the variables to be measured and monitored, or privileges certain criteria that influence the performance of an hydrometric network: access and distance, security, operation and maintenance cost, value of information generated for users, high heterogeneity and variability of rainfall and other hydrometeorological variables, physiographic characteristics, redundancy, gradients, etc. The complete set or subsets of those, based on the context at hand and objectives of the network, may be considered advantageously as competing criteria. Therefore, the optimization of a hydrometric network in a multi-objective optimization framework appears the most promising approach in hyper arid areas.

The overall objective of this paper is to contribute to the improvement of water resources knowledge and management in hyper-arid areas through the development of an MCA-based design methodology adapted to the context. Its aim is to propose a rain and streamflow gauges network for Tarapacá, providing representative, reliable and sufficient hydrometric data for management and planning. Building on an analysis of the existing regional hydrometric network that revealed its deficiencies and their causes, three approaches to MCA are applied and compared: weighed summation, Pairwise comparison and Composite programming. An

optimized network for Tarapacá is developed. The results and the lessons learned during design lead to a discussion of possibilities and limitations.

### *Méthodologie (extrait de Lictevout et Gocht, 2017)*

As a first step, a stakeholder analysis identified the relevant persons, groups and organizations with an interest in the data and information that is and will be provided by the network. Stakeholders were classified into three categories, according to their degree of involvement:

1. Co-operators, actively involved in the network design with direct participation in and contribution to the process.
2. Co-thinkers provide information and inputs to the monitoring network design process and are a source of knowledge.
3. Co-knowers do not play an active role in the process but should be informed about the process and results.

The second step was a critical assessment of the existing regional hydrometric network in order to evaluate the consistency, accuracy and representativeness of the data generated by the network. Besides the density, we investigated whether rain gauges are located in open and flat areas, in an accurately horizontal plane, away from obstructions, i.e. at a distance not less than twice (ideally four times) the height of objects that might disturb the airflow. According to Shepherd et al. (2004), the largest source of rain gauge error, after sampling error, is due to wind-induced precipitation loss. For streamflow stations, we monitored design and structure of the station, including technology and equipment, its hydraulic control, and stability as well as sensitivity of the cross-section.

The third step consisted of identifying the hydrometric network objectives: The main objective is an increase of the hydrometric data utility for basin-wide water management at minimum cost (objective function). Specific objectives were defined in a participatory workshop with local decision-makers.

The fourth step was the selection of decision options (alternative). Existing stations (operational or not) and all feasible locations allowing for installation of a monitoring station were considered as a decision alternative. In Tarapacá, the number of feasible locations is limited due to constrained access in general and to stream morphology in particular: frequently streams exhibit very wide cross-sections with low or intermittent changing gullies, hindering successful installation of streamflow gauges. All feasible locations were identified by GIS analysis and satellite images review first, and validated by field visits afterwards. Given those constraints, at least one feasible location per catchment was sought for (or one per sub-catchment for catchments exceeding 10,000 km<sup>2</sup>). However, in some catchments, even this was not possible.

The fifth step comprised selection and comparison of three MCA-methods: weighted summation, pairwise comparison (Analytic Hierarchy Process) and composite programming. The weighted summation technique as the most simple and widely applied MCA technique (Hajkowicz and Higgins, 2008) is part of the Multi-criteria value functions, often expressed as:

$$u_i = \sum_{j=1}^m v_{i,j} w_j \quad (1)$$

The weights ( $w_j$ ) are non-negative and sum to 1, and  $v_{i,j}$  are transformed performance scores for  $x_{i,j}$  on a scale of 0 to 1 where 1 represents best performance. The overall performance score is given by  $u_i$ .

The pairwise comparison techniques involve comparing criteria and alternatives in every unique pair giving  $n(n-1)/2$  comparisons. The comparisons allow the estimation of criteria weights and decision option performance scores. Various scaling systems are applied. One of the most widely accepted is the Analytic Hierarchy Process (AHP). Decision makers or experts are asked to express preferences for one criteria over another in each pair, e.g. on a nine point scale (Hajkowicz and Collins, 2007).

The Composite Programming technique belongs to distance-to-ideal-point approaches that identify optimum and pessimum values for the criteria and then the decision options closest to the optimum and furthest from the pessimum. Among these techniques, compromise programming employs a hierarchical structure. Criteria that objectively belong together are organized in groups and arranged hierarchically. Composite programming uses a double weighting scheme to consider the importance of the maximal deviation between indicators,  $p$ , specified by the decision maker (Gocht, 2007). If  $p$  is high, only the worst objective value has an influence on the distance (Maniak, 2011). With a smaller value of  $p$ , better compensation of the individual criteria is possible.

$$D(x) = \left[ \sum_{i=1}^n w_i^p \left| \frac{f_{i\max} - f_{i(x)}}{f_{i\max} - f_{i\min}} \right|^p \right]^{1/p} \quad (2)$$

where  $D(x)$  = distance D of the alternative x from the ideal point I;  $f_{i\max}$ ,  $f_{i\min}$  = best (or ideal) and worst (or anti-ideal) value for the target criterion;  $f_{i^*(x)}$  = value of the target criterion;  $w_i$  = weight assigned by experts to the target criterion;  $p$  = compensation factor for each hierarchical group level.

Management options are evaluated by calculating the composite distance within each group of criteria. The preferred design option is that closest to the ideal point in terms of composite distance.

For the three MCA-methods, common evaluation criteria were defined. The criteria weights were estimated by three independent experts.

## Resultats

Une partie des résultat est extraite de l'article publié (Lictevout and Gocht, 2017), c'est à dire « Stakeholder analysis » et « MCA implementation and network design » et « discussion ». La partie « analyse des données et informations existantes » a été un peu plus développée par rapport à l'article.

### Stakeholder analysis (extrait de Lictevout et Gocht, 2017)

Figure 10 presents the results of the stakeholder analysis. Co-operators are generating water related data in the region through monitoring stations. CIDERH, CEH and CDA are research centers focused on water resources, wetlands and fog water respectively. UNAP is the regional University. They are all connected to national and international academic networks, have good relations to local stakeholders and communities but little influence on decision-making. DGA, as per its mandate, manage the official existing hydrometric network. There is no collaboration between water related state institutions; decision-making is centralized at national level and



limited by available resources. The mining companies operate private monitoring stations for their own purposes. They are independent and have strong economic power. They, however, need official operation permits and rights of water use. This leads to a strong influence on institutional decision making and conflicts with communities.

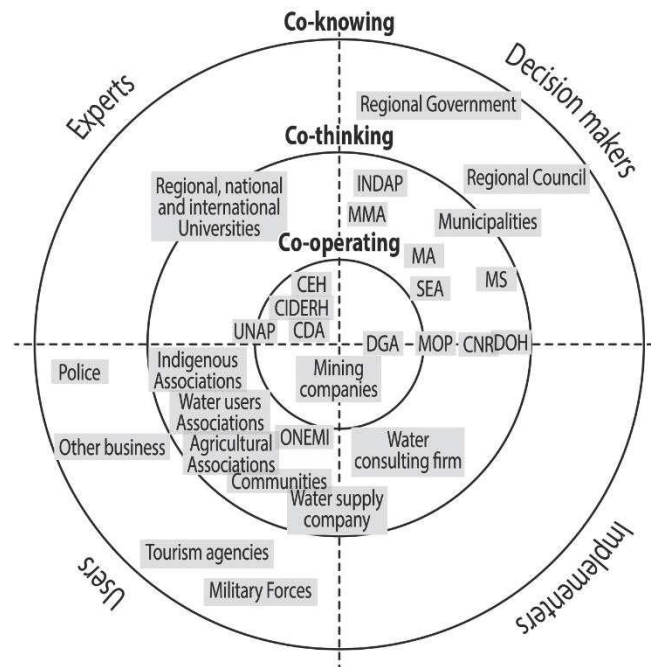


Figure 10: Target scheme of stakeholders involved in water resources monitoring in Tarapacá region

Co-thinkers are all potential water-information users as well as the experts involved in criteria weighing. Co-knowers are regional and municipal authorities. The four quadrants – decision makers, implementers, users and experts – give information on the role of the stakeholders with regard to water resources.

MCA implementation and network design (Lictevout et Gocht, 2017)

Eighty-three decision alternatives were identified for the network, existing stations included (Figure 12a). Given the constraints described above and the comprehensive GIS analysis, we consider this the maximum possible number of decision alternatives in Tarapacá to be evaluated in the following.

Eleven criteria were selected for the evaluation of decision alternatives (Table 2). Each criterion was evaluated quantitatively whenever possible, or qualitatively, according to its unit and evaluation scale (Table 3). The selected criteria were common to the three MCA methods used in this work.

Table 2: List and definition of criteria selected

n°	Criterion name	Definition
C1	Access duration	Time necessary to access the station
C2	Access quality (easiness)	Asphalted roads provide easy and quick access to the locations. Most paths are unpaved tracks but accessible with 4×4 vehicles. Worse cases include unpaved track in bad state and access by foot
C3	Land use/land cover	Station's close environment: open space area or presence of obstacles like trees, building, walls, cables, etc. (for rain gauges)
C4	Drainage area at the station	Stream catchment, after an important stream's confluence or at the outlet of the catchment, based on Strahler's number (for streamflow stations)
C5	Catchment representativeness	Site physiography, i.e. high (over 3000 m a.s.l.) open areas (for raingauges) Type of stream at the site, i.e. major/permanent stream or small/temporary stream (for streamgauges)
C6	Level of correlation between stations	A low correlation (<0.5) means that the data recorded may not be representative of the area or that the distance between adjacent stations is too large for data prediction at ungauged locations. A high correlation between a station and the next closest station means data redundancy ( $r > 0.99$ )
C7	Running and maintenance cost	Additional cost of operating the station (depending on equipment, visit frequency, field mission organization, etc.) and maintenance (cleaning, spare parts, etc.)
C8	Security	Risk of vandalism and equipment theft
C9	Station time in operation	Data record length
C10	Data quality	Data records continuity, quantity of data gaps (which hinder strongly its further use)
C11	Usefulness of the station	Value of data generated by the station for the users, on the basis of user surveys

Table 3: Criteria scale and units

n°	Unit	Scale			
		1	2	3	4
C1	Hours	$C1 > 5$	$3 < C1 \leq 5$	$1,5 < C1 \leq 3$	$C1 \leq 1,5$
C2	Access	<i>Bad access</i> (Only foot access. Station may not be accessible during part of the year).	<i>Regular access</i> (access by 4x4 vehicle but track in bad state. Station may not be accessible during part of the year).	<i>Good access</i> (unpaved track).	<i>Very good access</i> (major road or close to).
C3	Existence of obstacles	<i>Bad location</i> (Presence of trees, building, cables) Station not located in strategic area			Very good location (no obstacles)
C4	Strahler number	(small affluent, before main confluence, etc.). Strahler number = 1	Station located upstream. Strahler number = 2	Station located after a major confluence. Strahler number = 3	Station located at the basin outlet. Strahler number > 3
C5	Location	<i>Bad representativeness:</i> rain gauge in the valley bottom surrounded by hills. Stream gauge on a small and non-permanent tributary.	<i>Regular representativeness:</i> Rain gauge on the hill slope, surrounded by hills. Stream gauge on a small but permanent tributary.	<i>Good representativeness:</i> Rain gauge on the hill slope, with no hill shadow. Stream gauge on a main but non-permanent stream.	<i>Very good representativeness:</i> Rain gauge in high and open areas. Stream gauge on a main permanent stream.
C6	r	$r < 0,5$	$0,5 \leq r < 0,65$	$0,65 \leq r < 0,8$	$r > 0,8$
C7	Currency	<i>High</i> (New station located in area of difficult access)	<i>Regular</i> (new station but in area of easy access)	<i>Low</i> (new station nearby existing stations)	Very low (existing stations)
C8	Risk degree	<i>High risk of vandalism/equipment theft</i> (station out of inhabited area visible from road or major path)	<i>Medium risk</i> (station out of inhabited area but not visible from roads and major path)	<i>Low risk</i> (station located near inhabited areas)	<i>No risk</i> (station located inside a private area)
C9	Years	$C9 < 5$	$5 \leq C9 < 10$	$10 \leq C9 < 30$	$C9 \geq 30$ years
C10	Ratio full years data / total number of years	$C10 < 50\%$	$50 \leq C10 < 80\%$	$80\% \leq C10 < 100\%$	$C10 = 100\%$
C11	Percentage of users' approbation	<i>Low</i> ( $C11 < 25\%$ )	<i>Medium</i> ( $25\% \leq C11 < 50\%$ )	<i>Good</i> ( $50\% \leq C11 < 75\%$ )	<i>High</i> ( $75\% \leq C11 < 100\%$ )

Based on the cross-correlation of paired stations (always lower than 0.95) and minimum station density at water catchment level, we concluded that there are no redundant stations in the network (Mishra and Coulibaly, 2009; Vivekan and Jagtap, 2012). Therefore, redundancy between gauges was not considered as criterion.

A questionnaire was designed for three water resources experts to assign weights to the criteria by scoring them from 1 (lowest) to 5 (highest value) (Table 4). Stakeholder preferences elaborated in the workshop were assessed by experts in this way. The final weight of each

criterion is the mean value of the weights assigned by each expert to this criterion. The process of weighting criteria differs slightly according to the MCA method (Table 4): For weighted summation (WS) and composite programming (CP), the average of weights was normalized so that the sum of weights for each criterion is one. For the Analytic Hierarchy Process (AHP), two criteria are evaluated at a time, in terms of their relative importance. Index values from 1 to 9 are used. A pairwise comparison matrix is elaborated and the weights of the individual criteria are calculated. The weights are already normalized.

Table 4: Criteria ponderation according to the three MCA techniques used in this work

Criteria	Weight		
	Weighted Summation (WS)	Analytic Hierarchy Process (AHP)	Composite Programming (CP)
Access			
01 Access duration	0,08	0,09	0,50
02 Access quality			0,50
03 Land use/cover	0,11	0,1	0,28
04 Drainage area	0,12	0,11	0,22
05 HU representativeness	0,13	0,14	0,28
06 Level of correlation	0,1	0,16	0,22
07 R/M cost	0,08	0,06	0,5
08 Security	0,1	0,08	0,5
09 Time in operation	0,11	0,13	0,33
10 Data quality	0,1	0,12	0,4
11 Usefulness of the station	0,1	0,05	0,27

For the compensation factor, we considered that the data value cannot be compensated and the cost field can only be poorly compensated whereas access and representativeness could be compensated by a better location of the gauge (Figure 11).

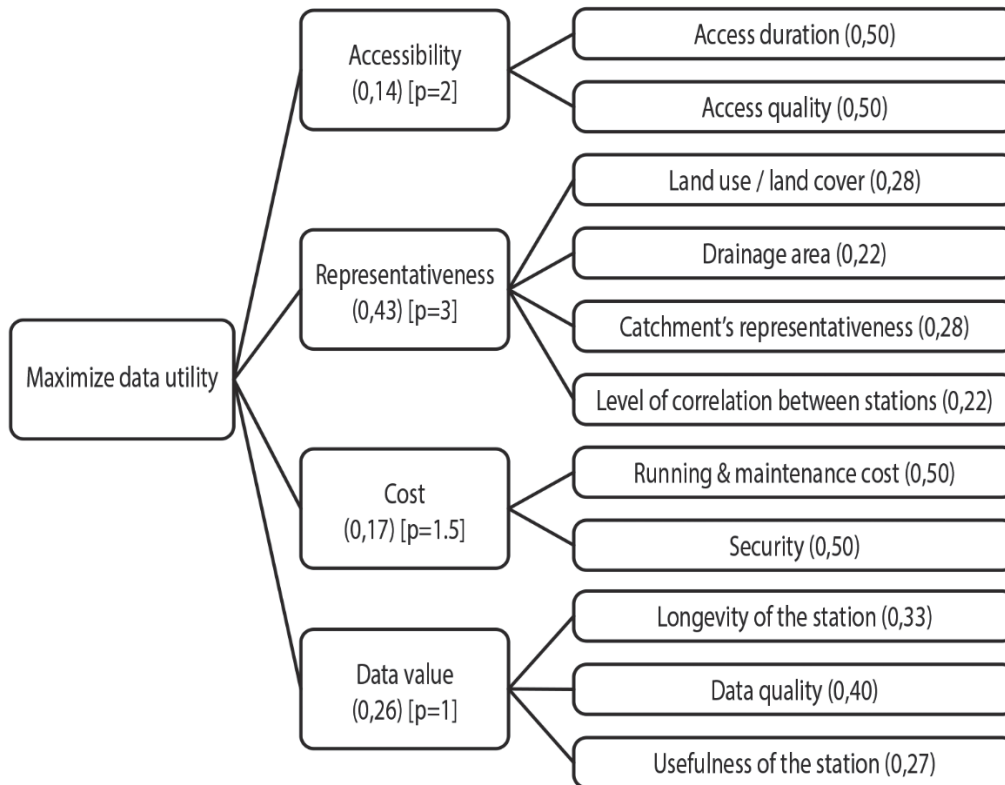


Figure 11: Hierarchical structure, weights (figure in round brackets) and compensability (figure in square brackets) in composite programming

Criteria weights differ according to expert and method. For WS, the criteria with the lowest weights are access of the station and running/maintenance costs. The most important criterion is catchment representativeness.

For AHP, the criterion evaluated as least important is the usefulness of the station, followed by running/maintenance cost and security. The most important criterion is correlation, followed by representativeness.

For CP, we observed that access on one side, and running/maintenance costs and security on the other, have the same weights within their group. Usefulness again has the lowest weight within its group (below station longevity and data quality). Correlation and drainage area are less important than catchment representativeness and land use/land cover. Representativeness is the group with the highest weight (0.43) followed by data value and accessibility

Decision alternatives were evaluated, according to each of the three methods, obtaining a final score for each location.

Sensitivity was analyzed by varying the compensation factors  $p$ . Two sets of  $p$  were applied: different compensation factors for each group and a low and identical compensation factor (1.5) for all the hierarchical groups. Only very slight changes were observed.

Finally, according to the scoring of decision alternatives and context knowledge, the optimal hydrometric network design was selected as presented in Figure 12 (b).



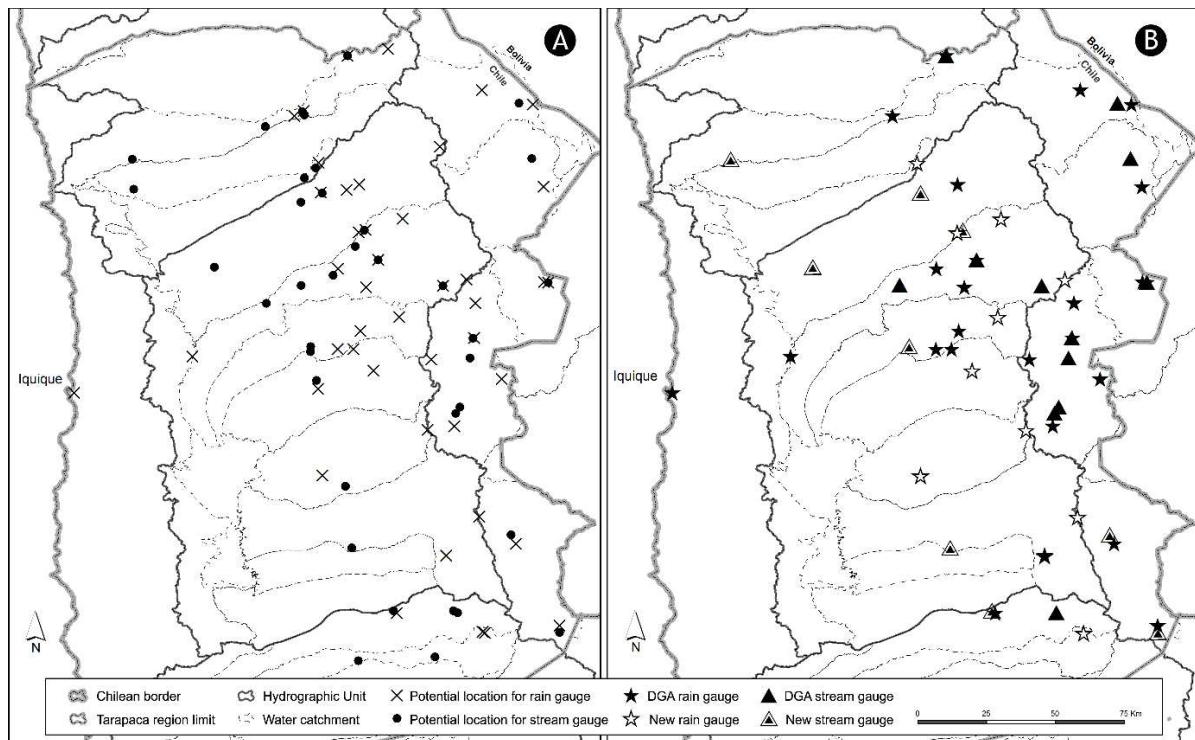


Figure 12 (a) Decision alternatives identified for the network; (b) new optimized hydrometric network of Tarapaca.

### Discussion (Lictevout and Gocht, 2017)

Our study supports the hypothesis that ranking differs only slightly according to the method applied. In general, the group of best scored alternatives is similar for the three methods, although the position within the group may differ. Actually, Weighted Summation and Analytic Hierarchy Process methods give more often similar results than Composite Programming.

AHP and WS emphasize the location of the station (representativeness) while CP prioritizes existing stations with data records over new stations with no or short data records. The sensitivity analysis showed that this difference is not due to the compensation factor.

The challenge of optimizing an existing hydrometric network lies in the trade-off between data value and station representativeness: should a station with long data record be relocated for better data accuracy, consequently losing the historical record? While station relocation is justified for redundant stations, the decision is less straightforward when the problem is a bad sampling site, affecting accuracy and representativeness of the data generated. This problem is more prominent in arid areas, where the high spatio-temporal heterogeneity of rainfall and streamflow entail long data series and a higher number of sampling sites for an appropriate characterization of processes. This dilemma is reflected in the results of the different MCA methods and could be solved by a consensus between experts and main decision makers on the criteria definition and weighting, i.e. stakeholder preferences.

The set of scored decision alternatives included all existing and abandoned stations and feasible locations preselected through GIS analysis and field visits. The preselection of new sites is an important stage of the process with a strong impact on the final results. In our work,

preselection resulted in a complete set of feasible locations in the region and a subset suitable for streamflow station installation.

It is the specific value added by GIS analysis that a set can be considered as complete given the geographical, geomorphological and climatic constraints. Therefore the optimum network is necessarily a subset of the decision alternatives. It might change only due to changing stakeholder preferences, but not due to additional feasible locations.

The optimized network consists of 36 rainfall stations (Figure 12b), versus 25 currently and 21 streamflow stations, versus 12 currently. One rain gauge was abandoned, seven of the 11 “new” rain gauges, are existing rain gauges owned by research centres (four) and mining companies (three). Out of the nine new streamflow stations, three are existing stations owned by mining companies. Financial evaluation was carried out for repairing deficient structures and replacing manual equipment by digital recording devices with data transmission to reduce visit frequency. It was recommended to separate rain gauges from obstructing features where possible. In that way, the implementation of the optimized hydrometric network will add minimal additional burden to the operation and maintenance budget of DGA.

The work demonstrated key points to be taken into account when applying MCA in this domain:

- Different MCA methods tend to reach the same results (alternative scores), with slight differences. This is in line with the literature review.
- These differences seem to originate from the process of criteria definition and weighting, which appears to be key stage of MCA, whatever technique used.

Each expert was asked to weight the defined criteria beforehand. This study corroborated that the process of weighting criteria is subjective and sensitive. Cetinkaya and Harmancioglu (2014) emphasize the subjectivity of the weighting process which is influenced by the “weighters”, therefore directly affecting the results.

Consequently, stakeholder preferences, subject to the context and the objectives of the hydrometric network, should be identified and agreed upon by group consensus between experts and key decision-makers. The stakeholder analysis, being a key success factor in this respect, should be carried out very carefully in order to identify all relevant stakeholders and their role in the process, especially the co-operating stakeholders who will have a preponderant role in the decision-making process. Thus, expert selection should take place during the stakeholder analysis and the experts should be involved from the beginning. Deliberately working out stakeholder preferences is much more important than the choice of the MCA technique. Concerning the techniques used, we note that the process of weighting criteria for the AHP differs to the simple assignation of weight to criteria for weighted summation and composite programming. The comparison of criteria pairs obliges the expert to weight the criteria according to a reference and not individually. Therefore, the weighting will probably be more precise and accurate. On the other hand, the composite programming technique defines worst and best values for each criterion and groups the criteria by affinity. A better valuation of each criterion is carried out, as they are normalized within their group and groups are evaluated hierarchically. Either the compensation factor does not play a significant role, or the process of assigning a compensation factor is more complex than apprehended. Finally,

weighted summation will favor high valued criteria and the alternatives where these criteria have the best values, independent from other criteria for large differences.

With respect to criteria, it is suggested to use the access constraint as a proxy for cost as the operation and maintenance cost is quite difficult to estimate but is directly correlated to it.

### Conclusion

Overall results show little differences between the three methods but identify key issues influencing MCA results, and confirm the appropriateness of GIS-supported MCA for optimizing a hydrometric network in an arid and mountainous context with high constraints and numerous criteria to be met:

- Composite programming is probably the best method for integrating all criteria in the final results. However, the assignation of weights is subjective and AHP shows potential to improve precision and accuracy in the weighting process. Therefore, the best method for this study may be to weight the criteria with the AHP, and then calculate the alternative scores with the composite programming method.
- Criteria should be defined and weighted in a participative and consensual way by experts and a few key decision-makers in order to avoid bias in the individual weighting process. The key stages of the MCA receiving maximum attention are the stakeholder analysis and the determination of their preferences. Therefore, all MCA should start with a comprehensive stakeholder analysis.
- The use of GIS supported MCA for designing or optimizing a hydrometric network in an arid and mountainous area like northern Chile appears to be very appropriate given the constraints of the context and the different criteria that need to be met.

Le défi de l'optimisation d'un réseau hydrométrique existant réside dans le compromis entre la valeur des séries de données et leur représentativité: une station avec une série de données historiques devrait-elle être déplacée pour une meilleure précision des données, perdant ainsi la série historique? Bien que la relocalisation des stations soit justifiée pour les stations redondantes, la décision est moins simple lorsque le problème est un site d'échantillonnage non-adapté et non-représentatif. Ce problème est plus important dans les zones arides, où la forte hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations et des écoulements requiert de longues séries de données et un nombre plus élevé de sites d'échantillonnage pour une caractérisation appropriée des processus. Ce dilemme se reflète dans les résultats des différentes méthodes AMC et pourrait être résolu par un consensus entre experts et principaux acteurs sur la définition et la pondération des critères.

### 1.3. Connaissances locales des ressources en eau et suivi participatif : quelle utilité et comment les intégrer ?

Ce travail est encore en cours d'analyse. J'intègre donc ici un bref résumé de la revue bibliographique, ainsi que l'objectif et la méthodologie pour finir sur une ébauche de résultats et discussion.

Les communautés aymara du nord du Chili ont recours à une grande variété d'indicateurs pour prévoir le climat et s'adapter. Ceci est le résultat de l'observation millénaire de la nature qui les entoure. Cependant, au cours des dernières décennies, les changements rapides du climat et de leur milieu de vie, avec l'arrivée de nouveaux acteurs ayant des intérêts productifs sur les territoires de ces communautés, ont affecté leur capacité de prévision et menacent leur pérennité. En collaboration avec l'ONG locale « Corporación Norte Grande », j'ai initié un projet en 2016 dont l'objectif est de caractériser les processus hydrologiques et hydrogéologiques d'un bassin versant soumis à une pression anthropique forte en tête de bassin (mine de cuivre) afin d'évaluer l'impact de cette pression sur les ressources en eau, et donc sur l'accès à l'eau des communautés. Le résultat est un modèle conceptuel hydrogéologique du bassin versant, le manque de données historique ne permettant pas d'envisager la construction d'un modèle numérique à court terme. Le processus mis en place, autant que le résultat, cherche à donner les moyens aux communautés d'engager une relation plus équitable avec la compagnie minière quant à l'accès et à la gestion de l'information, ainsi que de comprendre les processus en cours et de s'adapter.

Le site d'étude est le bassin versant de Huatacondo (Figure 2) qui alimente en aval l'aquifère du Salar de Llamara, prolongement sud de la Pampa del Tamarugal. C'est une vallée étroite d'orientation est-ouest qui forme un canyon à certains endroits (*quebrada*) et qui incise la Précordillère et le piedmont pour déboucher dans la Dépression Centrale par un important cône alluvial. Une importante compagnie minière exploite l'un des plus importants gisements de cuivre au monde en tête de bassin versant. Deux communautés aymaras vivent dans cette quebrada : Copaquire, situé dans la partie haute du bassin, à 3500 m, en aval de la mine ; et Tamentica, située à l'exutoire du bassin versant, à 1500 m. Une autre communauté (Huatacondo) vit dans la zone intermédiaire et est considérée comme descendante de colons espagnols. Ce bassin versant souffre, à l'instar des bassins versants de la région, de l'absence de données historiques. En effet, le réseau hydrométrique compte seulement une station pluviométrique située à 3500 m asl complétée par une station de jaugeage. Malheureusement, les données de la station de jaugeage sont inexploitable car, située au milieu d'une zone humide, elle mesure le niveau d'eau d'un seul des nombreux chenaux que forme la rivière Huatacondo à cet endroit.

La méthodologie mise en place pour la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de l'hydrosystème se base sur l'utilisation d'outils et méthodes scientifiques pour l'étude des processus hydrologiques et hydrogéologiques : étude géologique, réalisation de profils géophysiques (TEM et nanoTEM), analyses hydrochimiques et isotopiques des points d'eau, essais par pompage, essais d'infiltration (voir 2.3.2). Ces activités sont complétées en parallèle par:

- La collecte d'informations et connaissances locales sur l'eau : De nombreux entretiens non structurés ont été réalisés sur une période de deux ans.
- La mise en place en 2016 du suivi participatif des ressources en eau avec les deux communautés de Tamentica et Copaquire. Pour cela, une première étape a consisté à sélectionner les points d'eau à inclure dans le programme de suivi. La deuxième étape a consisté à définir les paramètres à suivre selon les objectifs de l'étude mais aussi selon les capacités locales et la facilité d'utilisation du matériel de mesure.

### *Premiers résultats*

Ci-dessous, j'ai sélectionné les différents types d'information fournis par les communautés et utilisées pour la construction du modèle conceptuel hydrogéologique de la Quebrada de Huatacondo.

i) La première information concerne une source localisée dans une vallée voisine (Quebrada de Maní) sourd de façon intermittente avec une périodicité de plusieurs années. Les avis divergent sur la durée de la période (estimée successivement à 7 ans, 12 ans et 25 ans) mais tous concordent sur le fait que la source n'a pas jaillit depuis plusieurs dizaines d'années. En outre, quand la source de Maní jaillit, le débit de la source « Milagrosa » de Tamentica diminue alors que les deux sources se trouvent à une distance de 15 km. La première étape a consisté à valider cette information. Plusieurs éléments ont permis de le faire : tout d'abord ces faits ont été confirmés par plusieurs personnes. Ensuite, des vestiges de parcelles irriguées montrent qu'il y a effectivement eu présence d'eau dans un proche passé. La diminution de débit de la source de Tamentica, lorsque sourd la source de Maní ne peut par contre pas être validée.

La deuxième étape consiste à expliquer ces phénomènes (observations) de façon scientifique (en cours). J'ai formulé deux hypothèses quant à la connexion potentielle des deux sources : i) La mise en évidence de paléo chenaux d'orientation nord-sud observés dans les conglomérats de la Formation El Diablo (Miocène supérieur) dans la zone de Tamentica, en rive droite (sud) et rive gauche (nord) (Figure 13). Ces paléo chenaux semblent s'expliquer par la présence de l'intrusion d'une monzodiorite paléogène en aval qui aurait influencé la trajectoire des paléo-flux (voir 2.3.2) ; ii) la présence d'une faille normale d'orientation NNE-SSO qui pourrait être à l'origine de l'émergence côté sud de la source La Milagrosa. Cette faille semble avoir joué au Miocène supérieur au vue de la sédimentation syntectonique observée dans les conglomérats El Diablo au-dessus de la source La Milagrosa. Il aurait été difficile, voire impossible de mettre en évidence la connexion entre les deux sources par les méthodes scientifiques actuelles alors qu'elle se révèle être d'une grande valeur pour l'élaboration d'un modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique.





Figure 13 : (a) Paléo-chenaux de direction Nord-Sud dans la Formation El Diablo au nord des sources de Tamentica (zone aval de la Quebrada de Huatacondo). Les flèches noires indiquent les paléo-chenaux. L'échelle est donnée par la personne en bas à gauche ; (b) Sources et habitations de Tamentica.

ii) Une autre information importante qui a pu être dégagée des informations locales est en relation avec les indicateurs utilisés pour prévoir les précipitations durant la saison des pluies. Un des nombreux indicateurs qui a attiré mon attention est le fait que les communautés ont remarqué que, quand certains arbres en aval verdissent, alors les pluies seront abondantes. Cela rejoint en quelque sorte l'information de Clark et Brake (2009) qui relate que certains propriétaires terriens de la zone semi-aride de Flinders Ranges dans le sud de l'Australie ont observé que le débit de certaines sources augmente avant la pluie. Mes recherches m'ont conduite à envisager plusieurs hypothèses expliquant ce phénomène, que je n'ai cependant pas

encore pu confirmer et valider (en cours) : des changements atmosphériques précèdent la formation de précipitation sur les hauteurs de la Prêcordillère et l'Altiplano, c'est-à-dire une baisse de la pression atmosphérique et une augmentation de l'humidité de l'air. Le premier phénomène entrainerait une remontée du niveau de la nappe qui pourrait donc être atteint par les racines des arbres. Le deuxième permettrait à la végétation d'utiliser l'eau de l'atmosphère. Il faudrait cependant mettre en place le suivi temporel de ces variables (humidité de l'air, pression atmosphérique et niveau piézométrique) pour assurer que ces phénomènes ont lieu à la même échelle temporelle et qu'ils sont corrélés.

iii) La communauté de Copaquire a indiqué que certaines sources, dénommées « ojos » ont un caractère sacré c'est-à-dire qu'il est nécessaire de leur faire des offrandes pour assurer qu'elles continueront à jaillir et à approvisionner la communauté en eau de bonne qualité. L'étude de deux sources de ce type montre qu'elles sont situées dans les zones humides et correspondent à des sources de débordement et d'une qualité exceptionnellement bonne comparée à la qualité des sources environnantes.

iv) Finalement, l'une des informations les plus utiles confiée par les communautés concerne la variation temporelle du débit et de la qualité des sources. Pour chaque source visitée et connue des communautés, celles-ci ont décrit :

- a. La stabilité temporelle ou variation du débit dans le temps.
- b. La stabilité temporelle ou variation de la qualité (perceptible par la communauté : turbidité, aspect, saveur)

Les communautés peuvent différencier les variations intra et interannuelles du débit et de la qualité de l'eau des sources. Une source dont le débit varie entre la saison humide (décembre-mars) et sèche (le reste de l'année), voire sèche à l'étiage présente clairement une dépendance aux précipitations. Une variation de la qualité de l'eau renforce cette hypothèse. Ce cas n'a jamais été reporté sur la zone d'étude. Cela indique que les sources ne dépendent pas des précipitations actuelles. Dans le cas de cultures ancestrales telles que les communautés aymaras du nord du Chili, cette information a une origine transgénérationnelle qui implique des dizaines voire des centaines d'années. Cette information indique donc que l'eau de ces sources correspond à une recharge ancienne et à des temps de circulation de l'eau souterraine longs. Cette information peut être corroborée par l'analyse du Carbone 14 mais constitue un premier résultat très utile au vue du cout de l'analyse du carbone 14.

### *Ébauche de discussion*

Les connaissances locales incluent d'une part une observation de l'environnement de longue durée (historique) dépassant largement les générations présentes car les connaissances se transmettent oralement d'une génération à une autre. Il est donc possible d'accéder à des informations datant de plusieurs dizaines d'années, voire centaines d'années. Dans le cas du nord du Chili, il s'avère que les informations ne peuvent pas être reliées à une période précise (dans la plupart des cas) mais peuvent être interprétées en termes de permanence, continuité. Dans le cas d'une source, l'information importante pour la compréhension des processus est :

- Source permanente (a toujours existé), ou pas.
- Débit et qualité (basée sur le gout, l'aspect comme la couleur) constant ou non
- Phénomènes et évènements influençant le débit et la qualité des sources.

Les communautés ont joué un rôle majeur car, dans la plupart des cas, elles seules connaissent les points d'eau. Il est pratiquement impossible de réaliser un inventaire de sources sans aucun appui local.

Dans un premier temps, le suivi participatif a cherché à générer des données qu'il n'était pas possible d'obtenir autrement pour caractériser la ressource et comprendre l'impact des activités minières. Avec le temps, le suivi participatif des ressources en eau a évolué et s'est transformé en outil de développement. Les données et informations générées ont été utiles pour améliorer et adapter les activités agricoles et intégrer les connaissances locales aux données scientifiques. Cela a aussi servi à placer les communautés comme acteurs essentiels du bassin-versant.

Une des raisons qui limite, voire empêche, la prise en compte des connaissances locales relatives aux ressources en eau de surface et souterraine dans l'élaboration de nouvelles connaissances scientifiques est la recherche par les scientifiques de données quantitatives directement interprétables et intégrables aux modèles numériques. Or cela est impossible en pratique car les observations des communautés ne sont pas mesurées avec une précision nécessaire d'un point de vue quantitatif (e.g. mesure du débit ou niveau d'eau ; occurrence des phénomènes dans le temps). Une autre limite est due au fait que les connaissances locales sont souvent exprimées comme croyances, au travers de la cosmovision des populations. C'est-à-dire qu'elles sont exprimées au sens figuré.

Sur ce dernier point, il est nécessaire de traduire ces informations en une observation de fait concret. D'autre part, les indigènes observent souvent des détails peu visibles à nos yeux. S'il ne faut pas s'attendre à recevoir des données directement exploitables, les observations transmises par les populations indigènes permettent d'identifier et de valider les hypothèses sur les processus hydrologiques et hydrogéologiques et peuvent être intégrées au modèle conceptuel. En l'absence de mesures historiques, les observations locales donnent des informations essentielles sur le comportement à long terme des eaux de surface et souterraine. De plus les connaissances locales peuvent aider à se concentrer sur ce qui est important et permanent.

Deux points sont importants au moment de considérer l'intégration des connaissances locales dans l'élaboration de modèles scientifiques : il est important que les informateurs soient indigènes, c'est-à-dire appartiennent à une culture ancestrale qui entretient un lien étroit avec la terre et l'environnement et qu'il n'y ait pas eu de coupure dans la transmission de l'information (par exemple une génération qui se soit distancée du territoire).

#### 1.4. [Système traditionnel d'alimentation en eau en zone aride : étude des galeries souterraines de l'Oasis de Pica.](#)

Historically, local populations living in drylands relied on the surface expression of groundwater (springs) as well as on small, often temporary, streams. They developed complex hydraulic systems, which enable them to take advantage, as much as possible, of the scarce resources. When springs and surface water were not sufficient or inexistent, survival depended on the possibility to tap groundwater. Among the hydraulic systems that have been developed



in the ancient world, filtration galleries are considered as one of the oldest and biggest achievements of human engineering (Motiee et al., 2006) and the knowledge behind their construction as a wonder of human civilizations (Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki, 2017).

A filtration gallery is a traditional water management system used to provide a reliable supply of water in arid and semi-arid climates (Mostafaeipour, 2010). It is known as *qanat* in the Middle East, *karez* in Paquistan and Afganistan, *kanerjing* in China, *foggara* or *khettara* in North Africa, *viaje de agua* in Spain, *galerias filtrantes* in Mexico, puqui in los Andes and *socavón* in Chile (Bustamante et al., n.d.; Barnes and Fleming, 1991; Palerm-Viqueira, 2004; Motiee et al., 2006; Mostafaeipour, 2010). It consists of an underground and almost horizontal tunnel with vertical shaft wells, which tap and drain groundwater to the earth surface. The water seeps into the wells and tunnels in the saturated area of the aquifer and flow downward by gravity, up to the exit point in order to supply water for domestic purpose and irrigate downslope lands (Figure 14 ; Lightfoot, 1996; Motiee et al., 2006; Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki, 2017).

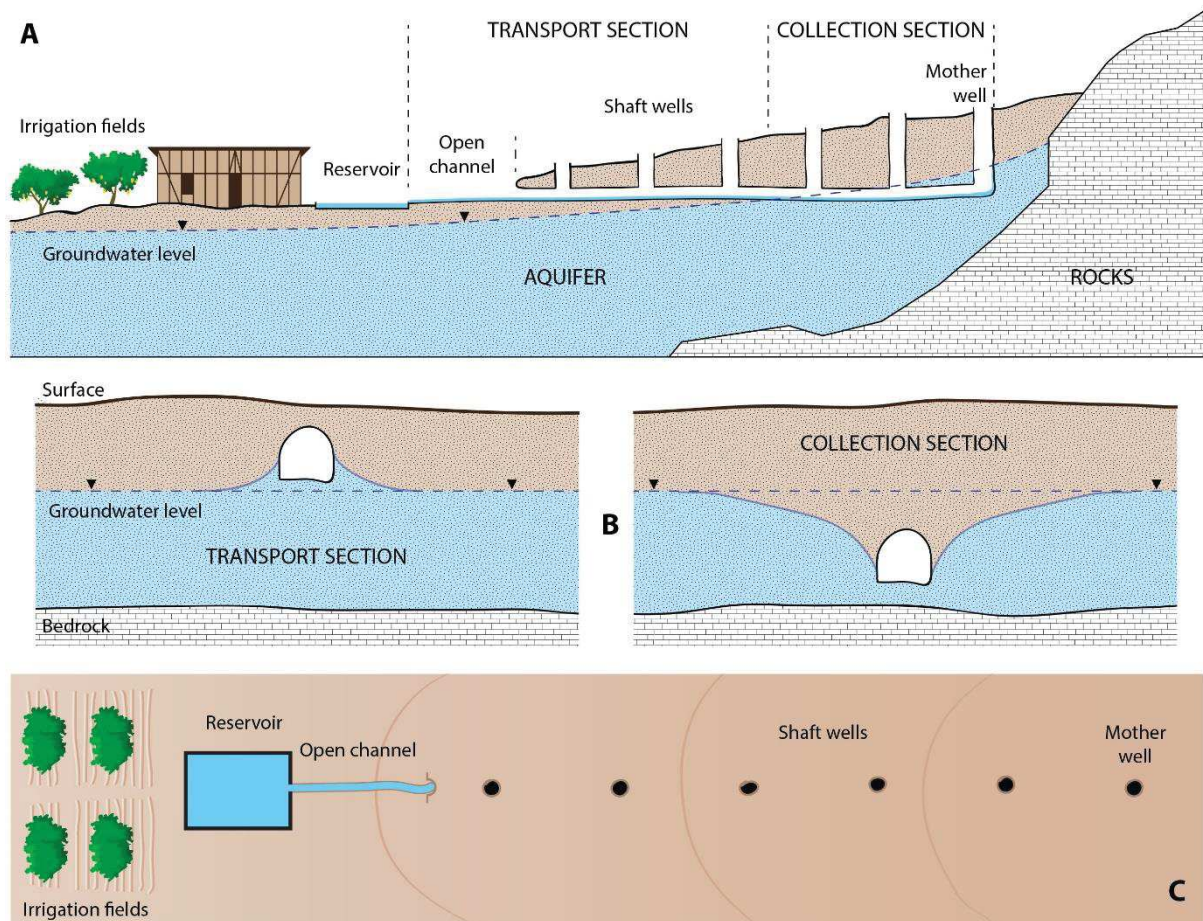


Figure 14 : Diagram of a typical filtration gallery. (A) Longitudinal section; (B) Cross section; (C) Aerial view (modified from English (1968) ; Naghibi et al. (2015)).

If a system lacks either the tunnel or the shafts, it is not a true filtration gallery (Barnes and Fleming, 1991). The shaft wells are located in a sloping ground, and the tunnel, which interconnects the wells at their bottom, has a gradient flatter than the ground gradient. In

general, the first shaft is dug into the aquifer and is called “mother well”. The other wells’ function is to ventilate the tunnel, ease the soil and debris’ extraction of and provide access to the tunnel. Two parts can be defined in the tunnel: a) the water production section, where the tunnel is dug into the aquifer, so the water seeps through the tunnel’s walls, floor and ceiling and b) the water transport section, where the tunnel runs over the water table, down to the exit point (Figure 14 ; Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki, 2017). The extension of the galleries through the aquifer increase the contact area of the tunnel with the water-bearing zone and so the height of the water column in the tunnel. When the tunnel extent is carried out in various directions (side branches), the infiltration area increase and, accordingly, the discharge (Lightfoot, 1996; Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki, 2017). The tunnel meets the surface topography at the exit point. Tunnels are usually 0,6-0,7 m wide and 0,9 m to 1,5 m high (Mostafaeipour, 2010; Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki, 2017). Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki (2017) propose five criteria for the classification of filtration galleries: 1. Length and depth. 2. Topographical condition. 3. Geographical situation. 4. Aquifer type and filtration gallery discharge. 5. Discharge origin.

Filtration galleries tap in general into alluvial fan aquifers at the limit between mountains and plains (piedmont aquifers). They rely entirely on passive tapping of the water available by gravity and, consequently, the natural supply of water in a filtration gallery can never exceed groundwater recharge (Lightfoot, 1996). For this reason, filtration galleries represent a sustainable and low cost water supply system. In many countries, they are nowadays abandoned to the benefit of pumped wells and boreholes (Lightfoot, 1996; Motiee et al., 2006; Mustafa and Qazi, 2007).

The technology was originated in the ancient Armenian-Persian region, about 600-800 BC (English, 1968; Beaumont, 1971; Lightfoot, 1996; Motiee et al., 2006; Mostafaeipour, 2010; Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki, 2017). From then on, it was spread to other regions and cultures as far as Central Asia and China through the silk road (~120 BC), North Africa and Spain through Arab expansion (750 AC), Jordan and Syria through the Roman colonisation and Latin America through the Spanish colonisation (Barnes and Fleming, 1991; Motiee et al., 2006; Mostafaeipour, 2010; Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki, 2017). In Latin America, Spaniards introduced first the filtration galleries in Mexico in 1526 AD (Barnes and Fleming, 1991; Motiee et al., 2006; Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki, 2017) and Potosí (Bolivia) in 1585 AD. Afterward, they were introduced to Peru, North Chile and California. In North Chile, filtration galleries have been identified in four areas: Azapa, Sibaya, La Calera and Pica. The latter includes the galleries of the nearby towns of Pica and Matilla, and the locality of Puquio Nuñez (Barnes and Fleming, 1991).

The filtration galleries of Pica (*socavones*) are the most southern of the continent. According to Barnes and Fleming (1991) they are thought to have been built in the late sixteenth century by miners, although not definite evidence has been produced and the earliest mention dates back to 1718. Billingham (1893) mentioned 13 *socavones* in his publication “The irrigation of Tarapacá” and the discharge flow associated with each gallery. Bruggen (1918) mentioned 23 *socavones* and gave a basic description of their geology, groundwater origin, temperature



and flow. He drew a basic location map, which was the only one in existence. Further studies used the information produced by Bruggen (1918).

Today, the socavones of Pica area are falling into decay. Most are abandoned while groundwater extraction through wells and boreholes increase, leading to groundwater drawdown and salinization. While they are disappearing from local people memories, their exact location remains unknown and many are even not mentioned in the literature. Because of the development of the towns of Pica and Matilla, problems of subsidence and sinkholes appeared, threatening existing infrastructure. Moreover, they were never the subject of a precise description and study, both physical and historical, ruling out the possibility to understand, preserve, highlight and reuse this water management system.

The purpose of this study is to provide the first complete identification and a description of the Pica area filtration galleries. Such information is required for land-use planning, as well as for their preservation and development. Based on the underground exploration and mapping, completed by geophysical prospection, the main characteristics of the socavones were described and discussed along with their geological and hydrogeological context. The findings highlight the originality of the galleries, as water heritage of the Atacama Desert, one of the driest places on Earth. Although they are today mostly abandoned, this study gives also an insight of the potential role that the galleries may still play in the groundwater management of the oasis.

### *Methods*

The first step of the study consisted in the review of the literature mentioning the socavones of the Pica area, the interview of key informants among the Pica and Matilla inhabitants and the review of Satellite images. The key informants interviewed included staff from the Municipality of Pica, the responsible of the Museum of Pica and owners of lands with socavones. The second step was the survey of all the elements belonging to the socavones and visible on the ground surface (entry point, shaft well, well, reservoir, open channel) with an assessment of the access to the underground tunnels. This was followed by the geo-referencing survey of all those elements (third step). The fourth step consisted in the exploration and mapping through a topographical survey of the galleries that were accessible. For this study, tunnels have been accessed from their exit point or from one of the shaft wells when the exit point was blocked. In parallel to the exploration, a geophysical prospection with electric method was carried out (fifth step). Finally, geological and hydrogeological studies of the socavones were conducted (sixth step). Steps one to five were undertaken from November 2014 to January 2015 and the sixth one in July 2017.

### Gallery mapping

An underground topographical survey of the galleries was done using hand-held instruments. The distance was measured with a Stanley TLM 330 laser distance measurer and the section dimensions (height and width) combining a traditional tape with a laser one. The bearing and slope were measured with a Suunto Tandem compass and clinometer. A total of 3,072 stations were measured for an overall distance of 14,537 m of tunnels. The drawing data was processed with Visual Topo 4.7 software.

### Geophysical survey

An underground gallery represents a sub-superficial empty cavity inside a sedimentary formation. The difference between the air (very resistive to insulator environments) and the sediments (relatively conductive environment) produces a measurable resistivity contrast between these two domains. Thus, the use of the direct current (DC) or electrical tomography resistivity (ERT) geoelectric method appears to be an appropriate methodology to identify the underground galleries.

The method consists of the installation of 32 electrodes, which are used to inject current  $I$  (between two electrodes) and measure the potential difference  $V$  in the other 15 pairs of electrodes. This configuration is repeated interchanging the potential-current electrodes, modifying in this way the geometry of the current path and associated iso-potential lines. Using this methodology we are able to map the resistivity distribution along the profile and at different depths of the substratum. The current-potential observations are represented in terms of the apparent resistivity  $\rho$  which is the integration of the in-situ resistivity of the substratum. The physics behind this relation is based on the direct current approximation of Maxwell's equations better known as Ohm's law (see a thorough description of this derivation in Telford et al., 1990). This physical relation provides a simple mathematical expression to determine the apparent resistivity  $\rho$  in terms of the observations (current  $I$  and voltage difference  $\Delta V$ ) (equation 1).

$$\rho = \frac{I}{2\pi\Delta V} G(r_1, r_2, r_3, r_4) \quad (1)$$

The geometrical factor,  $G$ , depends on the relative location of the current electrodes ( $r_1, r_2$ ) and the potential difference electrodes ( $r_3, r_4$ ).

Knowing the apparent resistivity, we can then determine the resistivity of the geological units by 2D modelling. Due to the highly contrasting resistive response of the cavities (very resistive) and the surrounding geology (relative conductor), we can interpret the 2D resistive modelling image in terms of geological units-cavities configuration. Even though this geophysical technique is quite powerful to image the underground geo-electrical distributions, it has some limitations for this application, the most critical problems being: (1) If the cavities are very small (less than 2 m<sup>2</sup>) or at a depth greater than 30 m, the method is unable to resolve due to the very small associated signals; (2) when the tunnel is full of water, the premise of a contrasting geo-electrical response between the cavity and the surrounding geology is no longer valid, due to the fact that water in this environments is always a conductive media.

The geo-electrical profiles were realised perpendicular to the supposed route of the socavon. Between two profiles, a straight line was traced in order to join the two identified cavities. The error on the route is around 5 m on each side of the identified line. Using this methodology, only the main galleries were identified.

The geophysical deployment considers the use of the TIGRE instrument with 32 electrodes separated at a constant distance of 5m, with a Schlumberger-array geometry.

### Geo-referencing survey

The position (latitude, longitude and height) of the elements of the socavones that were visible on the ground surface (exit points, shaft wells, wells, reservoirs) was georeferenced with

centimetre accuracy using a geodesic GPS (Trimble R6 of double frequency). The point used as reference was the geodesic vertex *Matilla 2* of the Ministry of Public Properties. In total, 154 elements were georeferenced. Due to accessibility problems, 15% of the elements were georeferenced with a navigator GPS (with meter accuracy).

## Results

In the area of Pica, including Matilla and Puquio Nuñez (Figure 15), 34 socavones have been inventoried based on the information compiled from the literature (Billingham, 1893; Bruggen, 1918), the interview of local key informants and the review of Google Earth Satelital images. Only 20 galleries are accessible or partly accessible so their exploration has been possible along with the realisation of a topographical survey, completed by the geo-electrical prospection of inaccessible sections for five of them (Figure 15). In some socavones, the water built up and fill all or a big part of the tunnel. In those cases, it has not been possible to explore and map the down sections (San Isidro, El Carmen y Concova). Four socavones are entirely inaccessible but have been identified through a geophysical survey. Ten galleries could not be identified in the field. 85% of the galleries have been identified through exploration and 15% through geophysical survey.

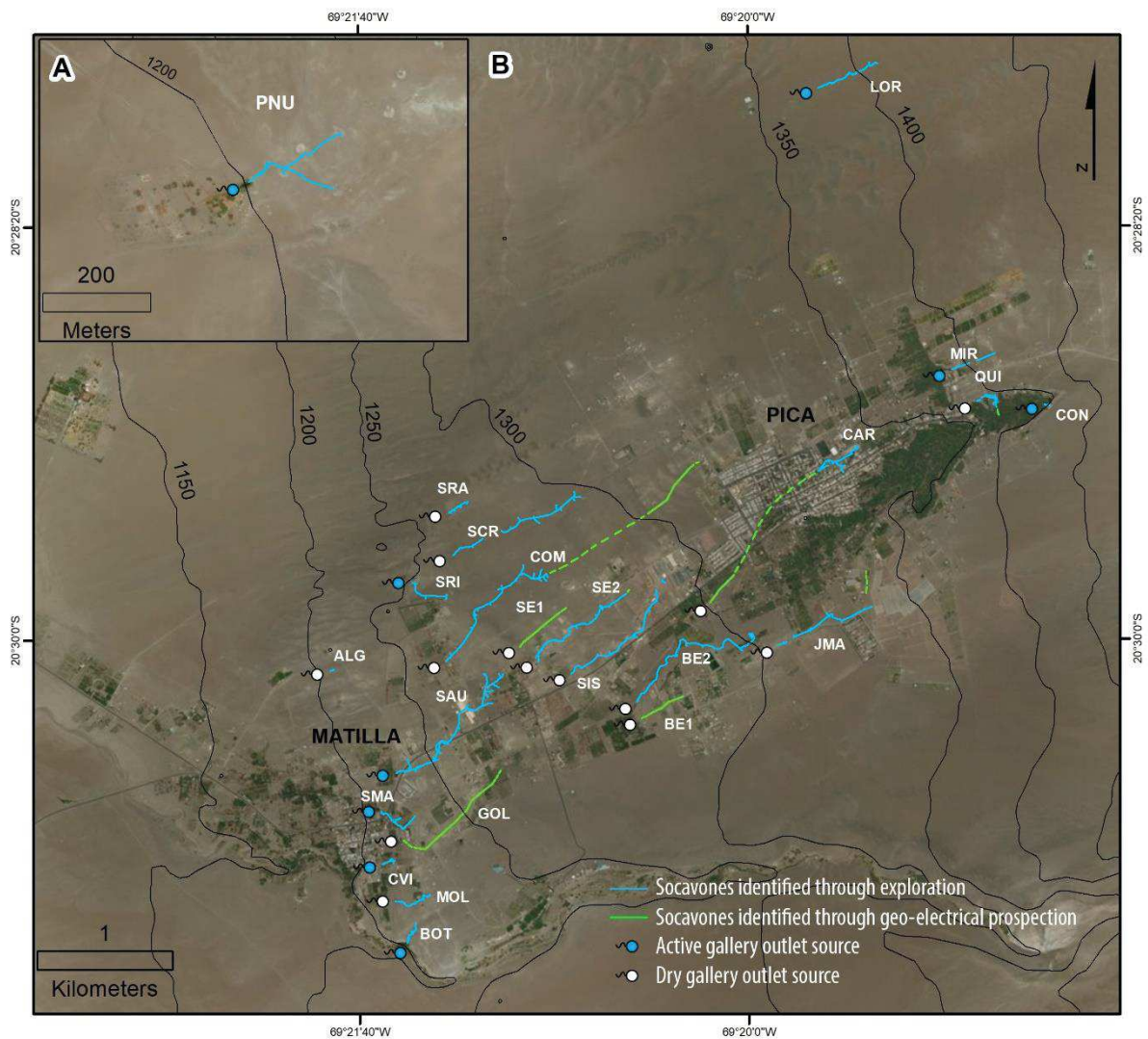


Figure 15 : Map of the identified socavones of the Pica area. Dotted line: Inferred gallery. PUQ: Puquio Nuñez; LOR: Loreto; CAR: Carmen; QUI: La Quinta; CON: Concova; SRA: Santa Rosa; SCR: Santa Cruz; SRI: Santa Rosita; ALG: El Algarrobo; COM: Comiña; SE1: Santa Elena 1; SE2: Santa Elena 2; ISI: San Isidro; SAU: El Sauque; SMA: San Matías; GOL: El Golgota; CVI: Cementerio Viejo; MOL: Puquio el Molle; BOT: Botijería; BE1: Buena Esperanza 1; BE2: Buena Esperanza 2; JMA: Jesús María. MIR: Miraflores.

### Geology and hydrogeology context of the socavones

The socavones are dug in Pleistocene-Holocene alluvial deposits (Figure 16). This formation underlies the modern and active wind deposits and overrides Oligo-Miocene alluvial and volcanic formations.

On the Western edge of the area, the Pleistocene-Holocene alluvial deposits have a paleo-wetland facies. This facies is associated with a regional structural height (Longacho flexure, Figure 16) which constitutes a natural barrier to the groundwater flows coming from the East (Altos de Pica) through the Oligo-Miocene formations. Underlying impermeable layers allow the formation of a shallow aquifer in the Pica basin with the emergence of thermal springs. Although recharge occurs in the nearby Precordillera (Altos de Pica), mean groundwater residence-times based on the  $^{14}\text{C}$  isotope analysis shows that the main recharge has happened during the Pleistocene and Holocene wet phases (Fritz et al., 1981; Magaritz et al., 1989; Viguié, 2016). Therefore, the groundwater is considered mainly fossil.



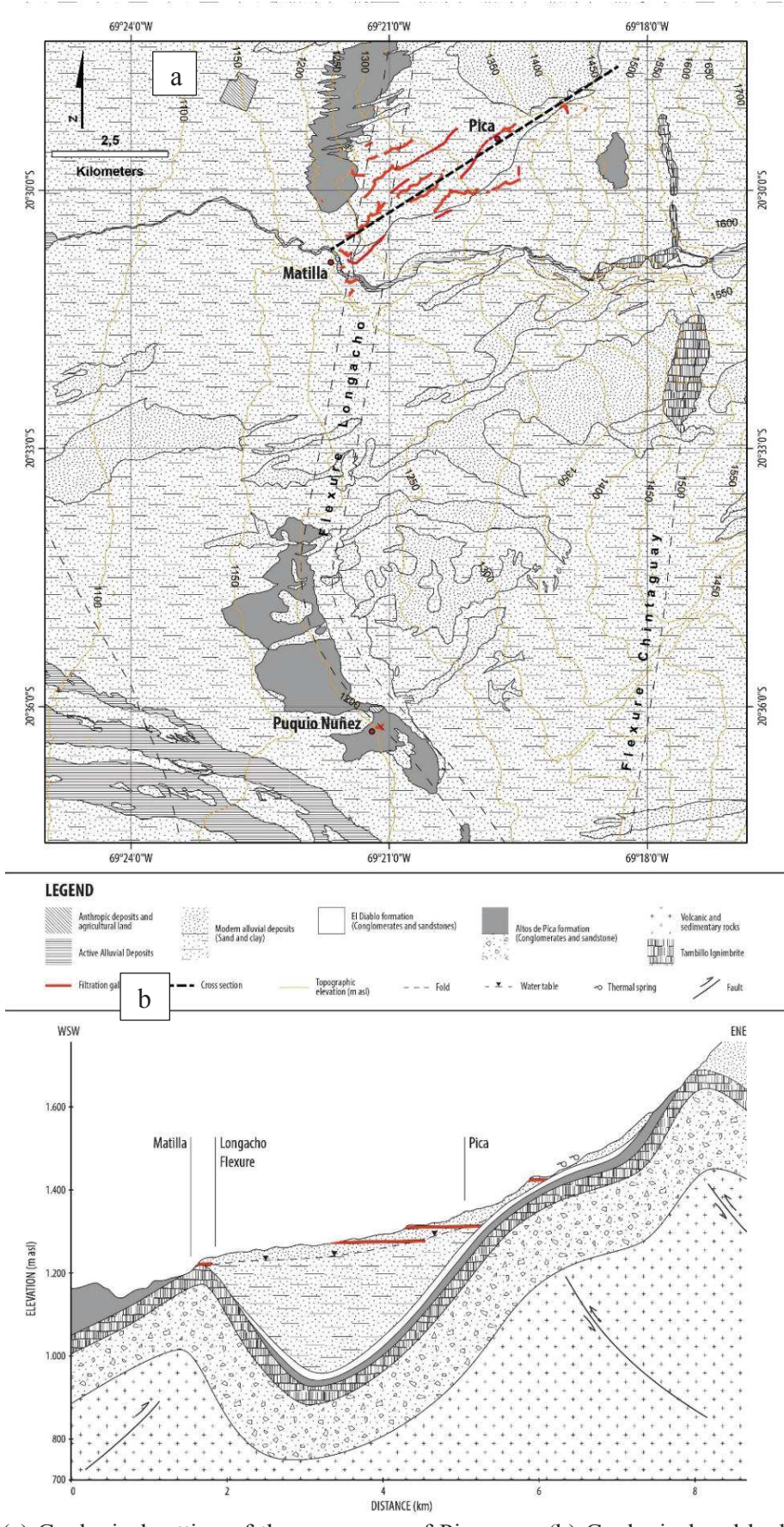


Figure 16 : (a) Geological setting of the socavones of Pica area; (b) Geological and hydrogeological Cross-section. Vertical exaggeration of x 5.25



The Pleistocene-Holocene alluvial deposits consist of poorly consolidated sands with intercalated layers of clay and silts. The socavones located near the Longacho Flexure, which exit point is located in the escarpment on the western side of the flexure (San Matias, Cementerio Viejo, Puquio El Molle), have in common that they come across the upper end of the ignimbrite layer from the Oligo-Miocene formation (associated with the height of the flexure). They, then, come across layers of clay intercalated with the poorly consolidated sand, which correspond to the water production section. The socavones located at the northern and southern edges of the area (Loreto and Puquio Nuñez) show similar geological pattern, although with some differences. Loreto is not located close to the Longacho flexure but over a similar structure. The gallery comes across an ignimbrite conglomerate layer, which obliged the workers to continue the tunnel overriding it, 2 meters higher than the initial main gallery. On the west side of the structure, the gallery come across intercalated layers of clay. In Puquio Nuñez, the tunnel did not cross ignimbrite rocks (probably much deeper at the Southern edge of the flexure) but important layers of clay intercalated with poorly consolidated sand in the water production section. The socavones located in the center of the basin of Pica-Matilla are dug in homogeneous and poorly consolidated sand layers.

The groundwater tapped by the socavones circulates within two types of aquifer: the porous material of the Pleistocene-Holocene formations, which forms a shallow aquifer limited downward by layers of clay; and the fractures in the conglomerate and ignimbrite formations, which feed the shallow aquifer.

In many galleries, precipitation of calcium carbonate covers the walls and floor of the tunnels in different proportion. Some tunnels are totally covered with calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) sediments. The most spectacular is El Carmen (Figure 17 a et b). Here, the Calcium carbonate precipitates in the form of Aragonite. The precipitation and sedimentation of Calcium carbonate is in relation with the velocity of the groundwater flow. Groundwater with soluble calcium bicarbonate precipitates calcium carbonate when flowing at high speed. Indeed, the sedimentation occurs mostly after a section with a steeper gradient or a step. Additionally, in five socavones, a sedimentation of Manganese oxide ( $\text{MnO}$ ) has been observed on the walls, floor and sometimes ceiling of the tunnel. When both sedimentation occurred ( $\text{CaCO}_3$  and  $\text{MnO}$ ), the tunnel sides are covered first by manganese oxide, itself covered by Calcium Carbonate. The height of sediment on the wall shows the past water seepage and level in the gallery. The fact that some galleries show sedimentation, and others do not, evidences different groundwater composition. Indeed, precipitation of  $\text{CaCO}_3$  occurs in the galleries were ignimbrite has been found and groundwater circulates through fractures. Some socavones show abundant traces of roots, replaced by iron hydroxide, carbonates or silica (Jesus María, El Sauque and Botijería). It is also possible to find stalactites (but no stalagmites) as well as small pisolites (pearl caverns) and tiny gours or rimstone dams' formations on the galleries floors. The stalactites are mainly soda straw type with 5-6 mm thick and up to 30 cm long. Other drapery, curtain or bacon rind stalactites, also small size, are visible (Figure 17 c).

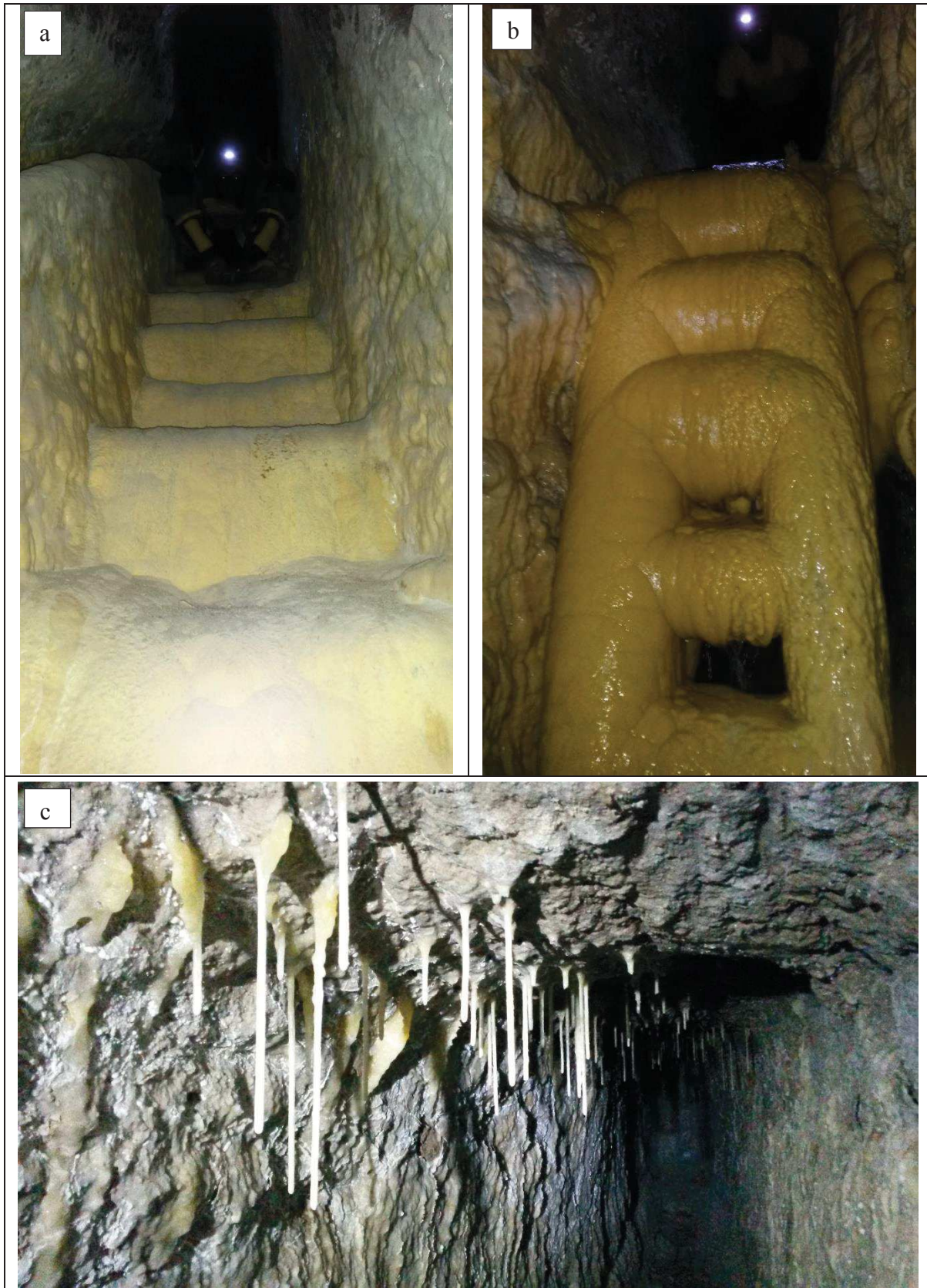


Figure 17 : (a) y (b) Calcium carbonate covering carved steps and ladder in El Carmen socavon. (c): Stalactites in San Matías

Although only seven socavones, out of 24, still discharge water today, 17 have groundwater flowing in some sections of the tunnels (70%). Nevertheless, the water level is today much lower than it has been in the past, as evidenced by the marks left by the water on the tunnel sidewalls. Billinghamurst (1893) and Bruggen (1918) reported a similar total discharge of the socavones, around 40 l/s. This flow was much lower than the total discharge from the springs of the oasis, reported to be 92 l/s in 1865 and 119 l/s in 1918. A rough estimation of the groundwater flow in the active galleries today give a total discharge at least 50% lower than in 1918 (around 18 l/s). Some gallery's flow is lower than 0.1 l/s. A reduction of the flow, even the drying up of some galleries, has been observed between January 2015 and July 2017 field campaigns. However, in three socavones, water fill the whole tunnel section (Carmen, San Isidro, Cementerio Nuevo). This may be due to the blockage of downward tunnels by sediments so the groundwater builds up to the water table level.

#### Characteristics of the socavones of the area of Pica

The 24 socavones identified sum up a total gallery length of 18.2 km (main tunnel and side branches; Table 5). Taking into account the unidentified galleries, the total network of the socavones is expected to cover a distance of 20 km.

- Physical features

The longest socavon (main tunnel) in the Pica area is Comiña with 2 435 m (Table 5). The shortest is El Algarrobo with 27 m. Six socavones have an extension over 1 000 m (Comiña, El Carmen, Buena Esperanza II, El Sauque and San Isidro). For both Comiña and El Carmen, a section in the middle part of the galleries could not be neither accessed nor identified through geophysical survey so the length was estimated approximately.

The topographical survey identified 224 side branches in the 20 socavones, with a total length of 2 480 m (Table 5). For the ones explored through geo-electrical survey, only the main tunnel was identified. So, 12 galleries (Miraflores, El Carmen, Jesús María, La Quinta, Cóncova, San Isidro, Santa Elena I, Santa Elena II, Comiña, Santa Cruz, Gólgota y Buena Esperanza I) probably have a total gallery length higher than specified in Table 5.



Table 5 : Main characteristics of the socavones of the area of Pica

Name	ID	Main tunnel length (m)	Total galleries length (m)*	Number of shaft well*	Number of side branches*
Santa Elena I	SE1	380	ND	6	ND
Cementerio Nuevo	CVN	ND	ND	3	ND
Golgota	GOL	850	ND	3	ND
Buena Esperanza I	BE1	350	ND	ND	ND
Comiña	COM	2435	3007	17	27
El Sauque	SAU	1267	2293	8	40
El Carmen	CAR	1974	2291	5	17
Buena Esperanza II	BE2	1317	1482	8	4
Santa Cruz	SCR	1133	1509	12	18
San Isidro	ISI	1075	1334	10	18
Santa Elena II	SE2	984	1178	7	13
Jesús María	JMA	837	986	6	18
Loreto	LOR	534	786	10	22
La Quinta	QUI	289	536	3	9
Santa Rosita	SRI	344	453	1	12
San Matías	SMA	406	545	0	2
Puquio Núñez	PUQ	218	398	8	12
Puquio El Molle	MOL	333	356	1	1
Santa Rosa	SRA	204	257	4	7
Botijeria	BOT	186	241	1	4
Miraflores	MIR	220	220	3	S/D
Cementerio Viejo	CVI	95	144	0	3
Socavón Concova	CON	48	86,3	0	4
Socavón El Algarrobo	ALG	27	27	0	0
<b>TOTAL</b>		<b>15 506</b>	<b>18 129</b>	<b>116</b>	<b>227</b>

\* ND: No data

Almost all the socavones have a SW-NE orientation, running parallels to the direction of the maximum topographic gradient. The only exceptions are Botijería (near NNE-SSW direction) and La Quinta (which turns with a right angle from its initial E-W direction). Beside the general SW-NE direction, the socavones are not straight lines between the exit points and the end of the main gallery but rather a curvy path. Today, due to the growth of both Pica and Matilla towns, and the absence of knowledge about the localisation of the socavones, several infrastructures have been constructed over them. In particular, the town of Pica has developed over the gallery El Carmen leading to the subsidence of the ground and formation of sinkholes.

The tunnels are generally narrow and tall with a regular and average width of 0.8 m. This is slightly wider than the shoulders' width of an adult, which is not too narrow for the gallery to be access comfortably and not too wide, which would mean unnecessary digging and longer construction time and cost. The height of the tunnels is more variable, 1.8 m on average. Some galleries (or sections) are only 0.5 m high (sections of El Sauque, end of San Matias, one gallery of Jesús María). The maximum gallery height is 7 m in Loreto, Puquio el Nuñez and Buena Esperanza II. In those cases, it is likely that the initial tunnel's ground was dug deeper to

increase the gallery's flow as shown by the niches done in the walls for the lamps, which are now out of reach.

The slopes of the tunnels vary according to the socavones. Most of them have an optimal gradient according to Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki (2017), i.e. between 0.2% and 0.5% (Comiña, El Carmen, Buena Esperanza II). But some galleries have a higher than normal gradient, above 0.5% (Sauque and Puquio Nuñez with 0.9%), even above 1% (Loreto with 1.35% and San Matías, with 2.6%). A higher gradient may cause the erosion of the tunnel ground. In all the galleries with a higher slope, a hard rocky layer of ignimbrite (volcanic rock originated by pyroclastic flows) is present, except in Puquio Núñez. This is due to the fact that, when the workers came across a layer of ignimbrite, it was probably impossible to continue digging the tunnel. To avoid abandoning the gallery, the only option was to bypass the obstacle. In those cases, workers dug upward at a right angle and then get horizontal again and dug forward so the tunnel carries on over the rocky layer (Figure 18).



Figure 18 : Steps in the main galleries. Left: Socavon San Matias. Right: Socavon Loreto

The identification of the main tunnel where there are many side branches was sometimes complex. In some cases, the main gallery was identified because an iron sign with the mention "matriz" (that can be translate as principal from informal Spanish) was found. Probably the iron-sign helped the orientation of new workers or for emergency purposes. In other cases, the main gallery was defined based on its aspect of spine, or because it is the longest or the gallery



with the last shaft well. Many socavones have side branches in the water production section, especially at the end of the main gallery (Figure 20A). The discharge flow of the socavon can be increased by digging side branches that feed into the main tunnel. The main tunnel and side branches end abruptly in general, with two or three horizontal holes which purpose was to increase the draining area and the water flow.

The directions and lengths of the side branches are very variable. Many of these galleries were intentionally covered, semi-buried or permanently sealed with stones and few with cement. The reason behind is probably that they were or become dry and then used for the evacuation of sediments (so avoiding the need to carry back soil extracted up to the surface).

Sometimes the tunnel ground is covered with a channel made of baked clay tiles in the water transport section (Santa Elena, Comiña, Figure 19). This technique was used to facilitate the groundwater flow and prevent filtrations in the water transport section (through the porous material in which was dug the gallery or through fractures in the hard layers). In recent years, some tunnel grounds have been covered with plastic sheeting or water is conveyed through PVC or cement pipes in order to prevent a loss of flow through filtration (Loreto, San Isidro, Puquio El Molle).



Figure 19 : Baked clay tiles channel in Comiña socavon.

- Ground surface elements of the socavones

Besides the underground tunnels, the socavones have also a number of elements that are visible on the ground surface. In Pica area, 154 points related with the socavones were identified in the field and georeferenced. Those points are either shaft wells (called *Lumbreras*, which literally means luminary), exit points, wells or reservoirs (Figure 20).

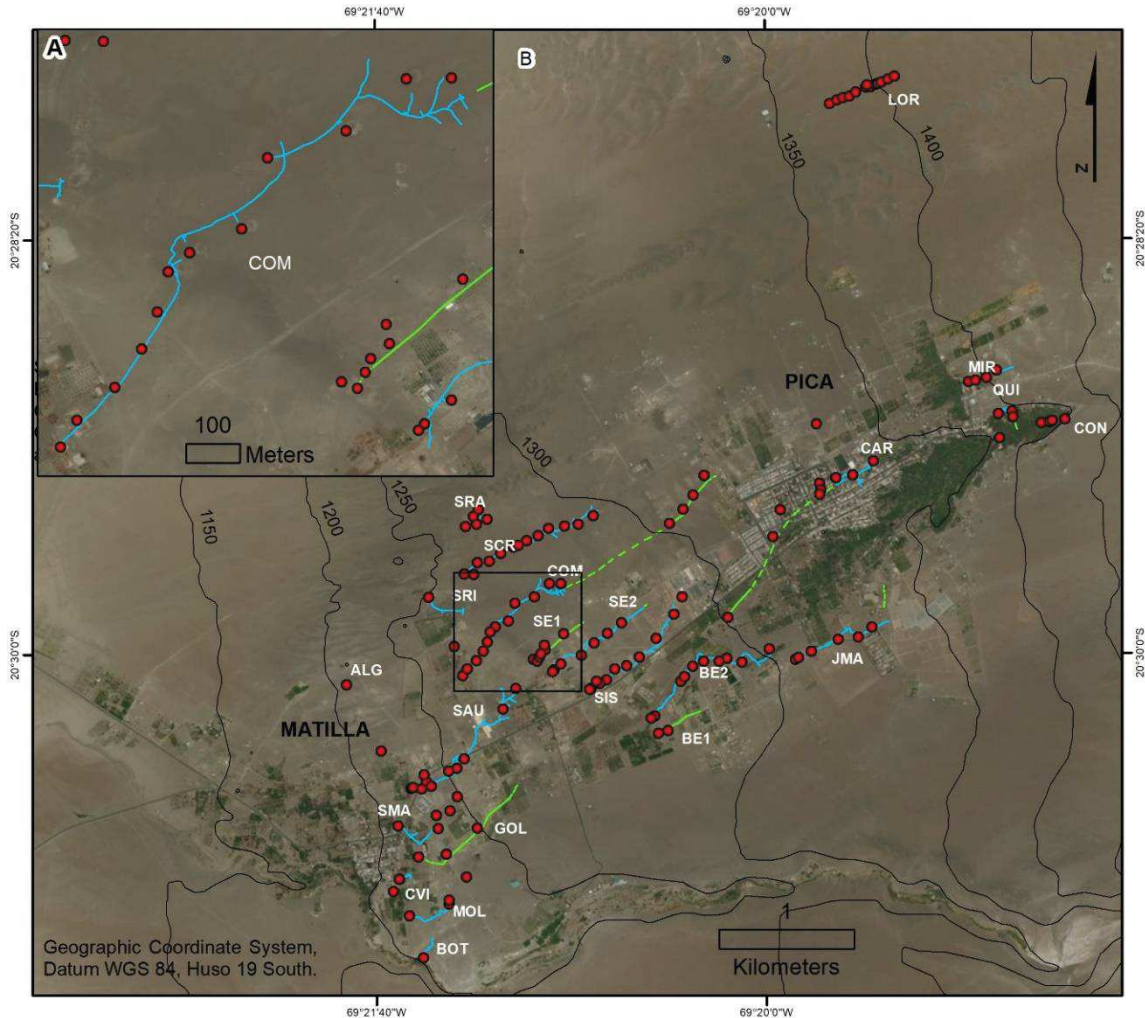


Figure 20 : Elements of the socavones visible on the ground surface (the area of Puquío Núñez is not represented on the map).

In most cases, below the tunnel exit point, there is an open channel connecting the tunnel with a reservoir and then with the cultivated land (*chacras*). Although most of the socavones do not discharge anymore water and the infrastructure and the *chacras* are abandoned, their remnants are often still visible through Satelital images (Figure 21).

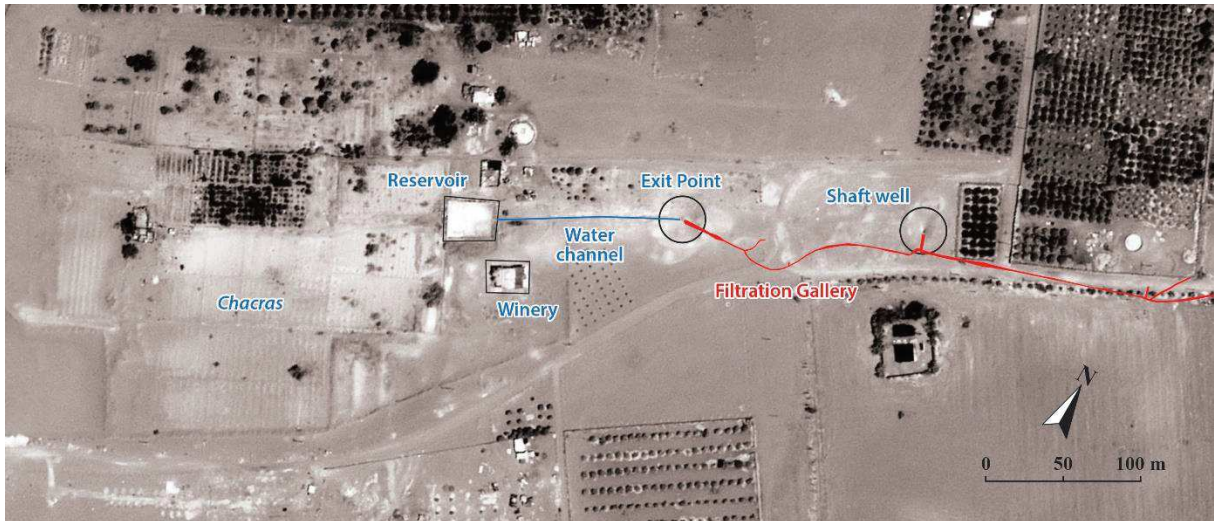


Figure 21 : Satellite view of the ground surface elements of the socavones

Near Matilla, the exit point of the socavones is often located on an escarpment (steeper ground gradient). The workers probably took advantage of those escarpments, which allowed them to dig shorter tunnels to tap the aquifer. If the ground has a steep slope, the tunnel and ground surface intersect sooner (higher difference between the ground gradient and the tunnel gradient), in contrast to a land with a gentle slope, where the gallery has to travel a longer distance to meet the surface (Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki, 2017). Indeed, the socavones which exit point is in the escarpment of Matilla, on the south-western edge of the area, are the shortest galleries, but El Sauque. On the contrary, the socavones located in the middle of the basin (flatter area) are the longest galleries. On the north-eastern edge, the ground slope starts to increase, and again the galleries' lengths are shorter (Figure 15).

In the area of Pica, parallelepiped blocks of adobe and cement around half meter high were located on the ground at a distance of 200 m on each side of the tunnel, defining a buffer zone where no activities harmful for the gallery structure and its discharge flow could be carried out. This rule is however disregarded today.

The socavones located in the oasis of Pica are very close to each other. In most cases, they are separated from each other by less than 500 meters, and in some cases less than 200 meters. As reported by Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki (2017), in Iran, a filtration gallery built in a soft soil should lie at least 1500 m away from the nearby gallery - and 1000 m in a hard soil - so they do not affect each other discharge flow.

- The shaft wells

In the 24 socavones, 116 shaft wells were identified. Many shaft wells are today in a poor state, collapsed or blocked by sand and garbage. In some cases, they have been totally destroyed by the land owners. Therefore, only some of them are accessible. The gallery with the higher number of shaft wells is Comiña (17) as it is the longest main gallery. Then Santa Cruz has 12 shaft wells, followed by Loreto and San Isidro with 10 shaft wells. The shortest socavones have either one or no shaft wells (Cementerio Viejo, Puquio El Molle, Concova, Botijería, Santa Rosita). The average distance between shaft wells is 150 meters. According to (Semsar Yazdi



and Labbaf Khaneiki, 2017), the distance between shaft wells is usually twice the depth of the wells but this rule was not applied in Pica area.

In Pica, the shaft wells are not located vertically over the main tunnel but either on the right or on the left side of the galleries, without any apparent logic. Actually, in the socavones, the shaft wells or *lumbreras* are branch galleries connecting the main tunnel to the ground surface (Figure 22). They are perpendicular to the main tunnel with a steep gradient and end with a well connecting the gallery to the surface. The well is, in general, a few meters deep and with a square shape. In order to facilitate the access through the steep slope, steps were carved on the ground. The wells can be up to 9 meters deep and exceptionally reach 20 meters deep (El Carmen, which is the deepest socavon). The only exception is Loreto where the *lumbreras* are vertical wells located right over the main tunnel. As well, exceptionally, some *lumbreras* are spiral staircases (Santa Cruz or El Sauque) or a succession of short sections of gallery with turns of 90 degrees. Given that the wells were carved in a very soft material (unconsolidated sand), their walls were consolidated with bricks of adobe, or more recently with concrete. Although today many shaft wells are totally covered by sand, fortunately, the sediments do not block the main tunnel.



Figure 22 : Typical shaft well (Lumbrera) in Pica area

- Identification of inaccessible socavones through geo-electric prospection

Two inaccessible socavones, as well as some sections of other five, were investigated and identified through geo-electrical prospection. In total, 41 geo-electrical profiles were deployed. The galleries were detected in almost all the cases and their lengths were estimated. Most of the tunnels were detected as a resistive body (Figure 23). In three socavones (La Quinta, Jesus María and Comiña), the tunnels are represented by a conductive area inside a semi-conductive formation, probably because they are completely saturated with water.

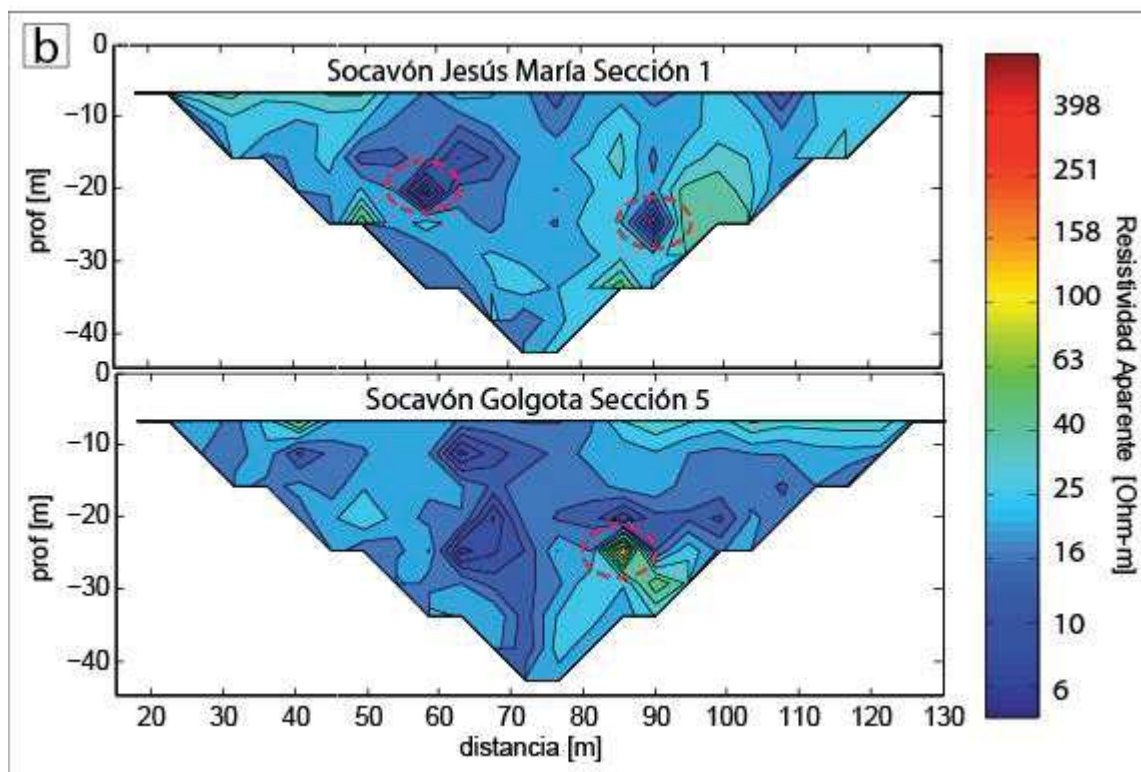


Figure 23 : Pseudo-sections of apparent resistivity. The red dotted lines show the gallery. (a) Two tunnels are observed as conductive areas ( $<6$  Ohm-m). (b) The tunnel is identified as a resistive area ( $\sim 250$  Ohm-m).

- State of the socavones today

Although the agriculture in the oasis of Pica has expanded in the last decade, most of the socavones are today abandoned. Owners and members of the associations in charge do not longer dare to enter in the galleries today, although they did it daily 10 years ago.

In some galleries, part of the tunnel has collapsed. Although earthquakes with magnitude over 7 Mw have occurred in the region in the last decades (1976, 2005, 2014), they did not cause a major destruction of the socavones of Pica area. Nevertheless, the impact of recent earthquakes is visible in some galleries, in part because they are not anymore maintained. In general, galleries are still in excellent conditions although exit points and/or shaft wells may be deteriorated, collapsed, or covered up by sand or garbage.

Only seven socavones are still in use (Miraflores, Concova, Loreto, Santa Rosita, San Matias, El Sauque and Botijería), mostly for irrigation purposes, with the exception of Santa Rosita



used by the regional water supply company. Miraflores, Concova, along with the thermal spring of Resbaladero are still managed collectively through farmers associations, as it was traditionally. The water is distributed among the farmers through a canal network and strict timing. Loreto and Miraflores are actively maintained. That means that the users enter regularly in the gallery for cleaning and maintenance activities. They also carried out important restauration work of the tunnel and shaft wells in order to ensure the maximum flow of the gallery and to convey the water down to the chacras.

Nevertheless, today in the oasis, crops are mainly irrigated through shallow wells (around 30 m deep) or borehole (over 100 m). Unfortunately, many extractions are not legally authorised, and the high concentration of wells in the oasis affect the groundwater quantity and quality. Many farmers complain that the shallow water is now too salty for the crops, and that the water level lowers down.

### Discussion

This research evidenced that the most southern Latin-American filtration galleries share many common features with the ones described in other parts of the world. According to the classification of Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki (2017), the socavones of Pica area are: (1) short and shallow, (2) mountainous, (3) both parallel and successive, (4) with a constant discharge and (5) simple (they drains out only the water which seeps into its own gallery). However, they also have distinctive features that make them unique in their kind. As asserted by Villalobos (1979), Chilean filtration galleries represent a local development of the ones found in Spain and North Africa. First, one of the main difference is the shaft wells structure (with the exception of Loreto). We postulate different hypothesis for this type of shaft well construction in Pica:

1) The area is a windy and sandy desert. If the well is dug vertically over the main tunnel, the sand may accumulates directly in it, obstructing the water flow. If the well is replaced by a diagonal tunnel, the sand accumulates in the branch gallery before reaching the main tunnel. The accumulation of sediments in the main tunnel reduces the water flow and increases the need of maintenance. Today, the galleries are not blocked with sediments from the surface although they are abandoned since years. In a few cases, it has been necessary to clear out the tunnels and remove the sand in order to continue the exploration, but in general, the sediments have accumulated in the *lumberera*.

2) It is more difficult to dig a well vertically over an underground tunnel that entails levelling expertise.

3) In Pica area, it is likely that, at the time of the construction of the socavones, the water table was only a few meters deep. In saturated areas, it is not possible to dig the wells deeper than the water table because the water fills the well. In those cases, as described by Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki (2017), the workers continue digging the well from the main gallery upward. As such, the water drains down and flows away as the workers dig overhead. The workers may have found easier to dig a branch gallery perpendicular to the main tunnel and with a very steep slope in order to reach up the well.

Another characteristic, which distinguishes the socavones of Pica is the absence of mother wells. It may be the reason why the main galleries are not straight lines between the exit point and the end (where the mother well is supposed to be located and dug first). As mentioned by Semsar Yazdi and Labbaf Khaneiki (2017), a straight tunnel means less excavation and less cost unless workers come across obstacles. The obstacles observed in the galleries are located on the western edge of the area, with few exceptions. Therefore, they do not explain the many curves of most of the galleries (besides a general NE-SW direction) other than an approximate definition of the digging direction. The only exception is again Loreto, which seems to have been built in the rule of the art of *qanat* construction.

The differences observed in Pica are probably twofold. First, an adaptation to the climatic context and local geology (important accumulation of sand transported by the wind, presence of a hard ignimbrite layer). Second, the lack of expertise of the workers who built the socavones compared to the *qanat* Masters in Iran, China or other places, where hundreds of filtration galleries were built, some with tens of kilometres long. This hypothesis is supported by Bruggen (1918) observations of several galleries with water built up because of uneven tunnel slope, or galleries in bad state (collapsed) affecting the discharge flow of the galleries. The short distance between galleries, is probably another evidence of the lack of expertise in the socavones built up case. This short distance may be the cause of their low discharge flow, compared to the springs discharge.

The giant alluvial fans of the Central depression are adapted to the development of socavones of longer distance. However, this technique has not been developed outside of the Pica area although there has always been irrigated agriculture in the Pampa del Tamarugal. Different hypothesis can be advanced and discussed: the surface water flow, although low, was always sufficient for covering the needs of the local inhabitants or expert knowledge lacked for the construction of longer and deeper galleries. Another likely reason is that, since the Spanish colonisation, mining in the region has always been a more lucrative activity than farming. Indeed, the other socavones known in the north of Chile and Bolivia were built for mine drainage (Sibaya, Potosi) and the ones of Pica are thought to have been built by miners as the word “socavón” comes from mining terminology (Barnes and Fleming, 1991). The construction of a socavón needs workers, time and money, which may have not been available in the context of Northern Chile as the wages were probably higher in the mines. This factor may have reduced the labour pool for galleries construction and maintenance.

Unfortunately, today the galleries are abandoned and at risk to disappear both physically and from the local population memory, once all exit points and shaft wells will be buried or have collapsed. The abandonment of the socavones in Pica is not an isolated phenomenon. As in other countries with filtration galleries in use or that have been recently in use, they are abandoned because of both physical and socioeconomic reasons, which are intrinsically linked. A lack of maintenance may have led to a reduction of the discharge flow (sedimentation on the tunnel ground, mineral deposits on the tunnel sides reducing seepage, fear of earthquakes and tunnels conditions), or too much and too close galleries affected the flow. Some may have been seriously damaged by earthquakes or a major portion of the tunnel may have collapsed, again reducing the discharge of the gallery. Eventually, the socavones may have been abandoned

because the water table of the aquifer felt down, reducing the discharge of the galleries. The drawdown of the aquifer water table is the result of groundwater extraction through wells. Worldwide, the major impact on filtration gallery's systems has been the introduction and widespread use of the pumped wells and boreholes, mostly since 1950 (Lightfoot, 1996). The oasis of Pica is not out of this scheme. Wells and boreholes with motorised pumps offer many advantages over the use of filtration gallery for irrigation: water is pumped when needed and available immediately, their depth can be extended when the water table fall down. However, the rise of the number of wells and borehole in a relatively small area (the oasis) led to the rapid drawdown of the aquifer and the drying up of the filtration galleries.

We believe that the socavones of the Pica area have still a role to play in the modern world. They first deserve to be preserved because they represent a water heritage of one of the driest place on Earth, as well as for their unique characteristics and the human effort engaged in their construction. Some of them could be habilitated so they could be visited for cultural, education and scientific purposes. In addition, they can still play a role in groundwater management of the oasis of Pica. The exploration of the socavones provided an insight of the aquifer dynamic and long term evolution, which deserves further studies. The evolution of the groundwater level in the galleries can be used as an indicator for aquifer management. As most of the wells are private and in use, they cannot be used for the monitoring of the water table. Eventually, the abandoned shaft wells and tunnels could be used for managed aquifer recharge. Either surface runoff or reused water could be injected into the shaft wells, so empty tunnels of abandoned socavones will be filled with water, which will in turn slowly infiltrate into the aquifer.

### *Conclusion and further studies*

The underground exploration, topographical survey and geo-electrical prospection of the socavones of Pica area have allowed identifying and describing 70% of them. We expect the other 30% to be completely buried. Even though, it deserves further research. Our study came across various limitations. During the exploration, some galleries were not explored because of high risk of collapse. Additionally, some supposed galleries (informed by local population) investigated with geo-electrical survey were not found. Although it is possible that the galleries are totally buried, it is also conceivable that gallery is too small or too deep to be detected by the geo-electrical method. The use of georadar may allow detecting the galleries, if the distance to the surface is less than 10-15m. The underground mapping through topographic survey has a margin of error of 3%. This margin could be greatly reduced and the accuracy of the length and dimension of the galleries could be improved with the use of scanner laser. Additionally, the scanner laser would leave a unique registry of the galleries. Finally, the galleries have never been dated.

The location of Pica socavones in one of the most arid areas on Earth, in a context of mines development, as well as their geological and hydrogeological settings, have influenced the construction patterns and main features. The information provided by this research will allow authorities to take appropriate measures for protecting existing infrastructures from sinkhole as well as for land-use planning of the future oasis development. But, above all, it seeks to encourage the preservation of the socavones – an ancient water supply systems of arid and water-stressed areas - as water heritage; as well as their reuse for cultural, scientific and water

management purposes. Beside the abandonment of most of the socavones today, we believe that they could still have a role to play in the groundwater management of the oasis for groundwater monitoring and managed aquifer recharge.

### 1.5. Conclusion du chapitre 1

L'étude approfondie du suivi hydroclimatique a montré que les données produites par le réseau hydrométrique existant et utilisées dans toutes les études sont une source d'incertitude majeure, tant du point de vue qualitatif que quantitatif, à l'origine d'une forte incertitude sur l'estimation des différents termes du bilan en eau (entrées et sorties).

L'utilisation de l'analyse multicritères couplée à une analyse SIG a permis de concevoir un nouveau réseau adapté aux contraintes du contexte géographique et climatique.

Cependant le nouveau réseau ne portera ses fruits que dans plusieurs années quand pourront être exploitées des séries de données suffisamment longues pour représenter avec une incertitude minimum l'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations et écoulement superficiels et souterrains.

La zone d'étude est le territoire de populations indigènes. Dans ce contexte, le suivi participatif et l'utilisation des connaissances locales sur l'eau permettent d'intégrer des données supplémentaires indispensables à l'élaboration de modèles conceptuels de fonctionnement hydrogéologique. Cette approche participative permet aussi d'assurer l'intégration et la compréhension des informations scientifiques sur la ressource en eau souterraine par les communautés. L'accès à l'information devient alors un outil de développement, l'opportunité pour les communautés de jouer un rôle prépondérant dans la gestion de la ressource en eau.





*Quebrada de Huatacondo, Région de Tarapacá*

## 2. La ressource : Caractérisation des processus hydrogéologiques du bassin de la Pampa del Tamarugal

### 2.1. Evolution des ressources en eau souterraines dans la zone nord et aride du Chili

L'évolution des ressources en eaux souterraines dans la partie nord et aride du Chili durant les deux dernières décennies, et notamment au sein de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal n'avait pas fait l'objet d'études (en dehors du suivi piézométrique réalisé par la DGA) lorsque je suis arrivée dans la région en 2011, la dernière campagne piézométrique datant de 1993 (JICA, 1995). Ce travail a été présenté au congrès Hydrolatam 2014 réalisé à Santiago de Chile.

#### *Méthodologie*

La réalisation d'une campagne piézométrique sur un aquifère de cette envergure nécessite l'accès à un grand nombre de forages, de plus non pompés.

En 2012, Damian Cordoba et moi-même (hydrogéologues du CIDERH) avons donc initié une campagne d'exploration des forages disponibles dans la Pampa del Tamarugal afin de réaliser des campagnes piézométriques. 165 puits et forages ont été sélectionnés et deux campagnes ont été réalisées en octobre-décembre 2012 et avril-mai 2013 (Figure 24 et Tableau 4 en annexe 2). En avril-mai 2013, il a été possible de mesurer le niveau piézométrique de 147 puits et forages, le reste étant soit en pompage lors de la visite, soit sec.

Un relevé topographique a été réalisé pour chacun de 165 forages avec un GPS différentiel de double fréquence de marque Trimble, ce qui a permis d'obtenir l'altitude de la marge des forages avec une précision verticale inférieure à 5 cm pour 93% des points et comprise entre 2 et 3 cm pour 50% des points (Figure 25 et Tableau 4 en annexe 2).

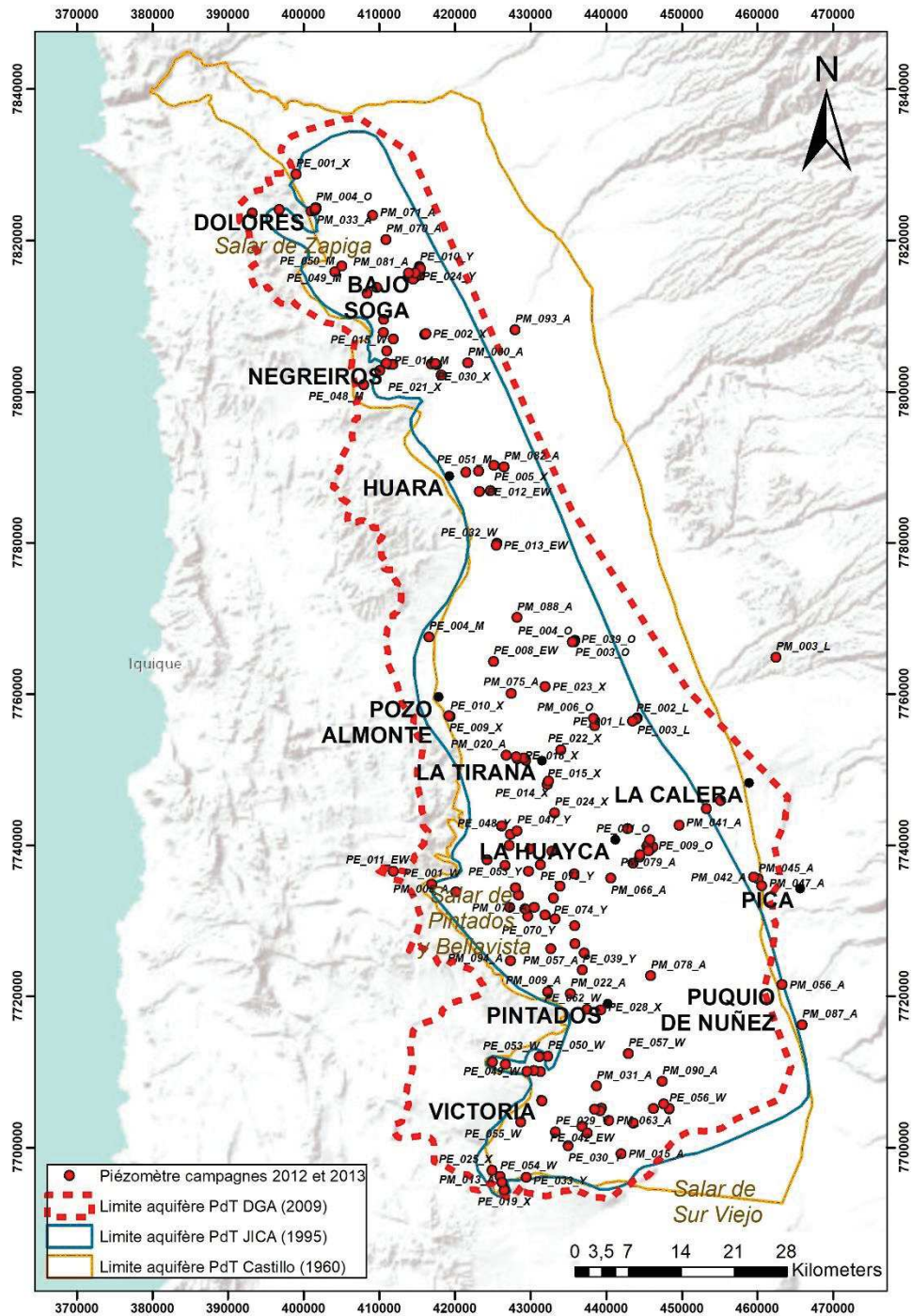


Figure 24 : Localisation des forages utilisés pour les campagnes piézométriques de 2012 et 2013.

Les données de piézométries ont été analysées géostatistiquement (analyse exploratoire) grâce aux logiciel SPSS. L'interpolation des données a été réalisée grâce au logiciel Surfer.





Figure 25 : Relevé topographique d'un puits de l'aquifère PdT

En parallèle, dans le but de connaître l'évolution historique des niveaux piézométriques au cours des dernières décennies, nous avons collecté et analysé les données des campagnes piézométriques de Castillo (1960) et JICA (1995).

L'étude de Castillo (1960) apparaît comme un travail clé pour l'analyse de l'évolution de la piézométrie de l'aquifère PdT car à cette date celui-ci était soumis à très peu de pressions anthropiques, le total des extractions d'eau souterraines étant estimée à 140 l/s. La carte piézométrique de Castillo (1960) est réalisée à partir de la mesure du niveau piézométrique dans 190 puits et forages dans l'aquifère PdT. Cependant, seulement 119 d'entre eux ont des valeurs d'altitude et ont donc été utilisés pour ce travail. JICA (1995) ont utilisé 160 puits et forages dans l'aquifère PdT. La distribution des piézomètres est hétérogène, car ils sont concentrés dans la zone nord et sud de l'aquifère, mettant en évidence un manque de points de contrôle au centre de l'aquifère et sur ses bords, en particulier la limite orientale (Figure 28). Quatre piézomètres de l'étude Castillo (1960) et 15 piézomètres de l'étude JICA (1995) ont été identifiés sur le terrain. La variation du niveau piézométrique a donc pu être mesurée directement.

Les données piézométrique de Castillo (1960) et JICA (1995) ont été analysées géostatistiquement avec le logiciel SPSS (analyse exploratoire) et les isopièzes ont été scannées afin d'être comparée avec les données de la campagne piézométrique de 2013 grâce au logiciel ArcGIS.

### Résultats

#### **Elaboration de la carte piézométrique actualisée de l'aquifère PdT**

L'analyse exploratoire des données de piézométrie a permis de distinguer deux groupes de données : un groupe A et B (Figure 26). Le groupe A correspond à la partie nord de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal et le groupe B correspond à la zone centrale et au sud de la Pampa del Tamarugal, la limite entre les deux se localisant au niveau de Negreiros (Figure 24). Cette limite peut être causée par le manque de données dans la zone centrale de la nappe ou être indicative d'une crête piézométrique. La deuxième option semble probable car l'analyse des données de la campagne de 2013 semble le démontrer. La division des flux, l'un vers le nord



et l'autre vers le sud au niveau de Negreiros avait déjà été mentionné dans (Castillo, 1960) et JICA (1995). Les deux groupes de données ont donc été analysé séparément.

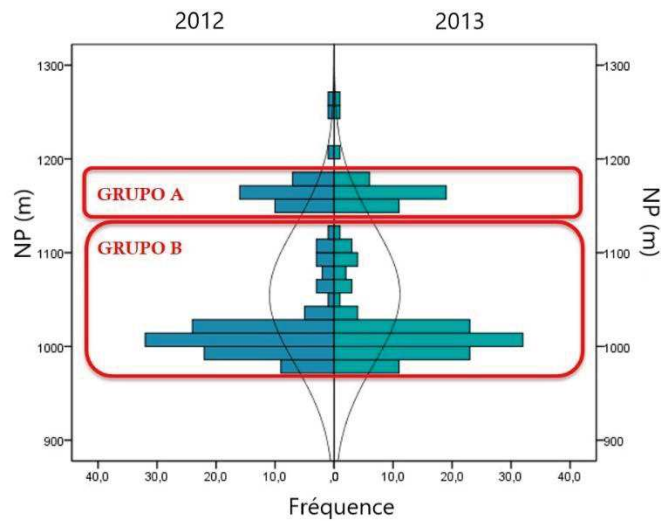


Figure 26 : Résultat de l'analyse exploratoire des données piézométriques de 2012 et 2013

L'analyse structurale des données a permis d'obtenir les variogrammes pour chaque groupe (Figure 27)

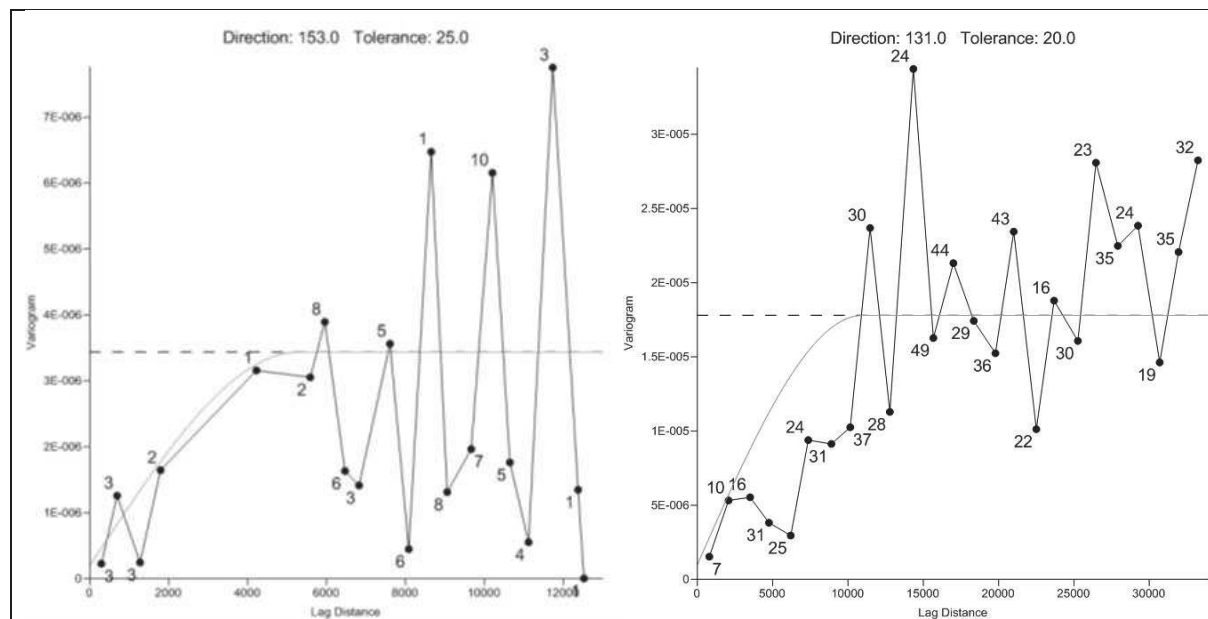


Figure 27 : Variogrammes des données piézométriques des groupes A (à gauche) et B (à droite) de la campagne de 2013.

Finalement, à partir des variogrammes, les cartes piézométriques des campagnes de 2012 et 2013 ont été élaborées en utilisant la méthode d'interpolation Kriging. Les deux cartes ne montrant que des variations minimales, je n'ai intégré ici que la carte d'avril-mai 2013 (Figure 28).

On observe :

- i) dans le secteur nord :

- . Les écoulements des eaux souterraines ont une direction est-ouest. Ceci est cohérent avec la présence d'un salar (Salar de Zapiga) sur le bord occidental de la partie nord de l'aquifère. Le salar représente un exutoire naturel de l'aquifère car l'eau souterraine y est peu profonde et s'évapore, due à l'extrême sécheresse de l'atmosphère. En s'évaporant les sels se déposent à la surface du sol, formant une croute épaisse.
- . Cependant, l'absence de forages près des limites est et nord de l'aquifère biaise l'interpolation dans ces zones (L'analyse des erreurs entre les valeurs simulées et observées donne une valeur de  $R^2$  égale à 0,68).

ii) Dans la partie centrale de l'aquifère PdT, les écoulements souterrains ont une direction nord-sud de Negreiros à Pozo Almonte et prennent ensuite progressivement une direction nord-est à sud-est à partir de La Tirana. On observe les conséquences de l'extraction d'eau souterraine par la compagnie d'eau potable au niveau de Canchones (depuis 1988) et Carmelo (depuis 1998).

iii) Dans la partie sud une division des écoulements souterrains :

- . L'un vers le sud-ouest, ce qui est de nouveau cohérent avec la présence d'un salar (Salar de Bellavisa) qui de plus constitue le point bas topographique de l'aquifère PdT.
- . L'autre montre une continuité vers le sud, ce qui remettrait en question la limite sud de l'aquifère PdT.

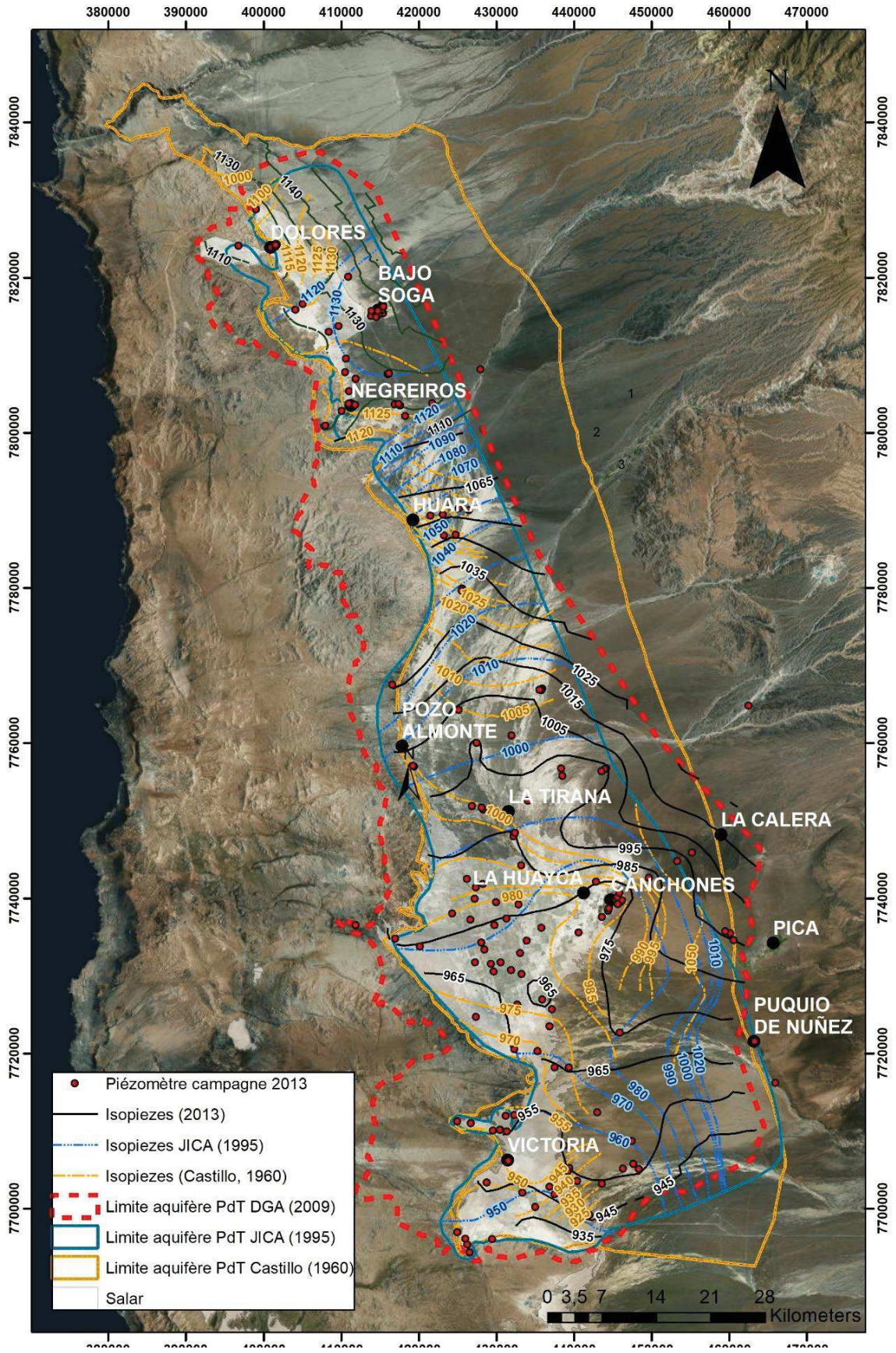


Figure 28: Cartes piézométriques de 1960, 1995 et 2013 de l'aquifère PdT



## Comparaison des cartes piézométrique de 1960, 1995 et 2013

- Analyse des données :

L'analyse de la variation des niveaux piézométriques de l'aquifère entre 1960, 1995 et 2013 montre qu'elle n'est pas homogène sur l'ensemble de l'aquifère car on observe des fluctuations à la fois négatives et positives. Cette analyse a permis d'identifier les zones affectées par les extractions d'eau souterraine.

La comparaison des niveaux piézométriques actuels avec ceux datant de 1960 et 1995 dans les forages identifiés des études Castillo (1960) et JICA (1995) montre que la plupart des forages enregistre une baisse du niveau piézométrique comprise entre 0,25 m et 2 m. Cependant trois forages enregistrent une hausse du niveau piézométrique (Tableau 6 et Figure 28).

Tableau 6 : Variations piézométriques des forages des études Castillo (1960) et JICA (1995) identifiés sur le terrain

Étude	Code	N_UTM	E_UTM	Altitude (m)	NP* 2013 (m)	$\Delta^{**}$ (m)
JICA (1995)	PM_093_A	7806150,29	414657,22	1238,07	1229,46	-1,11
	PM_081_A	7815729,43	415489,24	1143,9	1133,675	-1,06
	PE_042_EW	7702816,69	436845,90	960,91	949,47	-1,11
	PE_019_W	7809541,24	410604,93	1140,66	1128,69	-1,52
	PE_017_W	7807815,25	410539,93	1140,95	1128,19	-1,52
	PE_015_W	7805387,26	411004,93	1141,82	1127,55	-1,84
	PE_016_W	7806776,92	411835,42	1143,69	1127,97	-1,99
	PE_009_M	7802083,73	409561,77	1143,38	1129,86	1,48
	PE_040_EW	7705244,68	439515,89	971,97	955,04	-0,63
	PE_037_EW	7739950,79	447004,92	961,31	947,54	6,58
	PE_012_EW	7786508,39	423287,77	1096,94	1046,69	-0,25
	PE_014_EW	7786587,10	424952,53	1098,02	1044,17	-0,10
	PM_087_A	7712368,82	470442,38	1283,26	1212,83	15,569
	PE_039_O	7766848,42	435787,58	1057,406	1004,25	-1,16
	PE-003-O	7767050,52	435920,52	1058,203	1004,59	-1,614
CASTILLO (1960)	PE_001_X	7828767,10	399007,86	1116	1111,382	-0,81
	PE_007_X	7823600,79	393251,04	1126	1111,558	-0,65
	PE_008_EW	7764282,12	425153,24	1039	1001,823	-3,39
	PM_020_A	7751865,52	426837,22	1009	990,324	-5,60

\* NP = Niveau piézométrique

\*\* Variation entre le niveau piézométrique (NP) au moment de l'étude (Castillo (1960) et JICA (1995))

L'analyse exploratoire des données piézométriques de Castillo (1960) et JICA (1995) montrent l'existence des deux même groupes de données observés avec les données de 2012 et 2013, correspondant aux secteurs nord et centre-sud de l'aquifère PdT (Figure 29).



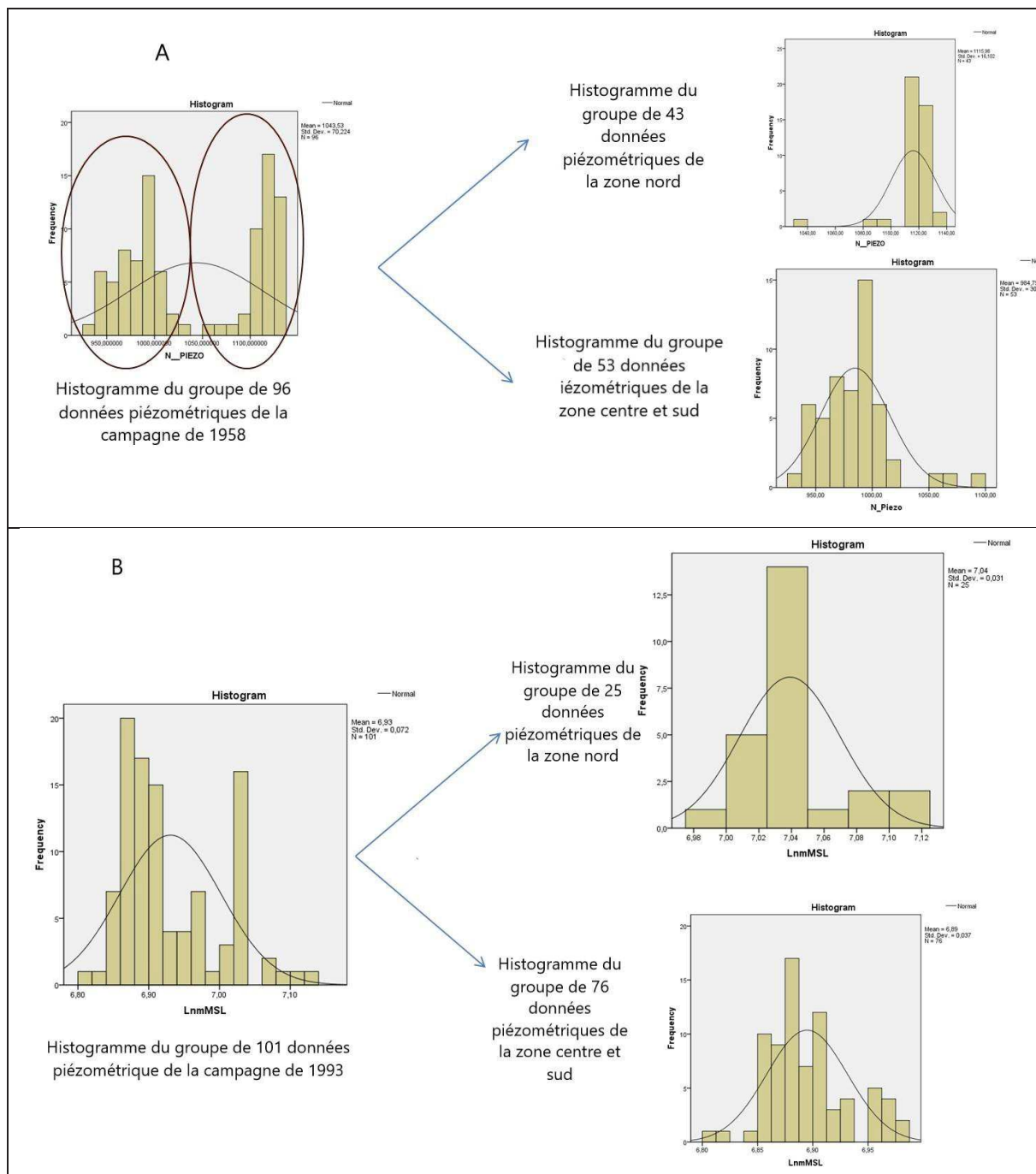


Figure 29 : Analyse exploratoire des données piézométriques de Castillo (1960) et JICA (1995)

- Comparaison des cartes piézométriques de Castillo (1960) et JICA (1995) (Figure 30):
  - Les zones colorées en jaune, vert et bleu clair montrent une diminution des niveaux piézométriques. Cela concerne la zone nord (Negreiros) et centrale (La Huayca, Canchones et Salar de Pintados). Dans la zone centrale, la baisse des niveaux piézométrique s'explique par le début du pompage de la compagnie d'eau potable sur le site de Canchones.
  - Les zones colorées en bleu foncé montrent les zones de l'aquifère où les niveaux piézométriques sont restés stables ou ont augmentés : zone de Bajo Soga, zone entre Huara et Pozo Almonte et extrême sud de l'aquifère (Victoria). L'augmentation des niveaux piézométriques est concentrée sur le bord occidental de l'aquifère et peut être



interprété par l'arrêt des mines de salpêtres dans les années 1970, ayant pour conséquence l'arrêt des extractions associées à l'activité de ces mines.

- Les zones colorées en rouge et orange ne sont pas interprétables dû au manque de données dans ces zones.

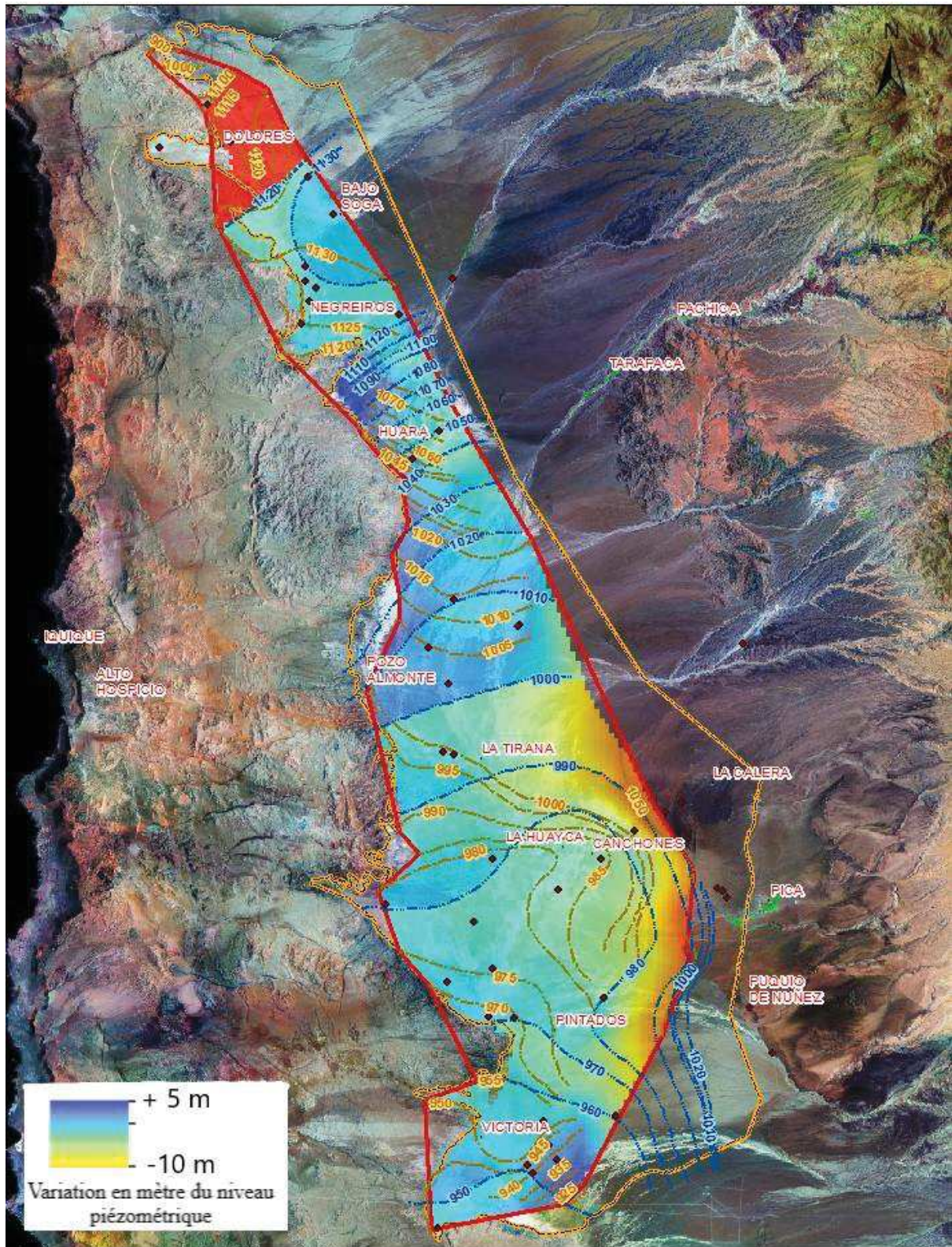


Figure 30 : Différences piézométriques entre les campagnes de 1960 et 1995



- Comparaison des cartes piézométriques de JICA (1995) et de 2013 (Figure 31 et Figure 32):

Dans la zone nord (Figure 31):

- Les zones colorées en rouge montrent une baisse des niveaux piézométriques entre 1995 et 2013. Les zones colorées en jaune montrent une élévation des niveaux piézométriques entre 1995 et 2013. Les zones de couleur bleu ne sont pas interprétables dû au manque de données.
- Les niveaux piézométriques ont baissé de manière générale sur la zone nord, sauf dans un forage de la mine de Negreiros. Ce phénomène isolé peut être dû soit à une erreur de mesure soit à une recharge artificielle de l'aquifère dans l'enceinte de la mine.
- La baisse moyenne des niveaux piézométriques de la zone nord est de 0,12 m/an.

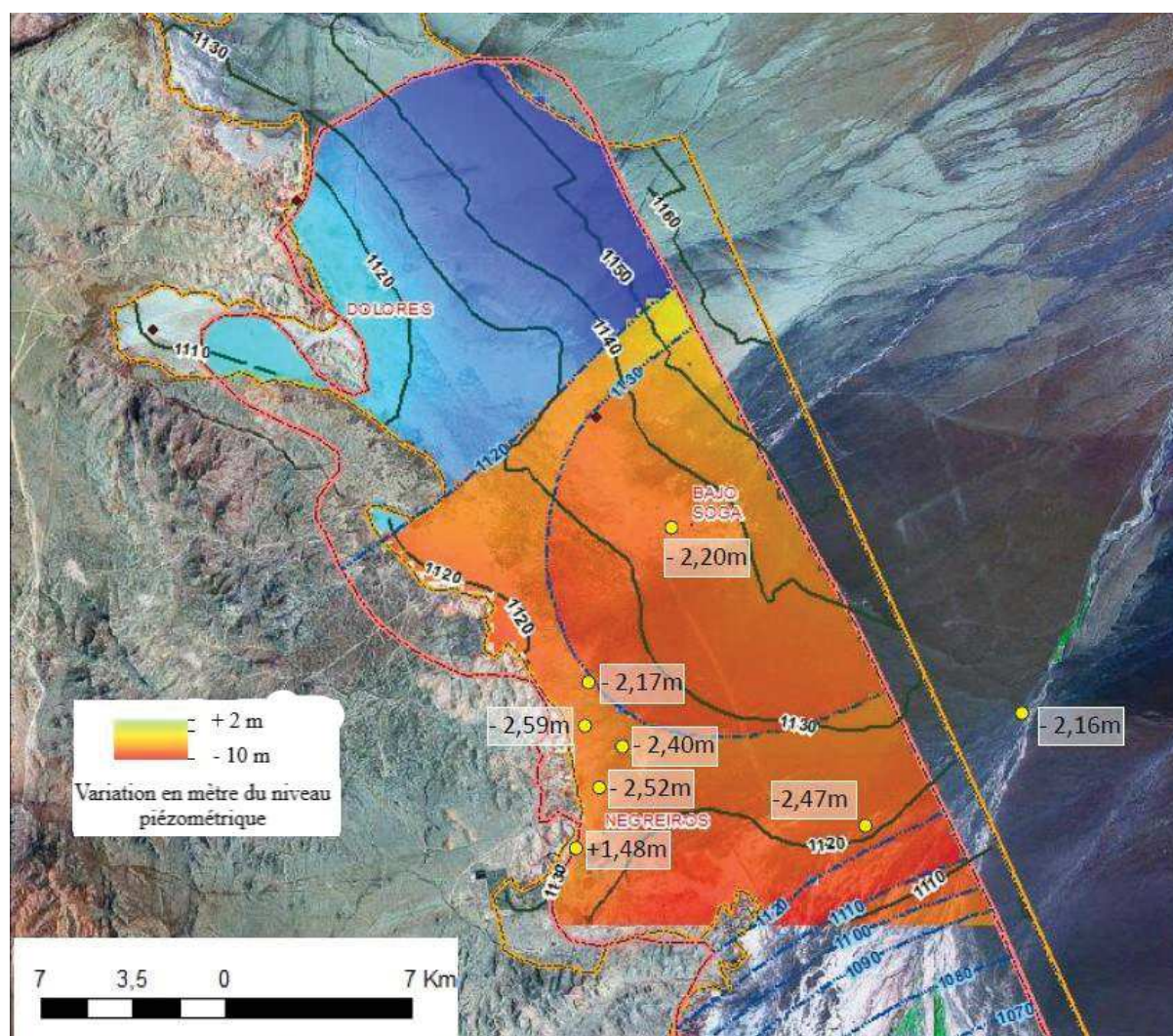


Figure 31 : Différences piézométriques entre les campagnes de 1995 et 2013 dans la partie nord de l'aquifère PdT (les points jaunes représentent les forages qui ont été mesurés en 1995 et 2013. Le chiffre indique la baisse du niveau piézométrique entre ces deux dates)

Dans la zone centrale et sud (Figure 32):

- Les couleurs bleu clair, vert et jaune montrent des zones de l'aquifère dans lesquelles les niveaux piézométriques ont baissés entre 1995 et 2013. La couleur bleu montre des zones de l'aquifère dans lesquelles les niveaux piézométriques sont restés stables ou ont augmentés entre 1995 et 2013. La couleur rouge n'est pas interprétable dû au manque de données dans cette zone.

Sur ces niveaux en baisse, on peut estimer que :

- La baisse piézométrique maximum enregistrée est de 3,43 mètres (à l'est de Pozo Almonte), soit 0,17 m/an.
- La baisse piézométrique moyenne enregistrée est de 0,056 m/an.
- Des puits et forages ont enregistrés une hausse du niveau piézométrique dans la zone sud, à l'est de Victoria, dans la zone de Canchones et au centre, sur la bordure occidentale (sud de Puquio Nuñez). Les hypothèses qui pourraient expliquer les niveaux piézométriques en hausse sont, dans le premier cas, l'arrêt d'extractions et, dans le deuxième cas, la présence d'une zone préférentielle de recharge.
- De manière générale, depuis 1995, les niveaux piézométriques ont baissé dans la partie ouest et centre de l'aquifère PdT d'environ 2 mètres en 20 ans. Des baisses plus importantes ont été enregistrées au nord de Huara, Est de Pozo Almonte, La Tirana, Sud-est de la Huayca et Canchones. Les niveaux piézométriques se sont maintenus stables ou ont augmenté à l'extrême sud et sur la bordure orientale de l'aquifère PdT.



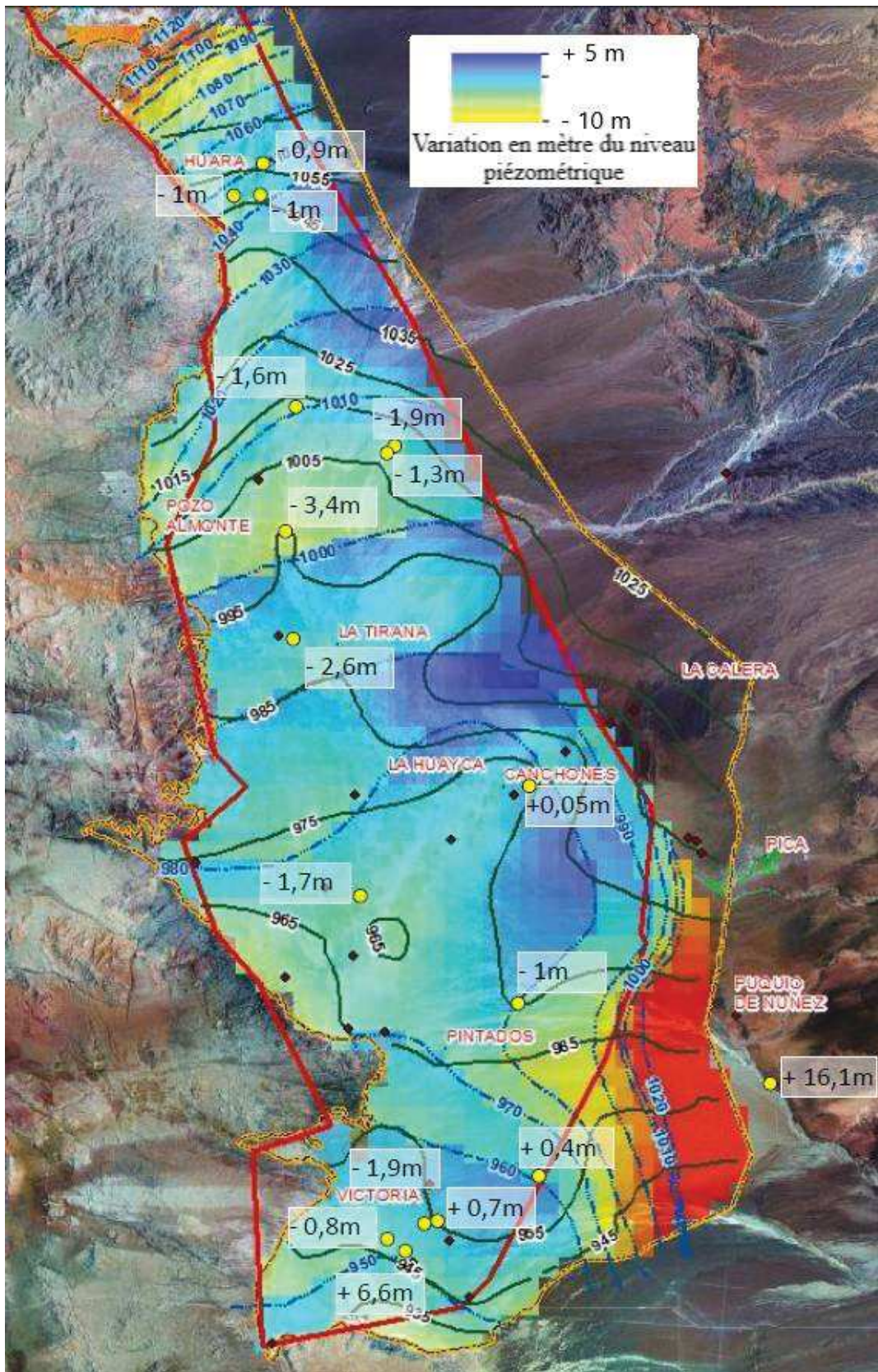


Figure 32 : Différences piézométriques entre les campagnes de 1995 et 2013 dans les zones centre et sud de l'aquifère PdT (les points jaunes représentent les forages qui ont été mesurés en 1995 et 2013. Le chiffre indique la baisse du niveau piézométrique entre ces deux dates)

Donc :

- La baisse des niveaux piézométriques entre 1995 et 2013 est de manière générale comprise entre 1 et 2 m, parfois inférieures à 1 mètre. Cela correspond à une baisse moyenne de 0,05 à 0,1 m/an.
- Il existe néanmoins des zones plus affectées par les extractions : il s'agit de la zone située entre Negreiros et Huara, la zone à l'est de Pozo Almonte, les zones au sud-ouest de La Tirana et Canchones et enfin l'extrémité sud (Salar de Bellavista) de l'aquifère PdT (Figure 28). Les zones les plus touchées présentent une baisse moyenne annuelle du niveau piézométrique comprise entre 2 et 5 m de descente entre 1993 et 2013, soit une baisse de 0,12 à 0,17 m/an.
- L'extrême sud et les abords de la limite est de l'aquifère (zones alluviales où débouchent les quebradas) enregistrent des niveaux stables voire en hausse, entre 5 et 15 mètres.

### Conclusion

On ne peut donc pas parler d'un abaissement général de l'aquifère. De plus, les données récentes de piézométrie montrent une stabilisation des niveaux à environ 0,02 m/an. Les dimensions de l'aquifère PdT et les caractéristiques hydrodynamiques impliquent des circulations très lentes au sein de l'aquifère (de l'ordre de 10 m/an dans la partie basse du piedmont à 1 m/an dans la plaine, Viguié (2016)). Son évolution est donc extrêmement lente. Les phénomènes de recharge et de décharge visibles à l'échelle de la dizaine d'année affectent des zones localisées. Dans le sous-chapitre suivant, les nouvelles données produites sur la recharge appuient l'hypothèse que l'aquifère n'est pas, à ce stade, dans une situation de surexploitation.

## 2.2. Processus hydrogéologiques contrôlant la recharge en zone aride

Entre 2013 et 2016, la partie nord du bassin versant de la Pampa del Tamarugal a été étudiée dans le cadre du mémoire de Master puis la thèse de doctorat de Benoit Viguiet, encadrée par Hervé Jourde et Véronique Léonardi. Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le laboratoire Hydrosciences Montpellier et le CIDERH. Les missions et campagnes de terrain ont été financées par un projet de recherche d'une durée de 4 ans que j'ai monté et dirigé (Caractérisation et suivi des ressources en eau de la Région de Tarapacá, financé par la Région de Tarapacá et CONICYT).

Les résultats sont en cours de valorisation et un article a déjà été publié (Viguiet et al., 2018). Trois autres ont été soumis ou sont en cours de soumission. Ce travail a permis de caractériser les processus de recharge de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal depuis les zones de précipitation, sur les hauteurs de la Précordillère, au travers du piedmont. Les principaux apports sont synthétisés ci-dessous (Viguiet, 2016):

- i) Une étude géologique et géomorphologique approfondie a permis d'identifier les facteurs qui contrôlent cette recharge. Grâce à la caractérisation de l'évolution des écoulements alluviaux du Piedmont depuis l'Oligocène, le rôle de la morphologie du substratum dans la structure des dépôts de la couverture fin-cénozoïque, et donc dans les circulations d'eau souterraines entre les zones de précipitation et l'aquifère en aval, a été mis en évidence.
- ii) L'étude géochimique, isotopique et des gaz dissous a permis de montrer que la recharge de l'aquifère PdT résulte du recyclage d'eaux anciennes provenant de la Précordillère qui alimentent les cours d'eau par des sources. Ces eaux s'infiltrent en aval et permettent la recharge « actuelle » de l'aquifère. De plus, ces eaux semblent avoir pour origine les phases paléo-climatiques humides de la fin-Pléistocène et de l'holocène (contemporaine des grands paléo-lacs de l'Altiplano Bolivien). Ceci confère un caractère fossile aux eaux de l'aquifère Pampa del Tamarugal.
- iii) La modélisation 1D des écoulements dans la zone non saturée des cônes alluviaux a montré que la recharge se produit essentiellement au niveau de l'apex des cônes alluviaux. Les épisodes de crue contribuent dans une moindre mesure à la recharge.
- iv) Finalement un schéma conceptuel de fonctionnement des circulations et de la recharge de l'aquifère PdT est proposé (Figure 33).



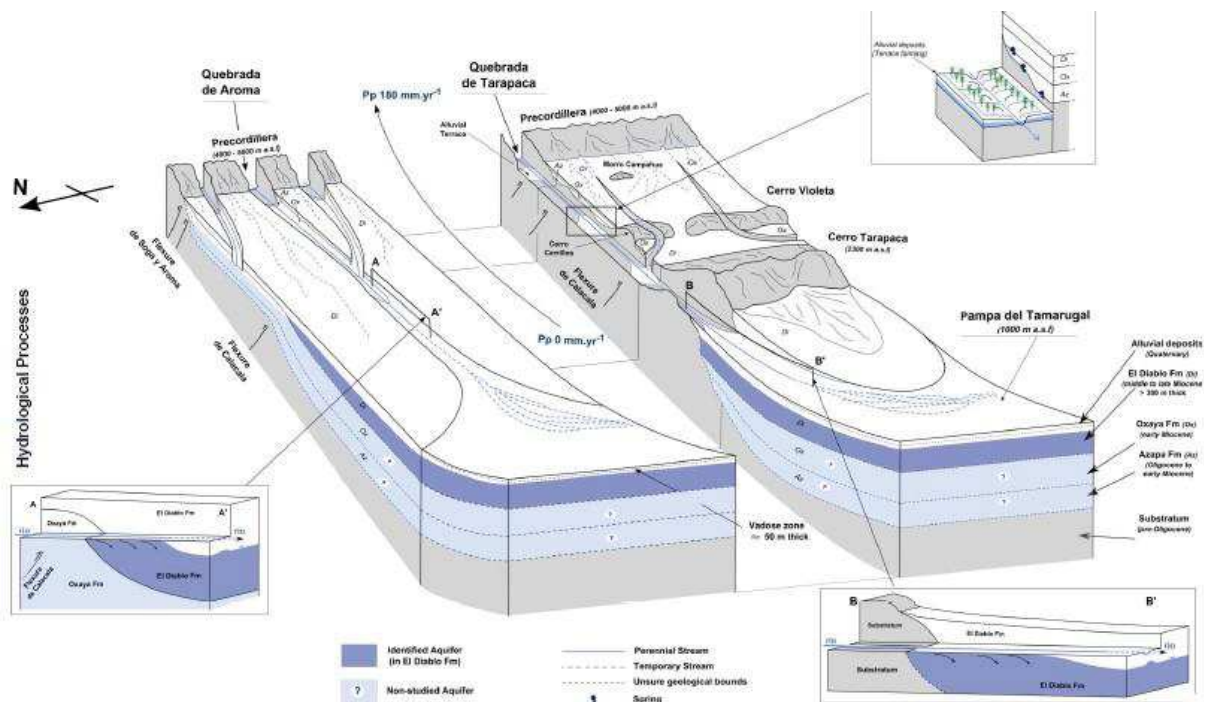


Figure 33: Modèle conceptuel de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal (partie nord ; d'après Viguiet et al., 2018)

Ce travail constitue un apport très important à la compréhension du système hydrogéologique du bassin versant de la Pampa del Tamarugal dans son ensemble. Cependant, il est restreint à la zone nord du bassin versant. Il convenait donc d'étudier la partie centrale et sud pour savoir si les concepts mis en évidence s'y appliquent.

J'ai donc initié l'étude de la zone centrale de la Pampa del Tamarugal (zone de Pica), et la zone sud (sous bassins versants de Huatacondo et Maní). Cette dernière alimente l'aquifère du Salar de Llamara, qui est un prolongement de la Pampa del Tamarugal vers le sud. Cette zone limite, au sud, le bassin endoréique de la Pampa del Tamarugal. J'ai défini la problématique de recherche, mise en place la méthodologie et conduit l'analyse des résultats qui, pour la partie centrale et la partie sud, sont en cours de valorisation.

### 2.2.1. Zone centrale du bassin versant Pampa del Tamarugal (Oasis de Pica)

Pica est un oasis située à environ 20°30 'sud et 69°20' ouest, à une altitude de 1500 m asl, dans la zone de piémont, à la jonction entre la Précordillère (Altos de Pica) et la Dépression Centrale (Pampa del Tamarugal) (Figure 2). L'oasis de Pica se situe dans le sous bassin versant de Quisma qui fait partie du bassin versant de la Pampa del Tamarugal (Figure 2). Le sous bassin versant de Quisma est traversé, d'Est en Ouest par les quebradas de Quisma et Seca qui ne présentent pas d'écoulements permanents sinon temporaires, dépendants des précipitations sur les hauteurs de la Précordillère en tête de bassin versant (Altos de Pica). Des événements de précipitation exceptionnels de fréquence pluriannuelle génèrent des écoulements jusqu'à la dépression centrale (le dernier évènement de ce type a eu lieu en 2012). La moyenne annuelle des précipitations à Pica est 10 mm. Pica doit sa condition d'oasis à la présence de sources thermales (~ 32°C) et à faible concentration de sels (~ 320 µS/cm) et d'un aquifère non confiné et peu profond dans les dépôts alluviaux d'âge holocène-pléistocène.



L'origine de l'eau souterraine de Pica a fait l'objet de plusieurs études depuis les années 60. Deux modèles de recharge ont été proposés : le premier (Dingman and Galli, 1965; Fritz et al., 1981; Suzuki and Aravena, 1985; Salazar et al., 1998; Grilli et al., 1999; Rojas et al., 2010; Jayne et al., 2016; Scheihing, Moya, and Tröger, 2017) considère que la recharge a lieu dans la Précordillère en amont de Pica et sur le même bassin versant, au-dessus de 3 500 m d'altitude, par infiltration des précipitations dans les ignimbrites de Huasco fortement diaclasées dans cette zone (Figure 36). L'eau circule ensuite dans la couverture cénozoïque du piedmont, jusqu'à Pica, au travers des conglomérats de la formation Sagasca. Celle-ci forme la base de la formation Altos de Pica constituée de dépôts volcano-sédimentaires oligo-miocènes (Figure 34). Ces dépôts sont constitués par l'alternance de séquences sédimentaires continentales épaisses (grès et conglomérats) et d'horizons volcaniques plus fins (ignimbrites de Huasco et Tambillo). Ils reposent en discordance sur le substratum mésozoïque constitué de roches volcano-sédimentaires et métamorphiques et recoupé par des intrusions plutoniques d'âge crétacé à éocène (Dingman et Galli, 1965 ; Salazar et al., 1998 ; Blanco et Ladino, 2012 ; (Salazar et al., 1998; Scheihing, Moya, and Tröger, 2017). Le deuxième modèle (Magaritz et al., 1989, 1990; Pacific Consultant International, 1995) considère une recharge depuis les bassins versants de l'Altiplano (Salar del Huasco) vers Pica et la Pampa del Tamarugal au travers de failles et fractures profondes. Cette hypothèse, souvent considérée comme « peu probable », a été réfutée dans deux articles récents (Uribe et al., 2015; Scheihing, Moya, and Tröger, 2017).

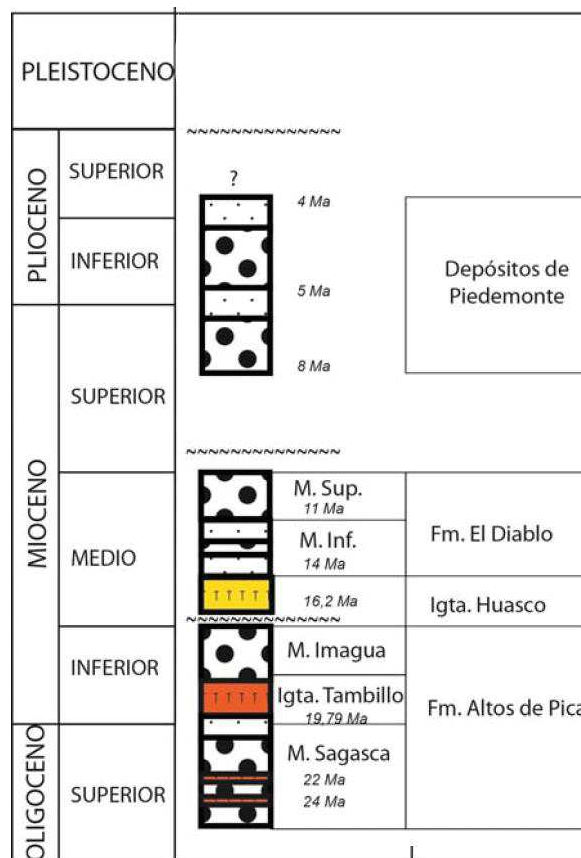


Figure 34 : Colonne stratigraphique de la Formation Altos de Pica (modifié d'après Blanco et Ladino (2012)

Selon Suzuki et Aravena (1985), dans le secteur de Pica-Matilla, il existe deux types d'eau: la première, associée aux sources thermales (Figure 36), montre des valeurs isotopiques  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  constantes (analyse continue entre 1974 et 1984), ce qui indique, selon les auteurs, une recharge lointaine (Salar del Huasco et Altos de Pica) et une grande capacité de stockage. Le second est représenté par l'aquifère de Santa Rosa et Matilla avec un contenu isotopique  $\delta^{18}\text{O}$  "plus lourd", dont l'origine la plus probable est la Quebrada de Quisma. Grilli et al. (1999) ont analysé les données isotopiques existantes, ainsi que les éléments majeurs d'échantillons de sources, galeries souterraines, puits et forages, ainsi que des échantillons d'eau de pluie et de neige provenant de la zone de recharge. Ils concluent que les eaux souterraines de Pica ont plus de 5000 ans, alors que celles du secteur de Matilla et de La Calera sont plus jeunes (50 ans).

Scheihing et al. (2017), à l'appui d'une nouvelle analyse d'un profil sismique réflexion réalisé par l'entreprise nationale de pétrole (ENAP) en 1960, propose que l'émergence des sources de Pica est induite par des intrusions plutoniques d'âge créacé qui ont pénétré le socle mésozoïque (Figure 35). Ces intrusions auraient, à long terme, déstabilisé les formations oligocènes sus-jacentes (Formation Sagasca) et permis le développement d'un important système de fractures verticales. L'eau qui circule dans la formation Sagasca (OMap 1 ; Figure 36) remonterait à la surface grâce à ce système de fractures et alimenterait les sources thermales qui elles-mêmes alimenteraient l'aquifère de Pica. Le débit total des sources (53 l/s ; Dingman et Galli, 1965; Fritz et al., 1981; Magaritz et al., 1989) montre une grande stabilité temporelle depuis plus d'un siècle (1893-2007 ; Lictevout et al., 2013). Cependant, cette étude n'a généré aucune nouvelle donnée hydrochimique et isotopique.

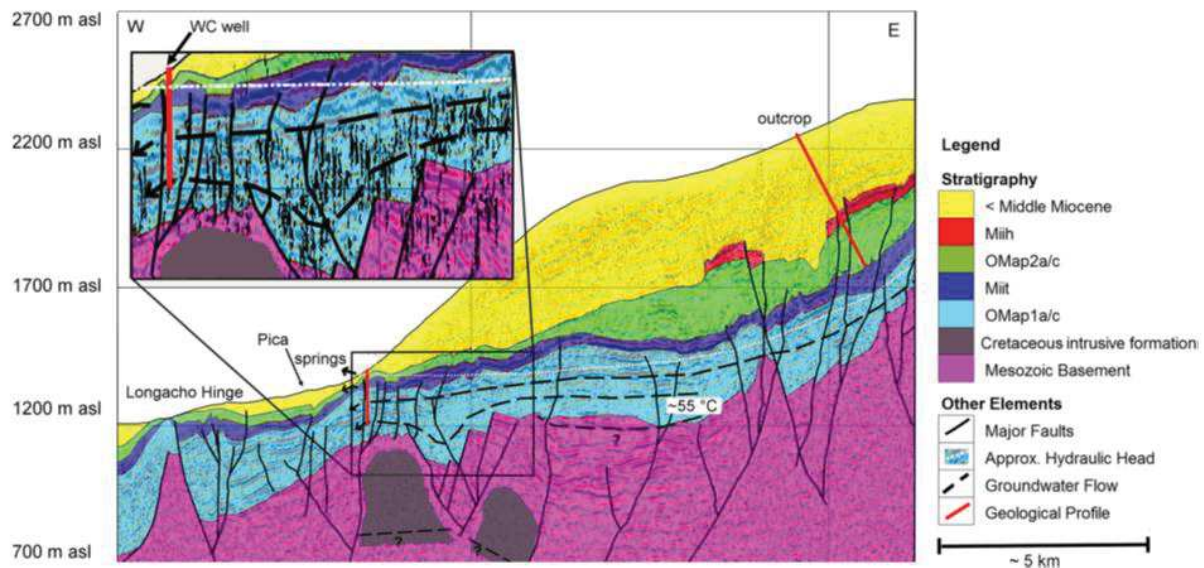


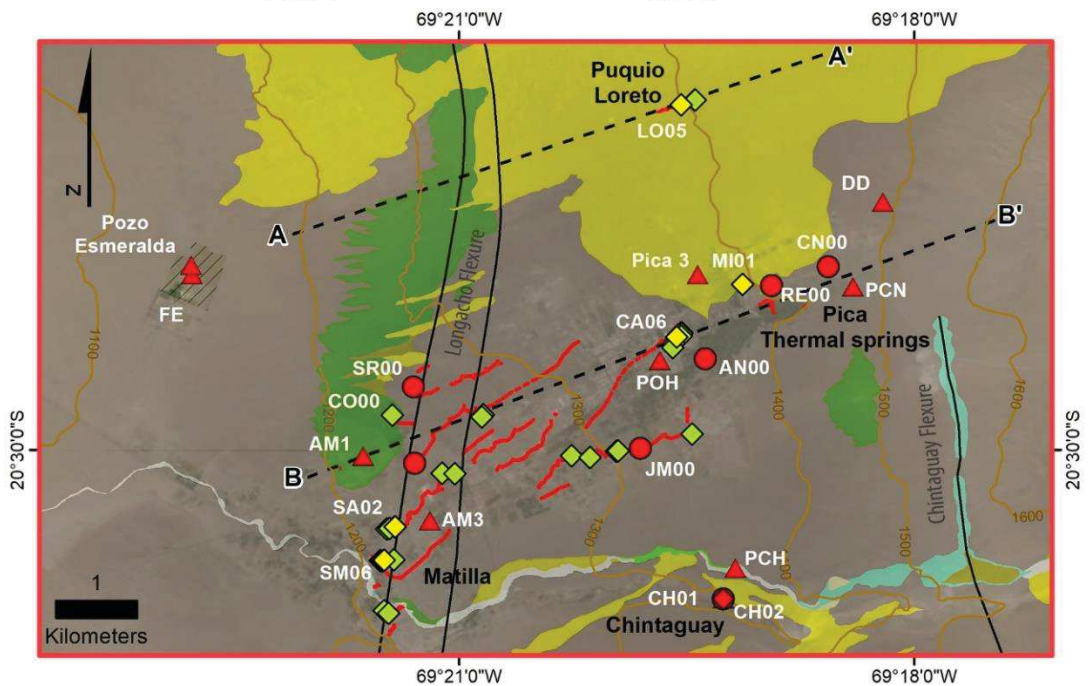
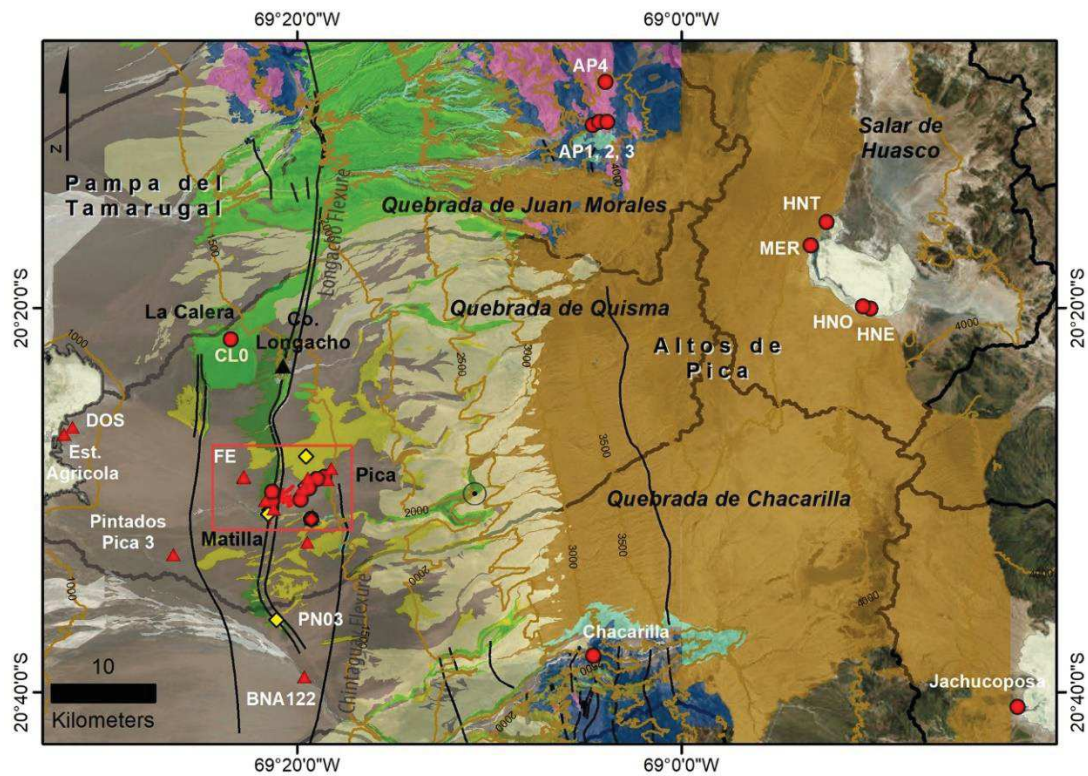
Figure 35 : Interprétation de la ligne sismique 1F003i (d'après Scheihing et al. (2017))

Une flexure en aval de l'oasis d'orientation nord-sud met en partie à l'affleurement le substratum mésozoïque (Formation Longacho datée du Sinémurien ; Figure 36) au nord-ouest de Pica. Cette flexure est considérée comme limite de l'aquifère alluvial peu profond et des écoulements souterrains au sein de la couverture cénozoïque. La connexion de l'aquifère de Pica avec l'aquifère PdT a été décrite par Dingman et Galli (1965) au niveau de Matilla (Figure 36), alors que le substratum plonge en profondeur et la topographie présente une forte rupture

de pente. Cette connexion n'a pas été étudiée depuis. Le débit des écoulement entre Pica et l'aquifère PdT a été estimé entre 21 et 30 l/s selon les auteurs (Pacific Consultant International, 1995; DICTUC, 2006). Salazar et al. (1998) ont estimé la recharge moyenne de l'aquifère de Pica à 250 l/s, résultat similaire à Karzulovic et García (1978). D'autres études (e.g. Dingman et Galli, 1965) ont proposé des recharges plus élevées. Toutes les études sont basées sur les données de la station météorologique de la DGA "Collacagua" situé à 70 km de l'oasis de Pica, dans un bassin versant endoréique de l'altiplano, pour estimer les précipitations moyennes.

Quand, en 2014, j'ai entrepris d'étudier la zone de Pica, l'objectif était de comprendre la relation entre l'aquifère de Pica et l'aquifère PdT car aucune preuve ni argument ne supportait l'existence et la nature de la connexion. La zone ne dispose que de très peu de forages dont les caractéristiques sont connues. De plus tous les forages sont pompés et ne permettent pas de mesurer le niveau piézométrique de l'aquifère. Mon but était donc de générer des données inédites grâce à l'exploration de galeries souterraines que l'on trouve dans la zone de Pica (voir 3.2). Même si ces galeries sont sub-superficielles, j'étais convaincue que celles situées le plus à l'ouest de l'oasis, au niveau de la flexure Longacho pouvait me donner de précieuses informations sur la géologie et les flux souterrains vers la Pampa del Tamarugal (Figure 36).





- |  |                          |   |
|--|--------------------------|---|
| <b>Type of water point and data source</b>               | ----- Cross section      | ■ Pleistocene-holocene modern alluvial deposits   |
| ◇ Underground gallery, this work                         | — Fold                   | ■ El Diablo Formation (Mmd)                       |
| ◇ Underground gallery, this work (only physico-chemical) | — Filtration gallery     | ■ Altos de Pica Formation, Imagua member (OMap2)  |
| ● Spring, other studies                                  | □ Salars                 | ■ Tambillo Ignimbrite (Miit)                      |
| ◆ Underground gallery, other studies                     | □ Subcatchment           | ■ Altos de Pica Formation, Sagasca member (OMap1) |
| ▲ Well, other studies                                    | /// Antropic deposits    | ■ Huasco ignimbrite (Mih)                         |
| ○ Outcrop  | ■ Modern eolian deposits | ■ Intrusive complex (Cretaceous and Paleogene)    |
|  | ■ Piedmont deposits      | ■ Mesozoic basement                               |

Figure 36: Géologie de la zone d'étude et localisation des galeries souterraines, sources et forages avec données hydrochimiques et isotopiques acquises lors de cette étude et des études antérieures (Magaritz et al., 1989; Amphos 21, 2012 ; Uribe et al., 2015). Les sigles identifiant les points d'eau sont décrits dans le Tableau 7.



## Méthodologie

La méthodologie a consisté en l'exploration de 11 galeries souterraines, leur étude géologique et hydrogéologique (mesures physico-chimiques, niveau piézométrique, caractérisation des flux), puis à l'analyse chimique (éléments majeurs et traces) et isotopique (isotopes stables de l'eau) de neuf sources présentes dans ces galeries (Tableau 7 et Figure 36). Les analyses chimiques (éléments majeurs et traces) ont été réalisées par le laboratoire HydroSciences Montpellier par chromatographie ionique (anions) et ICP-MS (cations et éléments en trace). Les analyses des isotopes de la molécule d'eau ( $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ) ont été réalisées par le laboratoire LAMA (Laboratoire mutualisé d'analyse des isotopes stables de l'eau) à HydroSciences Montpellier.

A ces données s'ajoute l'étude d'un affleurement qui recoupe une grande partie de la série volcano-sédimentaire en amont de l'oasis de Pica, dans la Quebrada de Quisma (Figure 36). De plus, j'ai utilisé des données existantes (Tableau 7 et Figure 36):

- . Données isotopiques ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  et Carbone 14) de sources et forages analysées par Magaritz et al. (1989)
- . Données chimiques et isotopiques ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  et Carbone 14) de sources et forages générées dans le cadre d'une étude de la Compagnie Minière Doña Inès de Collahuasi réalisée par le bureau d'étude AMPHOS 21 (2012).
- . Données géophysiques de gravimétrie générées dans le cadre de deux études financées par la DGA en 2012 et 2013 (non publiées).
- . Données isotopiques ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) de sources et forages analysées par Uribe et al. (2015).

## Résultats

En premier lieu, les résultats de l'étude géologique et hydrogéologique des galeries souterraines de Pica m'ont amené à réorienter mon objectif initial. En effet, mes observations et analyses remettent en cause certains des résultats des études précédentes quant à l'origine des eaux souterraines de Pica (modèle de recharge), et en confirment d'autres. Ce travail m'a donc permis de formuler et d'argumenter de nouvelles hypothèses quant à la recharge de ces eaux souterraines ; ces hypothèses remettent par ailleurs en question à plus grande échelle l'origine de la recharge de la PdT et apportent de nouveaux éléments relatifs à la connexion entre l'aquifère de Pica et de la PdT.

Tableau 7 : Caractéristiques des points d'eau utilisés pour l'analyse hydrochimique et isotopique

Code	Nom / secteur	Bassin versant	Type de point d'eau	Source données	UTM_N	UTM_E	Altitude (m)
CA02	El Carmen	Quisma	Source dans galerie souterraine	Ce travail	7734566	466054	1300,7
CA05	El Carmen	Quisma	Source dans galerie souterraine	Ce travail	7734523	465993	1282,3
CA06	El Carmen	Quisma	Source dans galerie souterraine	Ce travail	7734524	465996	1307,1
SA02	El Sauque	Quisma	Forage artésien dans galerie souterraine	Ce travail	7732214	462772	1230
LO05	Loreto	Quisma	Source dans galerie souterraine	Ce travail	7737349	466045	1359,6
LO10	Loreto	Quisma	Puits dans galerie souterraine	Ce travail	7737407	466203	1364
MI01	Miraflores	Quisma	Source dans galerie souterraine	Ce travail	7735168	466750	1397
PN03	Puquio Nuñez	Quisma	Source dans galerie souterraine	Ce travail	7721678	463429	1193,9
SM06	San Matías	Quisma	Source dans galerie souterraine	Ce travail	7731809	462650	1231,9
CN00	Concova	Quisma	Source	AMPHOS 21 (2012)	7735382	467732	1435
PCN	Concova	Quisma	Forage	AMPHOS 21 (2012)	7735137	468013	1472
RE00	Resbaladero	Quisma	Source	AMPHOS 21 (2012)	7735155	467082	1387
AN00	Las Ánimas	Quisma	Source	Magaritz & Aravena (1989)	7734258	466327	1320
CO00	Comiña	Quisma	Galerie souterraine	Magaritz & Aravena (1989)	7732984	462996	1250
JM00	Jesús María	Quisma	Galerie souterraine	Magaritz & Aravena (1989)	7733168	465581	1308,9
CL00	La Calera	Quisma	Galerie souterraine	AMPHOS 21 (2012)	7748539	459221	1396
AM1	Matilla	Quisma	Forage	AMPHOS 21 (2012)	7732281	463171	1270
AM3	Alto Matilla	Quisma	Forage	AMPHOS 21 (2012)	7733066	462404	1207
DD	Pica	Quisma	Forage	AMPHOS 21 (2012)	7736171	468353	1488
FE	Matilla	Quisma	Forage	AMPHOS 21 (2012)	7735274	460440	1127
PICA3	Pica	Quisma	Forage	AMPHOS 21 (2012)	7735282	466232	1349
PIN13	Matilla	Quisma	Forage	AMPHOS 21 (2012)	7731712	466672	1296
PCH	Chintaguay	Quisma	Forage	Magaritz & Aravena (1989)	7731342	466536	1280
CH01	Chintaguay	Quisma	Source	Magaritz & Aravena (1989)	7731342	466536	1280
CH02	Chintaguay	Quisma	Galerie souterraine	Magaritz & Aravena (1989)	7731342	466536	1280
SR00	Santa Rosa	Quisma	Galerie souterraine	Magaritz & Aravena (1989)	7733912	462980	1250
PSR	Santa Rosa	Quisma	Forage	Magaritz & Aravena (1989)	7729098	466205	1290
AP1	-	Juan Morales	Source	Uribe et al. (2015)	7769130	491971	3561
AP2	-	Juan Morales	Source	Uribe et al. (2015)	7769424	492555	3546
AP3	-	Juan Morales	Source	Uribe et al. (2015)	7769458	493282	3523
AP4	-	Juan Morales	Source	Uribe et al. (2015)	7773271	493106	3745
POH	Pica	Quisma	Forage	AMPHOS 21 (2012)	7734237	465803	1282
HLE	Salar de Huasco Sur	Salar de Huasco	Source	AMPHOS 21 (2012)	7751530	517090	3794
HLO	Salar de Huasco Sur	Salar de Huasco	Source	AMPHOS 21 (2012)	7751741	516421	3793
HNT	Salar de Huasco Norte	Salar de Huasco	Source	AMPHOS 21 (2012)	7759850	513130	3816
Mer	Ermitaño	Salar de Huasco	Source	AMPHOS 21 (2012)	7757598	511696	3789
Jachucoposa	Jachucoposa	Salar de Coposa	Source	Magaritz & Aravena (1989)	7713300	530323	3740
Chacarilla	Chacarilla	Chacarilla	Source	AMPHOS 21 (2012)	7718257	492021	2249
Pozo Esmeralda	Esmeralda	Pampa del Tamarugal	Forage	AMPHOS 21 (2012)	7735384	460427	1115
Pintados Pica 3	Matilla camino a Pintados	Pampa del Tamarugal	Forage	Magaritz & Aravena (1989)	7727883	454128	1080
BNA122	Salida Chacarilla	Pampa del Tamarugal	Forage	Magaritz & Aravena (1989)	7716180	465954	1276
Est. Agrícola Los Canchones	Canchones	Pampa del Tamarugal	Forage	Magaritz & Aravena (1989)	7739416	444203	994
D.O.S	Canchones	Pampa del Tamarugal	Forage	Magaritz & Aravena (1989)	7740087	444935	1000

1) L'étude géologique des galeries souterraines a mis en évidence la présence du toit de l'ignimbrite de Tambillo dans les galeries situées à l'Ouest de Pica (Matilla) c'est-à-dire au droit de la flexure de Longacho (supposée) (Figure 36, Figure 37). Sa présence est due à une faille inverse, avec pendage ouest qui recoupe seulement le substratum mésozoïque (jurassique) (Labbé et al., 2015). Cette faille, qui s'est activé probablement entre 17 et 10 Ma (Miocène moyen) déforme la formation Sagasca (OMap 1) et l'ignimbrite de Tambillo (MiiT) (Victor et al., 2004). Les formations Imagua (OMap 2) et El Diablo (Mmd) se terminent en biseau avant la zone de flexure. La formation El Diablo est la plus affectée par cette flexure, avec la formation de structures fracturées dans l'axe du pli.

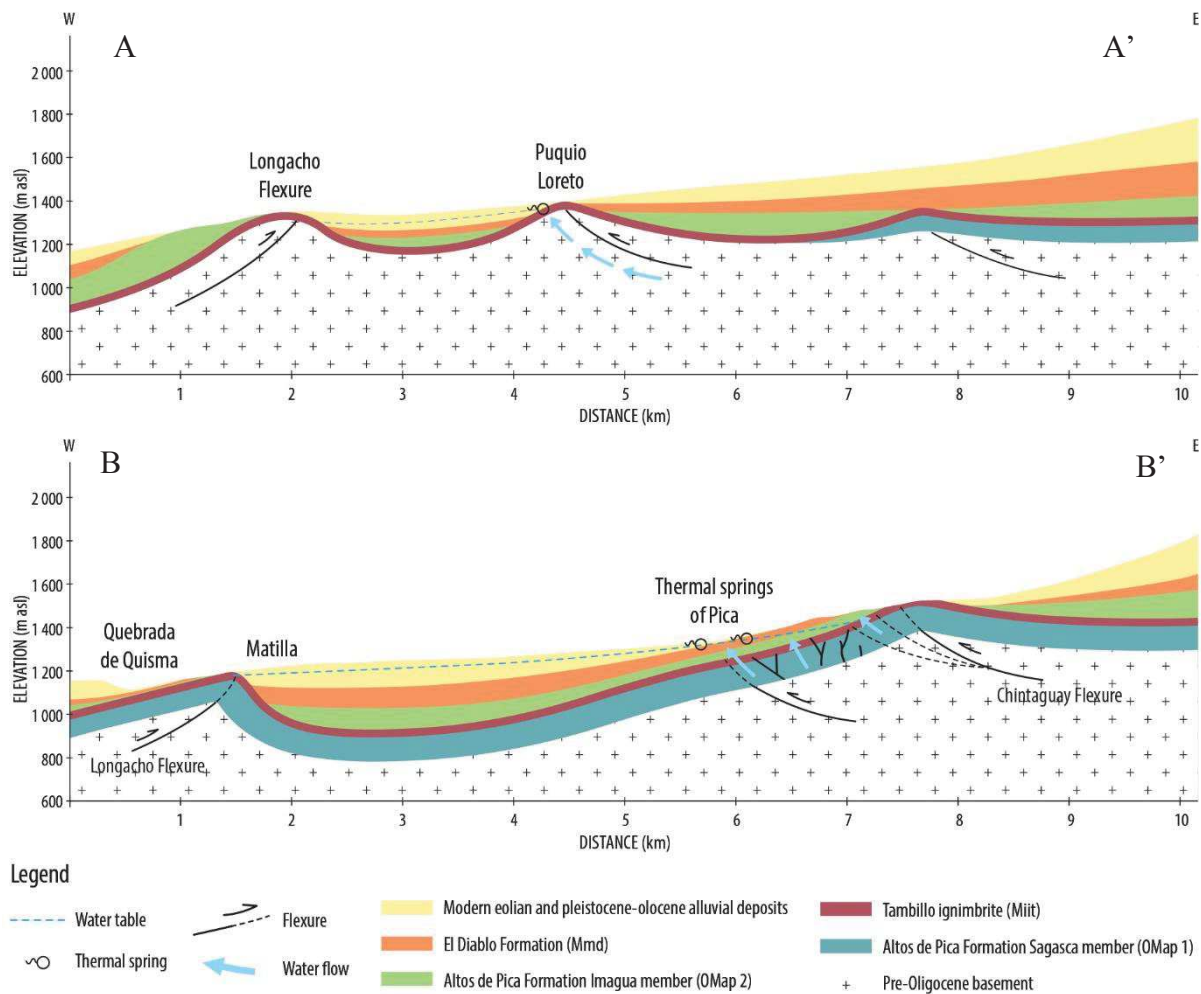


Figure 37: Coupes géologiques et hydrogéologiques de l'aquifère de Pica. L'emplacement des coupes est indiqué en Figure 36.

2) L'étude géologique a aussi mis en évidence que l'ignimbrite de Tambillo est fortement diaclasée (Figure 38) ce qui lui confère une perméabilité secondaire. L'étude géologique a aussi mis en évidence la présence importante de couches argileuses dans les dépôts alluviaux pléistocène-holocènes, qui forment l'aquifère de Pica. Ceci est confirmé par les colonnes stratigraphiques relevées sur des forages profonds (environ 100 mètres de profondeur) entre Pica et Matilla. L'ignimbrite n'est donc pas la formation qui limite à sa base l'aquifère alluvial de Pica, sinon les couches argileuses des dépôts alluviaux anciens du Pléistocène-Holocène.

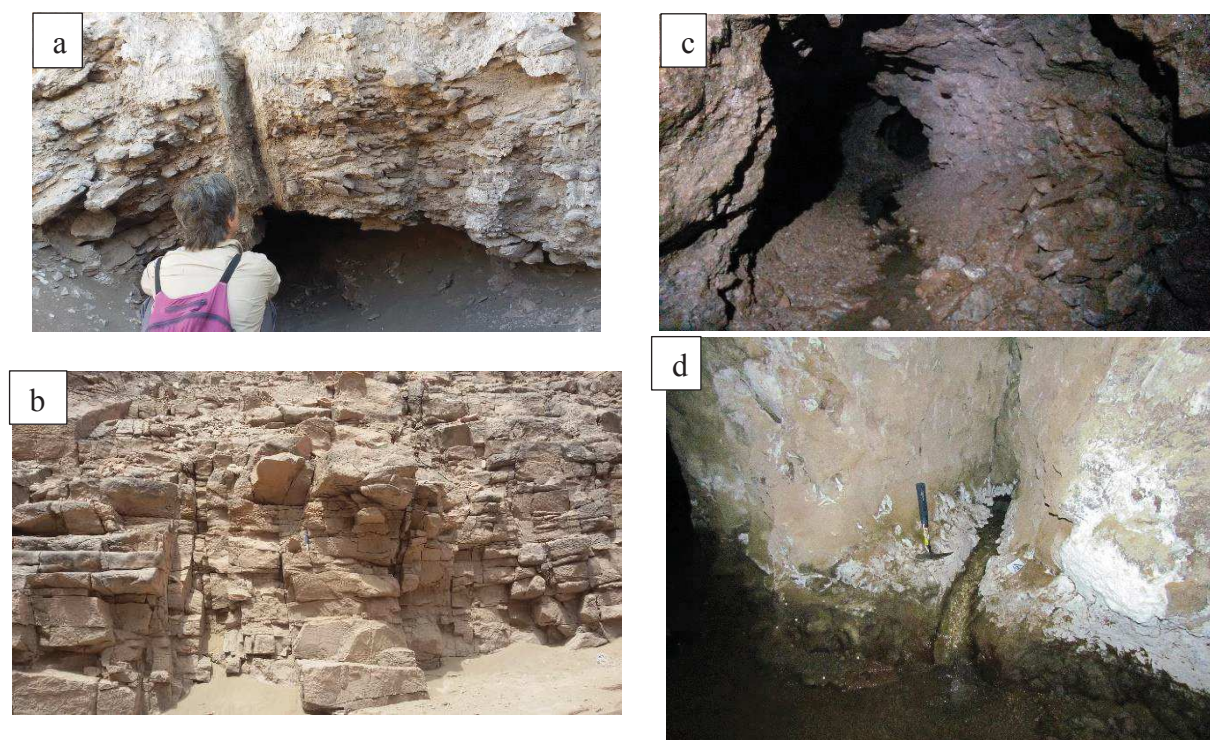


Figure 38: a et b : Photos d’affleurement d’ignimbrite de Tambillo sur le flanc occidental de la Flexure de Longacho (a) et dans la Quebrada de Quisma (b) ; (c) Source au fond de la galerie San Matias, dans les sables peu consolidés du Pléistocène-Holocène ; (d) Source de Loreto émergeant au sein d’une fracture dans l’ignimbrite de Tambillo.

3) L’étude hydrogéologique a identifié différents types de sources dans les galeries : source par émergence dans les sables non consolidés des dépôts alluviaux pléistocène-holocènes (la galerie recoupe le niveau piézométrique de l’aquifère et draine ce dernier afin d’emmener l’eau par gravité à la surface ; Figure 38c), source par débordement (alimentation via des fractures dans les ignimbrites (Loreto) ou les grès et conglomérats de la formation El Diablo et celle d’Imagua (sources thermales de Pica ; Figure 38d).

4) La source de la galerie souterraine de Loreto (LO05) affiche la température la plus élevée de l’oasis de Pica (34°C), les sources thermales de Pica (Resbaladero RE00, Concova CN00) affichant une température de 32°C. Mais ces dernières ont une conductivité électrique très basse pour la région (~320µS/cm) alors que Loreto a une conductivité électrique élevée (~2200µS/cm). Les sources des galeries souterraines de la zone de Matilla ont une conductivité électrique intermédiaire entre ces deux extrêmes (~1100µS/cm) et une température de 27°C environ (Tableau 8 ; Figure 36).



Tableau 8 : Données physico-chimiques des sources échantillonnées dans les galeries souterraines

Code	Nom galerie souterraine	UTM_N	UTM_E	Altitude (m)	Date	T (°C)	C (μS/cm)	pH
CA02	El Carmen	7734566	466054	1325,47	20/07/2017	25,4	2,31	7,24
CA05	El Carmen	7734523	465993	1307,08	20/07/2017	26,4	1,13	7,6
CA06	El Carmen	7734524	465996	1307,15	20/07/2017	25,3	0,82	8,06
SA02	El Sauque	7732214	462772	1230,026	19/07/2017	27,4	1,14	7,98
LO05	Loreto	7737349	466045	1359,615	20/07/2017	34,7	2,2	8,75
LO10	Loreto	7737407	466203	1364,025	20/07/2017	16,7	2,42	8,05
MI01	Miraflores	7735168	466750	1397,000	20/07/2017	31,5	0,33	8,21
PN03	Puquio Nuñez	7721678	463429	1193,97	18/07/2017	26,7	0,52	9,06
SM06	San Matías	7731809	462650	1231,29	18/07/2017	28	1,25	7,9

5) Les eaux souterraines de Pica ont un faciès qui varie de bicarbonaté sodique (Miraflores MI01, Resbaladero RE00, Concova CN00, Puquio Nuñez PN03) à sulfaté sodique (San Matias SM06, El Sauque SA02, Loreto LO05, Santa Rosa SR00). Ces faciès avaient déjà été décrits par Grilli et al. (1999). Le faciès bicarbonaté sodique des sources thermales de Pica se retrouve dans les sources de la bordure nord, ouest et sud du Salar de Huasco (Figure 36 ; Figure 39). Selon Aravena (1995), le faciès bicarbonaté-sodique est observé pour les eaux circulant dans les sédiments volcaniques tels que les ignimbrites.

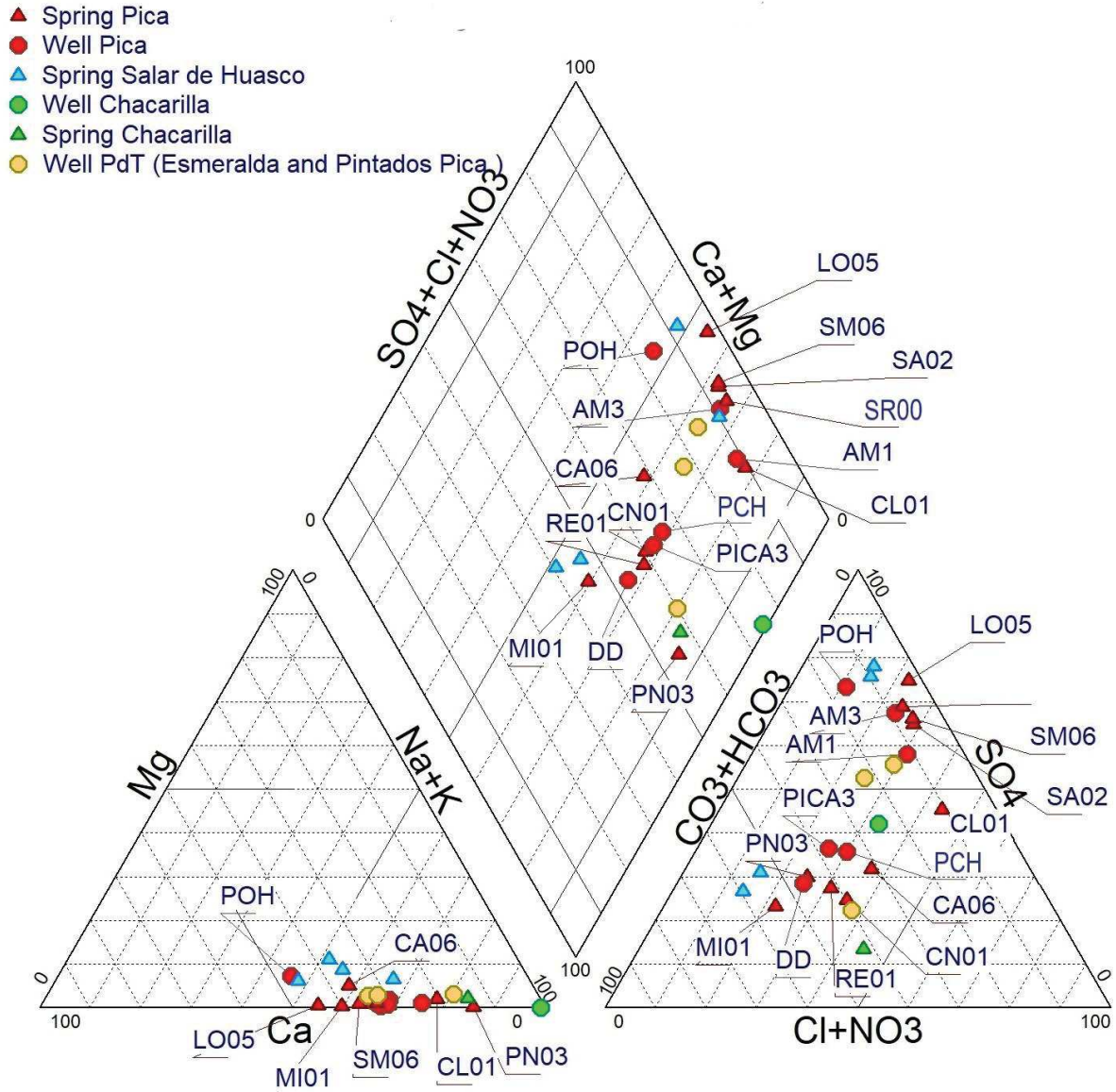


Figure 39: Diagramme de Piper des sources et forages des bassins versants de Quisma, Salar de Huasco, Chacarilla et bordure orientale de la zone centrale de la Pampa del Tamarugal

6) L'étude des éléments majeurs et traces des eaux souterraines de Pica, et leur comparaison avec les données des bassins versants voisins (Salar de Huasco, Chacarilla et l'aquifère PdTen aval de Pica) permet d'identifier les éléments suivants (Figure 40):

- Tous les points s'alignent sur une droite  $Na = 1,9 \cdot Cl + 1,07$  et ont tous un rapport  $Na/Cl$  supérieur à 1. Selon Magaritz et al. (1989), cela indique un apport provenant de l'altération des silicates.
- On distingue trois groupes de sources : 1) Les sources thermales de Pica (Resbaladero RE00, Concova CN00, Miraflores MI01, Carmen CA06), les forages proches de ces sources (DD, Pica3), le forage artésien de Chintaguay (PCH) ainsi que Puquio Nuñez (PN03) ont leurs rapports  $Na/Cl$  et  $Ca/SO_4^{2-}$  très proches et des concentrations en  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  faibles; 2) A l'opposé, les sources émergeant dans les galeries souterraines de Loreto et La Calera - respectivement au nord et nord-ouest de Pica-Matilla - ont des concentrations  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$  et  $SO_4^{2-}$  beaucoup plus élevées que les eaux souterraines décrites précédemment ; 3) Entre les

deux, on trouve les sources émergeant dans les galeries souterraines de la zone de Matilla (San Matias – SM06, El Sauque-SA02, SR00), ainsi que dans les forages proches (AM3, POH).

- Les sources thermales et forages de Pica (MI01, RE00, CN00) ont un rapport  $\text{Ca}/\text{SO}_4^{2-}$  égal ou supérieur à 1 (dissolution de gypse ?) tout comme les sources du Salar de Huasco représentées par des triangles bleu clair sur les graphiques. Loreto (LO05), à l'opposé, a un rapport  $\text{Ca}/\text{SO}_4^{2-}$  faible. Entre les deux se trouvent les galeries souterraines et forages de Matilla, et La Calera (CL) qui ont aussi un rapport  $\text{Ca}/\text{SO}_4^{2-}$  très proches.

- Les sources thermales du centre de Pica (MI01, RE00, CN00) ainsi que Chintaguay (PCH), Puquio Nuñez (PN03), La Calera (CL01) et Loreto (LO05) ont un rapport Na/K élevé qui, selon Magaritz et al. (1989), serait indicateur d'un temps de circulation élevé au sein de l'aquifère. Au contraire, les galeries souterraines de Matilla ainsi que les forages proches ont un rapport Na/K faible qui signifierait un temps de circulation moins élevé. Ceci est aussi le cas des sources du Salar del Huasco, ce qui est cohérent avec le modèle de Magaritz et al. (1989) car ces eaux se sont rechargé sur les Altos de Pica, proche. Le modèle est moins cohérent pour les sources et forages de Matilla, ainsi que pour les forages de la PdT (Esmeralda et Pintados Pica).

- Les forages de l'aquifère PdT (zone Esmeralda et Pintados Pica à l'ouest de Matilla et de la Flexure Longacho) ont un rapport Na/Cl et Na/K proche des galeries souterraines et forages de Matilla.

Ces résultats nous permettent donc d'identifier deux pôles : d'un côté l'eau très faiblement minéralisée ( $\sim 320 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) et thermique ( $\sim 32^\circ\text{C}$ ) des sources de Pica (situées sur la bordure est de l'aquifère). Et d'un autre côté, l'eau très minéralisée ( $\sim 2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) et thermique ( $34^\circ\text{C}$ ) de la zone nord de l'aquifère (Loreto). Entre les deux (zone centrale et ouest, ainsi que les forages de l'aquifère PdT proches), les eaux montrent un mélange entre ces deux pôles ( $\sim 1100 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). La température moins élevée de ces dernières ( $\sim 27^\circ\text{C}$ ) est probablement due au refroidissement des eaux des deux pôles dans l'aquifère peu profond de Pica qui, de plus, reçoit l'infiltration d'eau par retour d'irrigation.

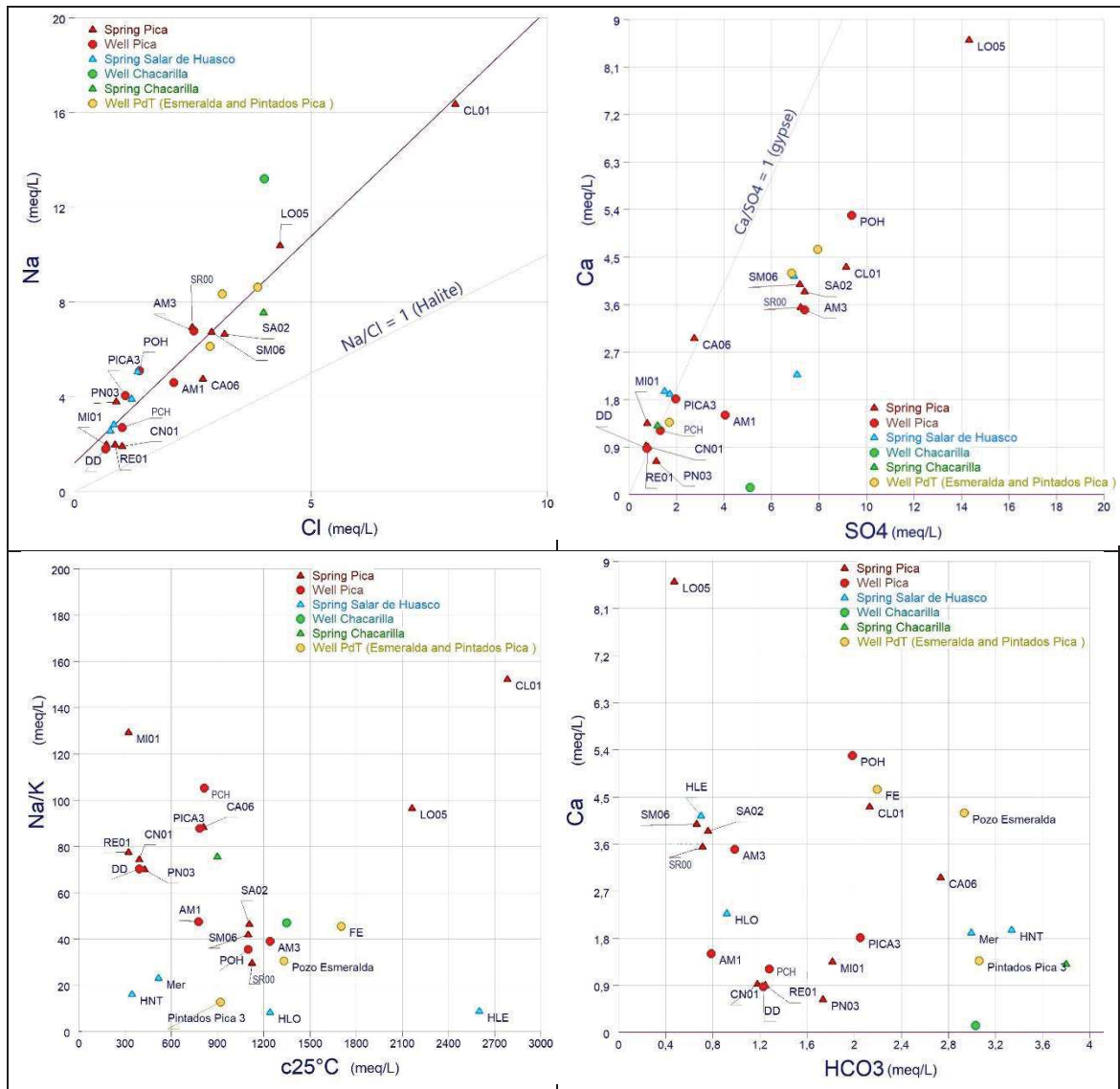


Figure 40: Diagrammes binaires Na-Cl, Ca-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na/K-Conductivité et Ca-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> des sources, galeries souterraines et forages des bassins versants de Quisma, Salar de Huasco, Chacarilla et bordure orientale de la zone centrale de la Pampa del Tamarugal (réalisés avec le logiciel Diagramme de l'Université d'Avignon).

7) Dans la zone d'étude, les valeurs isotopiques en  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  des précipitations s'alignent sur une droite d'équation  $\delta^2\text{H} = 7,8. \delta^{18}\text{O} + 10,3$  (Local Meteoric Water Line – LMWL ; Fritz et al., 1981 ; Aravena et al., 1999) parallèle à la Global Meteoric Water Line (GMWL) définie par Craig (1961). D'autre part, dans le nord du Chili, les valeurs isotopiques  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux souterraines s'alignent sur une droite d'équation  $\delta^2\text{H} = 7,9. \delta^{18}\text{O} - 0,26$  appelée Groundwater line (Viguié, 2016). La Groundwater line est parallèle à la LMWL mais appauvrie en  $\delta^2\text{H}$  (Figure 41). Deux modèles ont été proposés pour expliquer cette variation : a) l'un propose que les valeurs isotopiques des eaux souterraines ne reflètent pas celles de précipitations actuelles et impliquent que la recharge de ces hydrosystèmes a eu lieu sous des conditions hydroclimatiques différentes de celles actuellement (Fritz et al., 1981 ; Aravena, 1995 ; Viguié, 2016) ; b) l'autre réfute ce modèle et propose que les variations des valeurs isotopiques sont dues aux effets de continentalité et d'altitude, et du mélange de masses d'air avec différents contenus isotopiques à la transition entre la Précordillère et l'Altiplano (sources



de vapeur orientales et occidentales ; Scheihing et al. (2017)). Ces effets, contrôlés par la topographie, mèneraient à une gamme de valeur isotopique caractéristique de chaque bassin versant. Sur la base de ces observations, les auteurs utilisent  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  pour délimiter six zones dans l'aquifère PdT correspondant à des zones de recharge distinctes dans la Précordillère et le Piedmont.

Les eaux souterraines de Pica se distribuent sur la Groundwater line tout comme les eaux souterraines de la Pampa del Tamarugal et eaux de source de la Précordillère (Aravena, 1995; Viguier, 2016 ; Figure 41). Dans la zone d'étude, l'analyse des isotopes stables de la molécule d'eau ( $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ) confirme les résultats des analyses des éléments majeurs (Figure 41). En effet, les sources thermales de Pica (MI, CN, RE, CA) et forages proches, ainsi que les eaux de la source et du forage artésien de Chintaguay (CH) affichent des valeurs isotopiques proches, appauvries en  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ . Les eaux des galeries souterraines de Loreto et de Matilla montrent des valeurs plus enrichies en  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ . Les eaux de La Calera ont les valeurs  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  les plus enrichies de la zone. Il est intéressant de noter que les eaux de Pica et Chintaguay ont des valeurs proches des sources du bord occidental et sud du Salar de Huasco. Ceci a été démontré et expliqué dans plusieurs études antérieures (Magaritz et al., 1989 ; Uribe et al., 2015 ; Scheihing et al., 2017) par le fait que ces sources ont la même zone de recharge (Altos de Pica). Par contre, les eaux de Matilla, Loreto et La Calera sont enrichies, tout comme l'eau des sources prélevées en tête de bassin versant de Juan Morales (AP1, AP2, AP3, AP4), situé immédiatement au nord du bassin versant de Quisma et alimentant aussi l'aquifère PdT.

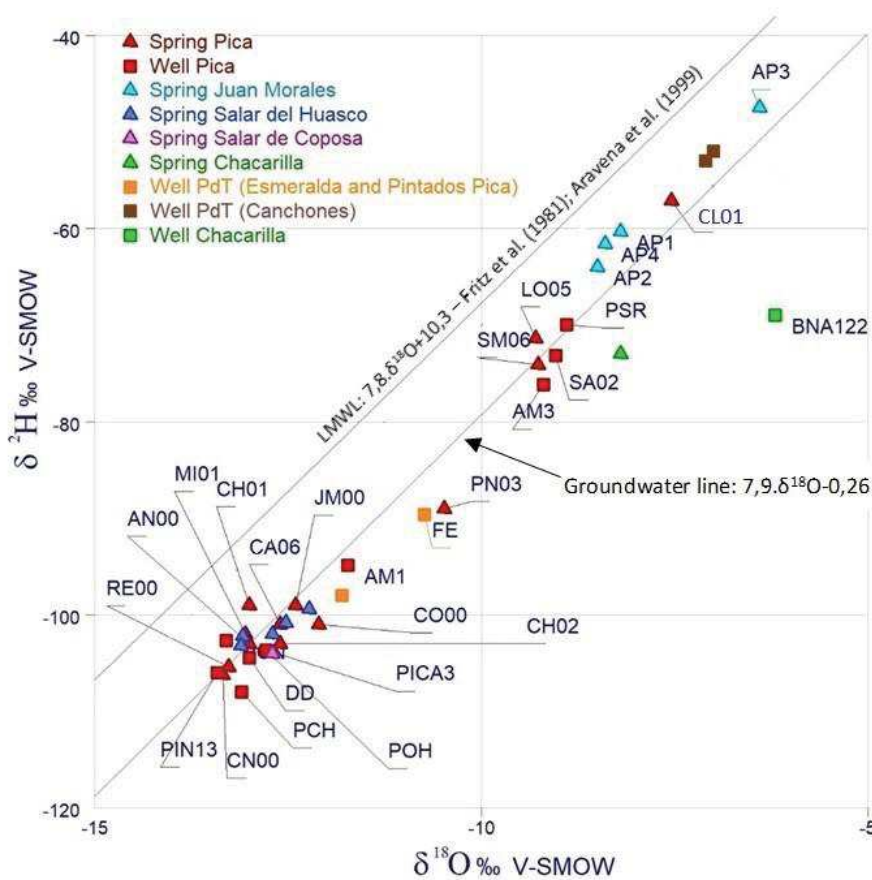


Figure 41: Analyses isotopique ( $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ ) de sources et forages de la zone d'étude

### Discussion :

Sur la base de ces résultats, j'ai élaboré un nouveau modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique de l'oasis de Pica (Figure 42):

1) Il existe bien deux types d'eau qui rechargent l'aquifère de Pica. Mais contrairement à l'hypothèse avancée par Suzuki et Aravena (1985) et Grilli et al. (1999), il s'agit :

- i) d'une part, d'une eau ayant pour recharge les précipitations dans les Altos de Pica, circulant dans la couverture cénozoïque (formation Sagasca, OMap1) et surgissant au niveau de Pica (sources thermales) par les nombreuses fractures générées par la faille de Chintaguay qui affecte le substratum mésozoïque et plisse fortement la couverture cénozoïque. Cette eau a une très faible minéralisation et une empreinte thermique qui correspond à sa profondeur de circulation. Les flux ont une direction générale E-O.
- ii) d'autre part, d'une eau provenant de la couverture mésozoïque, très minéralisée (~ 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) et thermique (34°C) qui recharge l'aquifère de Pica du fait d'une remontée du substratum au nord de Pica, et à l'est de la flexure de Longacho, où il se retrouve sub-affleurant. L'eau émerge au travers de fractures sans déplacement qui affectent l'horizon d'ignimbrite qui recouvre le substratum à cet endroit (les membres OMap 1 et 2 de la couverture cénozoïque seraient absents). Les flux principaux ont une direction N-S.

2) Un troisième groupe est conformé par les eaux souterraines de Matilla, qui semblent être un mélange entre les deux types d'eau décrits précédemment car situées à la convergence des flux venant du nord (Loreto) et de l'est (Pica).

3) Les eaux des forages de l'aquifère Pampa del Tamarugal situées en aval de Matilla ont une composition chimique proche des eaux souterraines de Matilla, ce qui permet de confirmer la continuité des flux au sein de l'horizon d'ignimbrite et de la formation Sagasca (OMap1) qui assurent la connexion hydrogéologique entre l'aquifère de Pica et la PdT.

4) Les deux types d'eau définis précédemment ont des valeurs isotopiques en  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$  qui correspondent probablement à des zones de recharge différentes. Les deux zones seraient cependant situées dans la Prêcordillère, à faible distance et altitudes similaires : Altos de Pica pour les sources thermales de Pica et Chintaguay (quebrada de Quisma) et tête de bassin versant de Juan Morales, au nord des Altos de Pica, pour les eaux de Loreto et La Calera. Ces différences ne peuvent pas s'expliquer par la différence d'altitude des zones de recharge (similaire) ni par des conditions paléoclimatiques différentes. Les deux zones de recharges correspondent à celles définies par (Scheihing et al., 2017). Cette hypothèse est donc considérée. Cependant, une autre hypothèse est proposée dans le cadre de ce travail : les deux zones de recharge ont des formations géologiques différentes : Couverture cénozoïque (ignimbrites de Huasco) pour les Altos de Pica et substratum mésozoïque (formation Empexa) pour Juan Morales. Il est donc envisagé que les processus de fractionnement isotopique dans la zone non saturée, soient différents selon le type de formation géologique de la zone non saturée. Dans les ignimbrites fortement fracturées des Altos de Pica, l'eau s'infiltrerait rapidement, peu affectée par l'évaporation. Ceci expliquerait des valeurs isotopiques appauvries en  $\delta^{18}\text{O}$ . Par contre, dans les formations mésozoïques (Andésites de la Formation Empexa), qui a une perméabilité secondaire faible, l'eau s'infiltrerait beaucoup plus lentement et serait plus affectée par l'évaporation. L'eau souterraine en résulte enrichie en  $\delta^2\text{H}$  et  $\delta^{18}\text{O}$ .

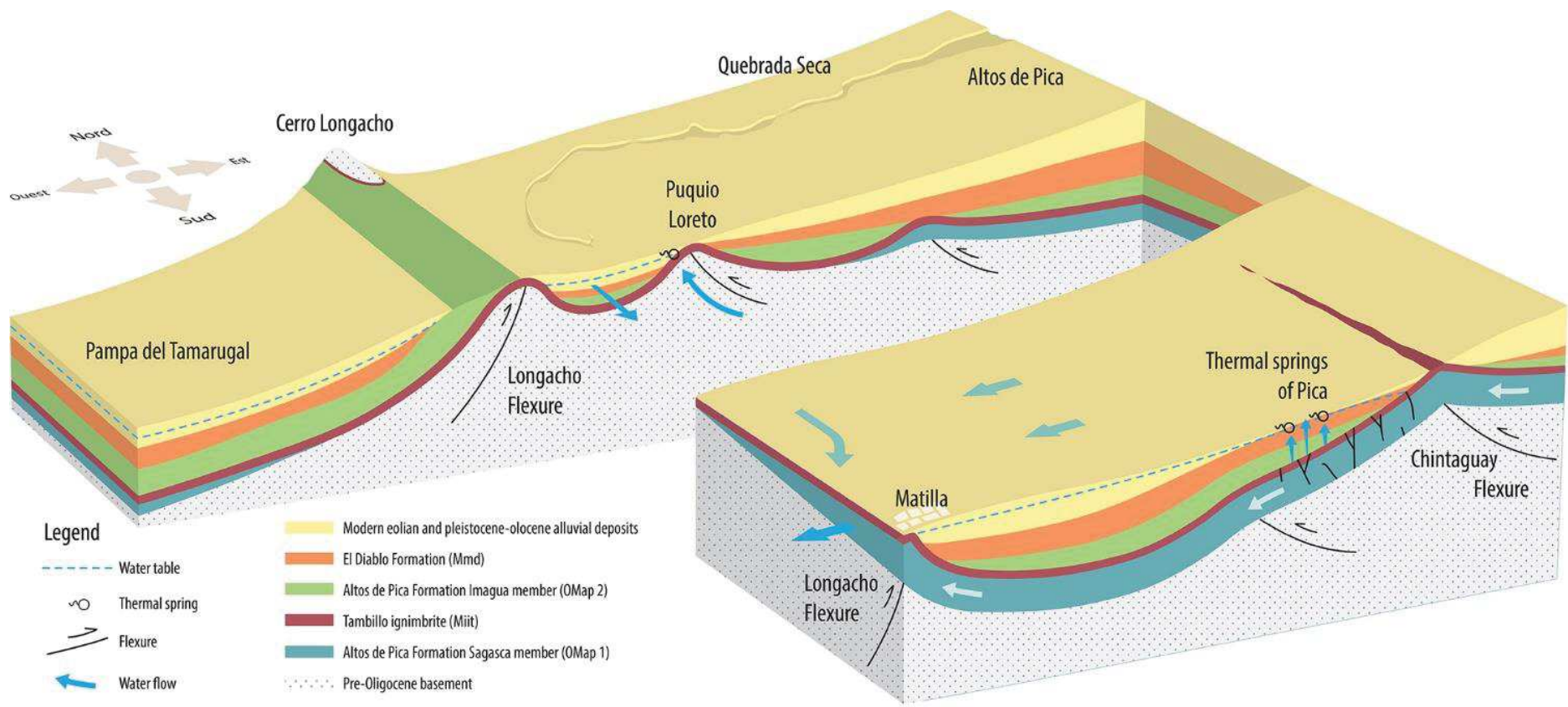


Figure 42: Modèle conceptuel de recharge de l'aquifère de Pica et connexion avec la Pampa del Tamarugal

La génération de données inédites sur l'aquifère de Pica a permis de remettre en question le modèle de recharge établi et de confirmer l'hypothèse suivant laquelle le substratum mésozoïque jouerait un rôle majeur dans la recharge de l'aquifère de Pica, non seulement en contrôlant les flux au sein de la couverture cénozoïque mais également en étant le siège de flux spécifiques contribuant à cette recharge.

Ce travail permet aussi de confirmer et préciser la continuité des couches aquifères entre le piedmont et la PdT, au droit de la flexure de Longacho, au sud de la zone où le substratum est mis à l'affleurement par la flexure.

L'ensemble de ces résultats confirme les supposés apports du substratum à la recharge de la PdT (Magaritz et al., 1990) et permet de proposer un nouveau modèle conceptuel permettant d'expliquer le fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère peu profond de Pica : cet aquifère serait en quelque sorte une nappe « perchée » dont le mur correspondrait aux argiles des dépôts alluviaux pléistocène-holocène. Il serait alimenté d'une part par les fractures au sein de la formation Sagasca et ignimbrite de Tambillo, qui sont mises presque à l'affleurement par la faille de Chintaguay, et d'autre part par le substratum mésozoïque et les fractures de l'ignimbrite de Tambillo, sub-affleurant au nord de l'aquifère.

Le modèle conceptuel de fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère de Pica étant connu, il reste maintenant à quantifier cette recharge ainsi que la recharge de la PdT associée à la continuité de la formation Altos de Pica.

### 2.2.2. Zone sud du bassin versant Pampa del Tamarugal (Huatacondo et Maní)

Ce travail est en cours d'analyse actuellement.

Les informations existantes sur cette zone étaient limitées aux données produites par les compagnies minières, essentiellement en tête de bassin versant : profils géophysiques, données stratigraphiques (log de forage) et piézométriques, analyses chimiques des eaux de forages. Aucun travail scientifique dans le but de comprendre les processus hydrogéologiques et l'impact des mines sur les ressources en eau de la quebrada n'avait encore été mené dans cette zone.

#### *Methodologie :*

La méthodologie appliquée dans le cadre de ce travail est la suivante :

- a) Étude géologique détaillée, en particulier de la zone de Tamentica (Exutoire)
- b) Inventaire et suivi des sources, forages, et rivière Huatacondo durant deux ans (débits, niveaux piézométriques, paramètres physico-chimiques).
- c) Deux campagnes d'analyse des éléments majeurs et traces (étiage 2017 et hiver 2018) de 10 points d'eau (sources et forages)
- d) Analyse des isotopes stables de l'eau (Deutérium et Oxygène 18) de 10 points d'eau (sources et forages)
- e) Analyse du Carbone 14 et 13 de cinq points d'eau.
- f) Essai par pompage dans un forage situé à l'exutoire du bassin versant.



- g) Essais d'infiltration dans le lit de la rivière Huatacondo dans la zone haute, moyenne et basse.
- h) Systématisation et analyse des données géophysiques, stratigraphiques et piézométriques produites par la compagnie minière.

#### *Résultats :*

Les résultats les plus importants sont consignés ci-dessous :

a) Les profils géophysiques TEM et NanoTEM ont permis d'identifier l'impact de la mine à ciel ouvert dans les vallées situées immédiatement à l'ouest en aval de la mine et des terrils. Ces vallées ne sont le siège d'aucun écoulement souterrain, comme cela est observable dans les vallées situées au nord de la mine, où le niveau piézométrique a pu être localisé à une vingtaine de mètres de profondeur.

b) A Copaquire (3500 m asl), une importante zone humide capte et stocke l'eau souterraine et superficielle s'écoulant depuis les parties hautes du bassin versant. Cette eau est ensuite déchargée en aval, et constitue l'écoulement permanent de la quebrada. L'eau de la zone humide a été datée à 2000 ans BP.

c) En aval de Copaquire, l'eau s'écoule de façon intermittente dans la quebrada. L'écoulement est superficiel sur les formations imperméables du mésozoïque (roche volcanique) et s'infiltré en profondeur au droit des formations sédimentaires mésozoïques. Les écoulements s'infiltrent définitivement quand le lit de la rivière recoupe les formations sédimentaires du cénozoïque (conglomérats de la formation Sagasca, Imagua et Diablo).

d) A l'exutoire du bassin versant (Tamentica), trois sources jaillissent, du fait d'une intrusion plutonique qui joue le rôle de barrage hydraulique vis-à-vis des circulations souterraines au sein des conglomérats de la formation El Diablo. Ces sources donnent naissance à une zone humide dont les eaux s'infiltrent ensuite dans le cône alluvial de la quebrada et la formation Diablo qui alimente l'aquifère Pampa del Tamarugal (connu sous le nom Salar de Llamara dans sa partie extrême sud).

e) Les analyses des éléments majeurs, traces ainsi que les analyses isotopiques montrent que les sources de Tamentica ont des origines différentes.

f) L'étude géologique de la partie aval de la quebrada montre la présence de paléochenaux de direction nord-sud dans la formation El Diablo avec des traces d'écoulements. L'étude montre aussi la présence de failles qui ont affecté seulement la base de la formation : dépôts syntectoniques. Deux sources émergent au contact entre l'intrusif et la formation El Diablo, l'une du côté nord au l'autre du côté sud.

#### *Discussion :*

a) L'extraction des eaux souterraines par une batterie de forages en amont de la mine pour rabattre les niveaux piézométriques et éviter que l'eau ne perturbe l'extraction du minerai, génère une vaste dépression piézométrique (à ce jour de 500 mètres de profondeur). Les flux existants dans les formations mésozoïques alimentant les écoulements permanents des vallées et les zones humides par des sources, sont donc interceptés par les pompages au niveau de la mine.

b) L'interception des écoulements souterrains par les pompages est visible dans la zone haute (au-dessus de 4000 m asl) mais il semble qu'il ne soit pas encore mesurable dans la zone de Copaquire (3500 m asl), en raison des vitesses de circulations des eaux souterraines qui serait de l'ordre d'une dizaine de mètre par an dans les formations alluviales.

c) A Tamentica (exutoire), l'une des sources est alimentée par les flux provenant des circulations sub-superficielles dans les formations alluviales de la quebrada, lorsque la rivière Huatacondo s'infiltré au niveau du contact entre formations mésozoïques et cénozoïques (environ 6 km en amont de Tamentica). Les deux autres sources proviennent de circulations au sein de la couverture cénozoïque.

### 2.3. Conclusion du chapitre 2

L'abaissement général des niveaux piézométriques de la Pampa del Tamarugal est limité dans son ampleur et ne concerne que certaines zones de l'aquifère.

L'existence d'une recharge « actuelle » de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal est confirmée, même si l'essentiel correspond à de l'eau rechargée dans les zones hautes de la Précordillère lors des phases humides du pléistocène et de l'holocène (Viguié, 2016).

La continuité des différents membres de la formation Altos de Pica entre le piedmont et la Dépression Centrale, identifiée pour la partie nord de l'aquifère PdT est aussi démontrée et confirmée pour la zone centrale et sud. Cette caractéristique assure la continuité des flux souterrains entre le Piedmont et l'aquifère PdT. Elle est perturbée par la présence de remontées du substratum, en partie imperméable, qui joue le rôle de barrage hydraulique, contrôlant ainsi les flux et donc la recharge, au sein de la formation Altos de Pica.

Le rôle majeur du substratum dans la recharge de la PdT est aussi confirmé. Cependant, son rôle ne se limite pas seulement au contrôle des flux souterrain dans les formations sus-jacentes; il est également le siège de circulations, qui constituent un apport d'eau non négligeable à l'aquifère de Pica puisque ces apports modifient la qualité de l'eau de cet aquifère.

Ces résultats mettent donc en question le modèle de recharge impliquant seulement des circulations sub-superficielles au niveau des cônes alluviaux au gré des crues périodiques. Ils confirment le modèle proposé par Viguié (2016) qui doit être complété par les apports du substratum, avérés par la modification notable du faciès chimique des eaux souterraines.



*Oasis de Pica, Région de Tarapacá*

### 3. Les usages et la gestion des eaux souterraines de la Pampa del Tamarugal

*“To those who say that these are social and not hydrological questions, it must be pointed out that the method of data collection and analysis has a powerful effect on how allocation, negotiation and transformation of water management can take place” Vincent (2003).*

Dans ce chapitre, je présente l’analyse de la gestion des eaux souterraines de l’aquifère Pampa del Tamarugal, en accordant une attention particulière aux liens entre (a) la manière dont les informations techniques et scientifiques sur la ressource en eau souterraine et sur son usage sont utilisées pour la gestion et (b) les stratégies et les discours des acteurs sur la gestion des eaux souterraines. L’analyse se concentre sur deux moments: la décision de ne plus octroyer de nouveaux droits d’eau et l’expérience brève d’un centre de recherche régional sur les ressources en eau. Les acteurs n’ont jamais réellement discuté sur la gestion de l’aquifère et certains ont utilisé les ressources en eau souterraine comme moyen de poursuivre des stratégies qui n’étaient pas liées à la gestion de l’eau en soi. La plupart des acteurs réclament un processus participatif d’allocation de l’eau pour les différents usages, même si cela impliquerait des modifications de la législation chilienne. Ce sous-chapitre reprend l’article en premier auteur publié en octobre 2018 dans le journal « Water Alternative »(Lictevout and Faysse, 2018).

#### 3.1. Le rôle des études scientifiques, contraintes socioéconomiques et enjeux politiques dans l’accès à l’eau (Lictevout and Faysse, 2018)

Few studies have been conducted on the implementation of groundwater management in Chile. In her study of La Ligua Valley, Budds (2009) pointed out that extremely tenuous hydrogeological calculations had been used to justify the declaration of a restriction on the aquifer. She demonstrated that while the official sustainable flow estimates meant no new water rights could be issued, they did not lead to challenge existing water rights and also enabled to validate requests for new water rights that had already been made.

Rinaudo et Donoso (2018) analysed the depletion of the aquifer in Copiapó Valley. Numerous studies had been conducted with contradictory conclusions as to the cause of this depletion, meaning the actors involved were able to push forward the study that best supported their particular strategies. The state was also concerned as it supported large-scale mining projects, which were expected to boost economic growth. Rinaudo et Donoso (2018) proposed several solutions to improve groundwater management, such as allocating water rights in terms of volume rather than flow and adopting a crisis management mechanism. This could involve a series of steps to be taken when the groundwater level reaches a given threshold, for example a temporary reduction in water use.

Usón et al. (2017) studied a case in central Chile, which involved conflicts between industries and community organisations over the assessment of groundwater resources and uses. As a means to secure their investments, industries that already had water rights promoted the declaration of a restricted area to prevent new rights from being granted.



### *Method and data collection*

The analysis is structured around four issues: i) the DGA's decision to declare the PdT Aquifer a restricted area in 2010; ii) the work of the CIDERH, how it disseminated information and the crisis it faced; iii) how groundwater resources and their use are monitored and managed in practice; and iv) actors' discourses regarding the current status and sustainable use of the aquifer.

Firstly, the four issues were analysed on the basis of published information (technical reports from public organisations, data on water use, laws, decrees, diverse policy documents and newspapers). Secondly, 27 key actors were selected and contacted for interview based on their knowledge of or involvement in managing the PdT Aquifer: farmers, Native American communities, mining companies, the regional water supply company, public institutions and a regional university. Of the 14 who accepted and were interviewed in July 2017 there was one from a mining company, eight from communities located in the PdT area, one from a local municipality, one from an industrial union, one from the Office of Forestry, one from a public-private body responsible for promoting sustainable economic practices and one from the regional university. The water supply company, the DGA regional office and two mining companies that extract water from the aquifer did not respond to our request.

In order to avoid possible bias due to the first author's former position as director of the CIDERH from 2011 to 2015, interviews were conducted and recorded by a third party. Finally, the analysis presented here draws on the first author's experience.

### *Results*

#### The declaration of a restricted area

In 2004 a farmer holding a groundwater right in the Pampa del Tamarugal asked the DGA to declare the PdT Aquifer a restricted area. The request was based on the following arguments: groundwater levels were decreasing at a rate of 12-20 cm/year in the wells monitored by the DGA; the granting of further groundwater rights would increase the imbalance between the recharge and use, thus represented a threat to existing water rights and protected areas. Four groundwater users objected to the request: one farmer and three mining companies in the PdT – Cosayach, ACF and SQM. No follow up was given to the request. In 2006 SQM withdrew its opposition.

In 2009 the DGA issued a report (DGA, 2009), which confirmed the arguments expressed in the 2004 request and rejected all those upheld by its opponents. The analysis was based on a previous report (DGA, 1996), which used data from JICA (1995). In its 1996 report the DGA considered that it was acceptable to extract 5% of the stored volume (26,908 Mm<sup>3</sup>) over a period of 20 years, based on the Water Code provision that uncertainties should be taken into account in aquifers with limited recharge. This corresponded to a sustainable flow of 2060 l/s (the correct figure is actually 2133 l/s and was changed in a later report). The water rights calculated in 1996 amounted to 912 l/s, which meant that an additional 1152 l/s could be allocated. In the 2009 DGA report the sustainable extraction flow of 2060 l/s (taken from the 1996 report) was compared to the demand for groundwater in June 2009 (including new requests for water rights), estimated at 2145 l/s. This figure is significantly lower than the 2009 total pumping rights because the calculation included the use coefficient (Table 1 shows 2017 data of pumping

rights, which are very close to 2009 data). The DGA's 2009 report demonstrated that the existing extraction rates would cause a continuous decline in groundwater levels and that the PdT Aquifer was at serious risk of depletion, which in turn would have a negative impact on existing groundwater use. The report also described the evolution of groundwater levels in the 11 wells monitored by the DGA in the PdT Aquifer. The graphs showed decreasing levels in seven wells, four of which showed a constant decrease since 1997 of between 0.05 cm/year and 0.15 cm/year. This led the DGA to declare the PdT Aquifer a restricted area at the beginning of 2010.

The report has three major shortcomings, however. Firstly, the studies used to support the analyses, which were conducted by consultants hired by the DGA, provided little data and were undertaken rapidly. Secondly, the 1996 and 2009 DGA reports calculated a pumping rate equivalent to 5% of the stored volume over a 20-year period rather than a 50-year period as officially required. If a 50-year period had been taken into account, the maximum acceptable pumping flow would have been 853 l/s. In other words, no additional water rights should have been granted in 1996 and many of the existing rights may have been reduced in 2009, if an existing water user had called for the reduction of extraction rates as scheduled in the 1981 Water Code. Using a 20-year period meant that existing rights would not be challenged, although no additional water rights would be granted. Thirdly, the DGA did not consider recharge. They argued that there was a balance between the recharge and the rate of evapotranspiration in order to justify the calculation having only taken stored volume into account (Discharge flows to other aquifers were ignored). In addition, the natural discharge rate decreases as groundwater levels drop. If the PdT Aquifer is overused, as the decreasing groundwater levels suggest, then the natural discharge will also decrease. Thus, at least some of the recharge should be included in the calculation. Finally, a decrease of 0.05 to 0.15 cm/year of the groundwater level in a few wells may be considered limited for an aquifer whose total saturated thickness is estimated at between 100 and 300 m. Therefore, it seems the report was heavily biased in order to 'force' a calculation that would lead to the establishment of a restricted area while maintaining existing water use and granting new entitlements to those who had already submitted their requests.

In 2011 the DGA published a new estimate of groundwater demand and sustainable flow in the PdT Aquifer following a decision to abandon the use of coefficients (DGA, 2011a). This time the calculations included 100% of the granted flow, which amounted to 130.6 Mm<sup>3</sup> per year (i.e. 4141 l/s), and the following parameters were modified: the aquifer's groundwater volume was increased (by 645 Mm<sup>3</sup>); its boundary was extended; and the 5% of stored volume was estimated over 50 years as opposed to 20 years. The calculation led to a revised sustainable flow of 27.5 Mm<sup>3</sup> per year (i.e. 872 l/s). The report concluded that existing demand far exceeded the sustainable flow. Therefore, while the aquifer was not declared a prohibited area, the report stated that no provisional groundwater rights would be allocated in the future. However, it stopped short of calling for a reduction in existing water rights.

#### The CIDERH's work, influence and crisis

The CIDERH was originally funded jointly by the National Science and Technology Research Commission and the regional government for a preliminary 5-year phase (January 2010-

December 2014). Its primary objectives were: i) to study the surface and groundwater resources in arid zones for the development of an integrated approach to water resource management; and ii) to develop technological innovations in water processes in order to increase water supply from natural sources and promote water reuse. The CIDERH faced several challenges from the start, particularly when it came to attracting highly qualified professionals to a remote area. Nonetheless, it received a positive international evaluation at the end of its first five years and was granted funding for a further five years from the National Science and Technology Research Commission.

The research conducted by the CIDERH improved the understanding of the PdT aquifer's structure, its recharge processes and its evolution over several decades (Lictévout et al., 2014; Moya et al., 2015; Viguier, 2016; Scheihing, Moya, and Tröger, 2017; Scheihing, Moya, Struck, et al., 2017). The CIDERH redefined the aquifer limits on its eastern margin far beyond the previously estimated limits (Viguier et al., 2018), involving a much larger volume of groundwater – at least two or three times that reported by the DGA in 2009. Piezometric measurements taken in 2012, 2013 and 2014 showed that groundwater levels had decreased by an average of 5.6 cm/year since the 1980s, reaching 12-17 cm/year in some places. Thus, water levels dropped by 1-2 metres over two decades (1993-2014), reaching a maximum of 3-5 m in some areas (Lictévout et al., 2014). In other areas the level remained stable, while in several boreholes groundwater levels actually rose over the same period.

The CIDERH established close relationships with the main water actors in the region: mining companies, regional authorities, the Regional University of Arturo Prat, the water supply company, the DGA, farmers and Native American (*indígenas*) communities. Most mining companies readily granted the CIDERH access to their wells. The CIDERH also worked closely with the DGA on research activities.

The findings of CIDERH studies were presented at seminars where, in general, communities were well represented, as were private companies and public institutions. Farmers, Native American communities and other rural inhabitants expressed a strong interest in obtaining information on the aquifer. The water supply company, which owns the largest volume of water rights in the PdT Aquifer, was interested in getting information about the aquifer's current and future evolution, in case it was necessary to consider a shift to desalinated water. However, the company did not consider the situation to be urgent, since its water requirements did not exceed its rights and the levels in the company's wells and their capacity were stable.

The CIDERH also reported all of its results to the regional and national offices of the DGA, although these never officially endorsed the findings. In fact, the DGA and mining companies showed little interest in the CIDERH's research. They were satisfied with the information they had obtained by hiring consultants from Chile and abroad. Nonetheless, mining companies generally sent representatives to listen to the discussions held during the meetings organised by the CIDERH.

The research centre's relationship with the regional authorities was ambivalent and evolved over time. The authorities requested information on the PdT Aquifer based on claims of water scarcity, yet showed surprisingly little interest in the scientific information generated by the centre. Indeed, they rarely attended workshops and seldom engaged in discussion with the

CIDERH. Although the CIDERH received support from the regional government until 2014, this gradually declined and eventually disappeared in 2015. No official reason was given.

The actors interviewed recognised the importance of a research centre specialising in water resources. With the exception of one community representative, they were all aware of the CIDERH and considered that it had produced important information about the PdT Aquifer. Eight interviewees said that more information was required to inform decision making. By contrast, three community representatives claimed that further studies would be useless without greater control of groundwater pumping. Four of the interviewees pointed out that the scientific format in which the information was presented made it inaccessible to public institutions and communities. Overall, the actors felt that although significant information had been generated, research results lacked concrete conclusions that could help the authorities and communities manage water resources more effectively.

Two of the community leaders interviewed stated that the CIDERH initially paid insufficient attention to capacity building, which community representatives needed in order to understand and use the information that the centre provided. The leaders also acknowledged that the CIDERH gradually began to take this into account between 2011 and 2015, as a consequence of which collaborative research with farmers and Native American communities was able to develop. For the first time communities were invited to participate in a study on drinking water quality, and, as the results were shared, the local communities gained greater confidence in their relationship with scientific organisations.

The actors interviewed (from public institutions, as well as communities) acknowledged that they used the information produced by the CIDERH to support their arguments for or against a project. For example, in 2012 a national infrastructure programme included a plan to construct three dams in the Tarapacá Region. Two were scheduled to be built in the recharge area of the PdT Aquifer, in the Aroma and Tarapacá Gorges (*quebradas*). The National Irrigation Commission and the regional government called on the CIDERH to present recommendations to aid the regional government's decision whether to allocate the funds for the pre-feasibility study. The CIDERH's brief report provided a summary of the sparse data and information available on the gorges' hydrological characteristics and processes. It highlighted a lack of data, stating that additional information was required to fully understand the hydrological processes, the high spatial and temporal (inter-annual) heterogeneity of the hydro-meteorological variables and the high sediment load, produced by sporadic and intense flash floods. The communities located in these gorges opposed the project, as they feared the dam would benefit mining and hydroelectric activities and not farming. They used the CIDERH report to back up their arguments.

In 2014 some of the regional authorities and communities in the Tarapacá Gorge used a CIDERH study showing that the Tarapacá Gorge played a key role in the recharge processes of the PdT Aquifer, in order to oppose the project involving the installation of a mining company in the catchment head of the gorge.

'Fuzzy' aquifer management



The DGA's official role is to monitor water use and water rights (used and unused). Every year users must declare the volume of water rights left unused, for which a fee is paid to the DGA. Table 9 shows that the total water rights declared as unused decreased between 2010 and 2016. Although this volume is officially not pumped, the DGA consider it to be pumped in the groundwater balance. Table 9 also shows that in the same period SQM company chose to declare its unused water rights rather than sell them. This was probably in order to maintain a 'water right reserve' for future use. In addition, a total of 2080 l/s was allocated for drinking water (Table 9), but the used extraction flow for the purpose was 973 l/s in 2011 (Superintendencia de Servicios Sanitarios, 2013). In the same year the company declared only 145 l/s of unused rights (Table 9). However, no official information is available on the remaining flow allocated, i.e. whether it was extracted and, if so, for what purpose.

Table 9 : Unused water rights subject to tax in the PdT Aquifer (l/s) (adapted from DGA, 2018).

User	2010	2011	2012	2013	2014	2015
ACF Mining Company		5	5	5		
Water supply company	505	145				
Chilean army	80					
Oceano Hotel and Tourism	73	73	73	73	73	73
Lo Aguirre (estate agents)	52	112	112	112	112	112
National real estate and building company				10	10	10
HMC (mining company)	43					
Planta Tarapacá (mining company)	10	10	10	10		
SQM (mining company)	464	464	398	398	269	229
Total	1228	810	599	609	465	425

In the Tarapacá Region users with groundwater rights exceeding 20 l/s are required to install measuring equipment and report the volume pumped, average flow and groundwater level to the DGA (DGA, 2011b). Between 2014 and 2017 the DGA conducted 58 checks to determine the amount of water actually pumped from the PdT Aquifer. The majority of these were carried out following denunciations, although only one led to a penalty for illegal extraction (DGA, 2018a). In practice, small-scale users are not subject to control. The flow officially granted to agriculture in 2009 (1021 l/s) may be used to irrigate approximately 1000 ha. However, the total area of cultivated land in the Tarapacá Region (which is around eight times larger than the area of the PdT Aquifer) is 1047 ha (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2017), meaning the area of irrigated land in the aquifer is probably much smaller than 1000 ha. Thus, it is likely that the water rights granted far exceeded the amount actually pumped for irrigation in the aquifer area. There is no official information on transactions involving water rights. However, some of those obtained for agricultural use between 2005 and 2009 may have been transferred to other uses, such as mining, or left unused (for example, waiting to sell for a profit).

Large-scale users, such as mining companies, need to be more cautious, since it is possible, if unlikely, that their actual pumping rates are monitored. In 2008 SQM brought a lawsuit against its main rival, Cosayach, accusing the company of using illegal wells in the PdT Aquifer. In 2011 a court ordered the closure of the illegal wells used by Cosayach. Subsequently, the mine was forbidden from using any more than the volume specified in its water rights (28 l/s were legally granted before the closure of the aquifer). Due to the risk of large-scale users being controlled, these large-scale users would generally make sure they had water rights corresponding to their actual water use. If needed they would buy water from other users, and a water right of one litre per second was sold in 2017 for around US\$80,000. The farmers interviewed also mentioned that people continue to extract water even after selling their rights to a mining company. They also suggested that the same situation could arise when a well has been built: the owner can extract groundwater illegally, even if the DGA refuses to allocate a water right. Therefore, the DGA had limited information on water resources, as well as on water use, official rights and actual pumping rates.

In 2015 the DGA attempted to establish a groundwater user association for the PdT Aquifer (as required, once it had been declared a restricted area). However, they met with strong opposition from farmers. The main complaint was that no farmers were on the board of directors. There was also a concern that the association would be controlled by SQM mining company and the water supply company as both of them own the majority of the water rights in the aquifer (according to the Water Rights Registry).

#### Actors' claims, discourses and opportunities for action

The interviewees all agreed that the state of the PdT Aquifer as reported by the CIDERH was unacceptable. For example, the community leaders pointed to the negative impact of overuse, including the drying up of some salt flats (*salars*) and the deaths of trees. They also agreed that placing a restriction on the PdT Aquifer was the correct decision. However, in 2017 a group of PdT farmers and Native American representatives filed a lawsuit against the DGA in an attempt to reverse the restriction. They claimed that the decision denied their ancestral access to groundwater, but the claim was ultimately rejected (Court of appeal of Iquique, 2017).

None of the actors interviewed were aware of the decision-making process that led to the declaration of a restricted area or of the data used to justify it. The farmers complained that, during the process, the remaining water rights had been divided between the mining companies, the water supply company and some well-connected farmers, who, they claimed, obtained theirs for speculation rather than agricultural use. One farmer stated that the DGA generally "handed over the water to the [mining] companies. They never managed water; they just restricted its use". In addition, many of the actors interviewed expressed the opinion that the restriction failed to improve the situation, for two reasons: i) public organisations lacked the capacity to control extractions, and ii) the water rights already allocated exceeded the aquifer's capacity, which meant that continued over-extraction was inevitable.

The community leaders interviewed suggested that the problem went further and originated with governmental bias towards private companies. One stated, "water and land used to be together; now they have been divided in order to give water to large companies". In their view, people at the grass roots lose out in the process: "the mining sector only harms; the people are condemned to die". The community leaders also claimed that insufficient water rights limited agricultural activities and the possibility of obtaining public subsidies. However, these claims are problematic for two reasons. Firstly, as mentioned above, the water rights registered for agricultural purposes in the national Water Rights Registry are greater than actual irrigation requirements in the PdT area. Therefore, if the water rights owned by actors in the agricultural sector fall short of their requirements, it is because the water rights have been sold to other users. Secondly, the DGA does not control small-scale farmers.

All the actors interviewed said that they had never discussed the question of how much water should actually be pumped from the aquifer. A local researcher commented, "as there is no general development policy for the PdT Aquifer, we do not know what we want to do with this aquifer". Community representatives and the representative from the Forestry Department stated that, firstly, far greater capacity was required to monitor actual use. Secondly, they proposed a participatory process to give all the actors a 'fair vote', i.e. the users' share of water rights would not determine the number of votes. One actor stated: "this is our right to decide

about our development priorities". In their view, a participatory process would lead to a shift in the allocation of water rights and prioritise certain uses (e.g. drinking water and agriculture). The actors interviewed also insisted that information on the aquifer should be provided by an independent organisation, i.e. not the private consultants hired by the mining companies when they need an environmental impact assessment.

### *Discussion*

#### Information used to establish rather than challenge the status quo

Just like in the case of the Copiapó Valley analysed by Rinaudo et Donoso (2018), the poor groundwater management in the PdT aquifer stems from serious loopholes in the national organisation of groundwater management. The high level of uncertainty in all terms of groundwater balance (in particular, outflows and actual water pumping) and the lack of an updated registry of water rights seriously compromise the implementation of a management system based on water rights. This also opens the way to opportunistic use of data. This high level of uncertainty arises both from the legal setting and from insufficient financial and human resources dedicated to water resource management.

However, the issue of poor water management was never discussed further. The key decision taken on aquifer management was to restrict use in 2010, which has led to the status quo. The calculations presented in support of the decision meant that existing water use, and any pending request, were unaffected. Within the framework of the present study it was not possible to prove intentionality regarding the calculations. However, a strong 'coincidence' between the figures presented and the maintenance of a status quo in terms of water rights was also observed in the La Ligua Aquifer (Budds, 2009). Community representatives complained that they had not been part of the decision to establish a status quo.

Some actors used the information produced by the CIDERH at local level to strengthen their arguments on specific issues. However, neither public nor private actors discussed the current or desired status of the PdT Aquifer, despite being informed of the CIDERH's research results. One possible explanation for the withdrawal of regional governmental support for the centre is that its studies often challenged their projects and weakened the DGA's monopoly on technical assessments, which were used to inform (and justify) decision making. In particular, the CIDERH's analyses challenged the calculations made by the DGA in 2010 and 2011. For example, the results of the CIDERH analysis of the volume of water stored in the PdT Aquifer differed from the DGA's figures. Yet the dissemination of its research findings failed to break the status quo, which emerged as a result of the governance framework and actor strategies.

#### Ulterior motives for actions and discourses relating to groundwater management

Actors had very different views on water resources and their use but lacked a forum for discussion. This is a recurrent problem in Chile for issues relating to groundwater (Usón et al., 2017) and surface water (Palomino-Schalscha et al., 2016).

With regard to the PdT Aquifer, some actors avoided discussion for strategic reasons. Several were driven by an ulterior motive and not by groundwater management itself. Usón et al. (2017) describe a case where key economic actors were in favour of restricting groundwater use. Although the groundwater level drawdown of the PdT Aquifer was limited, the main mining



company in the PdT area supported a restriction. The likelihood is that they wanted to prevent their competitors from operating in the area. In addition, local community leaders raised the issue of groundwater overuse in order to: express their opposition to the general development model designed to promote mining, complain about the failure to share the benefits derived from mining activities and improve their visibility with regard to the local authorities. The actors did not appear to want a genuine discussion on the actual and desired status of the aquifer. Together, these strategies served to reinforce the status quo.

### *Conclusion*

As this article shows, the Pampa del Tamarugal Aquifer appears to be the locus of several paradoxes, including: a legal setting that provides detailed indications of how to manage groundwater, yet little genuine power in the field; a major economic actor that favours a restriction of groundwater use, despite the fact that there are signs of limited drawdown of groundwater level in several parts of the aquifer; the local government actively supporting a groundwater research centre and then disregarding its findings. The analysis presented here helps to understand some of these paradoxes; although, because in particular of a status quo situation (no water rights granted and no discussion taking place with regard to the management of the aquifer since the latter was declared a restricted area), some actors managed to have covered strategies that they did not have to justify.

### 3.2. Conclusion du chapitre 3

- . L'information scientifique sur les ressources en eau est un enjeu majeur de la gestion de l'eau, d'autant plus en ce qui concerne les eaux souterraines, qui sont « invisibles ».
- . Dans le cas du Chili, et de nombreux autres pays, l'information scientifique est utilisée ou pas, selon qu'elle appuie les intérêts des acteurs. La production d'information scientifique sur l'aquifère PdT constituait une menace au statu quo imposé par les autorités et certains usagers (déclaration de restriction de l'aquifère).
- . Le statu quo imposé sur l'aquifère PdT est un frein à l'accès à l'eau sans pour autant résoudre les problèmes de gestion et de surexploitation de l'aquifère.
- . L'information scientifique est difficilement utilisable par les acteurs i) si les spécificités culturelles ne sont pas intégrées, notamment dans le cas des communautés indigènes et ii) si le contexte politique et socioéconomique n'est pas pris en compte.
- . La compréhension et valorisation des systèmes de gestion passés est une opportunité pour améliorer la gestion actuelle et élaborer des solutions aux problèmes actuels.

## Conclusion

Le nord du Chili est considéré comme l'une des zones les plus arides de la planète. L'étude des ressources en eau souterraine du bassin de la Pampa del Tamarugal d'un point de vue de la ressource et de la gestion a permis de mieux comprendre le problème d'accès à l'eau par les populations vulnérables, en particulier le rôle de l'information scientifique dans cet accès.

Les incertitudes et erreurs sur les différents termes du bilan des eaux souterraines de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal et l'insuffisante compréhension des processus de recharge et décharge de l'aquifère ont appuyé et permis une situation de statu quo. Cette situation, matérialisée par la fermeture de l'aquifère à de nouveaux droits d'eau (déclaration de restriction) est considéré comme le principal outil de gestion d'un aquifère en situation de surexploitation. Cependant elle exclue de facto les petits usagers (agriculteurs, communautés indigènes) tant de la prise de décision sur la gestion de l'aquifère que de l'accès à l'eau par l'acquisition de nouveaux droits à l'eau. Tous les usagers, cependant, semblent utiliser le statu quo pour poursuivre leur propre stratégie qu'ils n'ont pas à justifier, entre autres les intérêts économiques des grands usagers.

L'étude de l'évolution des niveaux piézométriques de l'aquifère de la Pampa del Tamarugal permet d'affirmer que la surexploitation de l'aquifère est très modérée. La baisse des niveaux piézométriques est limitée à certaines zones de l'aquifère, les autres étant stable ou même en hausse. L'étude de la Précordillère, du piedmont et de sa connexion avec la Pampa del Tamarugal a permis de proposer un nouveau modèle de recharge. Ce modèle met en jeu des apports en eau souterraine depuis les zones de précipitation dans la Précordillère i) au niveau des formations alluviales et cônes alluviaux des quebradas, ii) au sein des formations cénozoïques grâce à la continuité des couches entre le piedmont et la Dépression Centrale, qui impliquent que les limites et donc le volume de l'aquifère est beaucoup plus important qu'initialement évalué ; iii) au travers de fractures dans le substratum mésozoïque. Ce dernier joue un rôle important dans la recharge de l'aquifère Pampa del Tamarugal en contrôlant les flux, d'une part, au travers du piedmont et, d'autre part, en rechargeant l'aquifère. Les zones de recharge peuvent être mises en évidence grâce au faciès hydrochimique et valeurs des isotopes de stable de l'eau. L'existence d'une recharge actuelle est confirmée. Cependant, cette recharge mobilise des eaux anciennes qui proviennent des phases humides du Pléistocène et de l'Holocène. Ces informations suggèrent que, à long terme, la protection de l'aquifère PdT passe avant tout par la protection de la ressource en eau souterraine dans la Précordillère et le Piedmont. Cependant, c'est dans cette zone que sont installées les grandes mines de cuivre à ciel ouvert.

La production d'information scientifique s'est révélé un enjeu majeur, qui n'a cependant pas pu rompre le statu quo établi sur l'utilisation des ressources en eau souterraines de la Pampa del Tamarugal et promouvoir une gestion informée de cette ressource. La production d'information scientifique peut devenir un outil de développement quand elle est construite de manière conjointe avec les usagers, sur la base d'un suivi participatif, en prenant en compte les connaissances locales.

L'accès à l'eau des populations vulnérables dans le nord du Chili n'est donc pas un problème de ressources en eau. Il dépend surtout des stratégies politiques et économiques des différents acteurs. L'absence d'information scientifique fiable et validée sur la ressource en eau souterraine permet aux différents acteurs de couvrir leur stratégie propre. La production et l'accès à l'information sur les ressources en eau ne doit pas être basé sur une circulation unilatérale de l'information entre scientifiques, usagers et gestionnaires, sinon sur une construction commune et participative de l'information afin d'intégrer les connaissances locales et les contraintes socio-économiques. La rupture du statu quo dépend donc en partie d'une discussion participative, basée sur des données fiables sur les ressources en eaux souterraines et leur utilisation qui permettrait de pouvoir répondre à la question suivante : la quantité d'eau pompée doit-elle être réduite pour garantir des niveaux piézométriques stables ou, au contraire, augmentée pour promouvoir le développement économique ?

Afin de pouvoir proposer des scénarios de développement basé sur l'usage de l'aquifère Pampa del Tamarugal, il est maintenant nécessaire de quantifier les apports et les extractions. Il reste encore des lacunes d'information, notamment les limites nord et sud de l'aquifère ainsi que sa base. Cependant, la quantification des extractions constitue sans doute le problème majeur, ainsi que la mise en place d'un processus participatif de gestion de l'aquifère qui nécessite un changement radical dans la législation chilienne. Il permettrait cependant de rendre «visible» l'aquifère aux yeux des acteurs locaux et régionaux.

Les résultats obtenus dans le nord du Chili sont probablement extrapolables d'autres zones arides, et il serait maintenant très intéressant de les comparer aux résultats obtenus dans d'autres zones arides, afin de les valider à plus grande échelle.



## Références bibliographiques

- Adhikary, S.K.; Yilmaz, A.G. and Muttil, N. 2015. Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia. *Hydrological Processes* 29(11): 2582–2599, <https://doi.org/10.1002/hyp.10389>.
- Alfonso, L.; Lobbrecht, A. and Price, R. 2010. Optimization of water level monitoring network in polder systems using information theory: Water Level Monitoring Optimization. *Water Resources Research* 46(12): n/a-n/a, <https://doi.org/10.1029/2009WR008953>.
- Amaro, S.; Herrera, V. and Lictevout, E. 2014. Spatial distribution of arsenic in the region of Tarapacá, northern Chile. In 5th Congreso Internacional sobre el Arsénico en el Medio Ambiente, Buenos Aires, Argentina.
- AMPHOS 21. 2012. Estudio de los tiempos de residencia del agua subterránea en el entorno de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Santiago de Chile: Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC).
- Aravena, R. 1995. Isotope Hydrology and Geochemistry of Northern Chile Groundwaters. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines* 24(3): 495–503.
- Bakker, K.J. 2000. Privatizing water, producing scarcity: The Yorkshire drought of 1995. *Economic Geography* 76(1): 4–27.
- Barnes, J. 2009. Managing the Waters of Bath Country: The Politics of Water Scarcity in Syria. *Geopolitics* 14(3): 510–530, <https://doi.org/10.1080/14650040802694117>.
- Barnes, M. and Fleming, D. 1991. Filtration-Gallery Irrigation in the Spanish New World. *Latin American Antiquity* 2(01): 48–68, <https://doi.org/10.2307/971895>.
- Bauer, C.J. 2004. Results of Chilean water markets: Empirical research since 1990. *Water Resources Research* 40(9): W09S06, <https://doi.org/10.1029/2003WR002838>.
- Beaumont, P. 1971. Qanat systems in Iran. *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin* 16(1): 39–50, <https://doi.org/10.1080/02626667109493031>.
- Becker, C.D. and Ghimire, K. 2003. Synergy between traditional ecological knowledge and conservation science supports forest preservation in Ecuador. *Conservation Ecology* 8(1): 1.
- Betancourt, J.L. 2000. A 22,000-Year Record of Monsoonal Precipitation from Northern Chile's Atacama Desert. *Science* 289(5484): 1542–1546, <https://doi.org/10.1126/science.289.5484.1542>.
- Billinghurst, G.E. 1893. *La Irrigación en Tarapacá*. Santiago de Chile: Imprenta y Librería Ercilla.
- Blanco, N. and Ladino, M. 2012. Mapa Mamiña, Región de Tarapacá [Map of Mamiña, Tarapacá region].
- Blanco, N. and Tomlinson, A.J. 2013. Mapa Guatacondo, Región de Tarapacá [Map of Guatacondo, Tarapacá region].
- Bruggen, J. 1918. Informe sobre el agua subterránea de la Región de Pica. Corporación de Fomento de la Producción.
- Budds, J. 2009. Contested H2O: Science, policy and politics in water resources management in Chile. *Geoforum* 40(3): 418–430, <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2008.12.008>.
- Budds, J. 2013. Water, power, and the production of neoliberalism in Chile, 1973-2005. *Environment and Planning D: Society and Space* 31(2): 301–318, <https://doi.org/10.1068/d9511>.
- Burek, P.; Satoh, Y.; Fisher, G.; Taher Kahil, M.; Scherzer, A.; Tramberend, S.; Nava, L.F.; Wada, Y.; Eisner, S.; Flörke, M.; Hanasaki, N.; Magnuszewski, P.; Cosgrove, B. and Wiberg, D. 2016. Water futures and solution. Fast track initiative. Final report. Working paper WP-16-006. Laxenburg, Austria: IIASA.

- Bustamante, I.D.; Sanz, J.M.; Iglesias, J.A. and López-Camacho, B. n.d. Some Examples of Spanish Qanats 13.
- Castillo, O. 1960. El agua subterránea en el norte de la Pampa del Tamarugal. Boletín n°5. Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Cetinkaya, C.P. and Harmancioglu, N.B. 2014. Reduction of streamflow monitoring networks by a reference point approach. *Journal of Hydrology* 512: 263–273, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.006>.
- Chacon-Hurtado, J.C.; Alfonso, L. and Solomatine, D. 2016. Rainfall and streamflow sensor network design: a review of applications, classification, and a proposed framework. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 21: 3071–3091, <https://doi.org/10.5194/hess-2016-368>.
- Chaffaut, I.; Coudrain Ribstein, A.; Michelot, J.-L. and Pouyaud, B. 1998. Précipitations d'altitude du Nord-Chili, origine des sources de vapeur et données isotopiques. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines* 27(3): 367–384.
- Clark, I. and Brake, L. 2009. Using local knowledge to improve understanding of groundwater supplies in parts of arid South Australia. *GeoJournal* 74: 441–450, <https://doi.org/10.1007/s10708-008-9236-7>.
- Costumero, R.; Sánchez, J.; García-Pedrero, Á.; Rivera, D.; Lillo, M.; Gonzalo-Martín, C. and Menasalvas, E. 2017. Geography of legal water disputes in Chile. *Journal of Maps* 13(1): 7–13, <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1252803>.
- Craig, H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133: 1702–1703.
- Davis, R.; Zaidman, M.; Grew, R. and Garrett, K. 2010. Evaluating the benefits of the hydrometric network in England and Wales. In *Role of hydrology in managing consequences of a changing global environment, Proceeding of the BHS Third International Symposium*, pp. 787–793. British Hydrological Society Newcastle.
- DGA. 1996. Determinación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en el sector del acuífero de la Pampa del Tamarugal. Minuta técnica 68. S.D.T. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas (DGA).
- DGA. 2008. Manual de normas y procedimientos para la administración de recursos hídricos. S.I.T 156. S.I.T. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas (DGA).
- DGA. 2009. Declaración Área Restricción Sector Hidrogeológico Pampa del Tamarugal. Informe técnico 607. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas (DGA).
- DGA. 2011a. Actualización de la oferta y de la demanda de recursos hídricos subterráneos del sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pampa del Tamarugal. Informe técnico 311. S.D.T. Santiago de Chile.
- DGA. 2011b. Resolución n°395: Ordena a los titulares de derechos de aprovechamiento de agua subterránea que se indica instalar los dispositivos necesarios que permitan controlar las extracciones que realizan. Santiago de Chile: DGA, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- DGA. 2013. Reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas. Decreto. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas (DGA).
- DGA. 2016. Constituidas comunidades de aguas subterráneas de La Ligua y Petorca. [Http://www.dga.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=402](http://www.dga.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=402). 9 May 2016.
- DGA. 2017a. Estadística hidrológica de las estaciones DGA (DGA stations hydrologic data), <http://www.dga.cl/servicioshidrometeorologicos/Paginas/default.aspx> (accessed 20 October 2018)
- DGA. 2017b. Derechos de Aprovechamientos de Agua registrados en DGA (DGA Water rights registry),

- [http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos\\_historicos/Paginas/default.aspx](http://www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx)  
(accessed 20 October 2018)
- DGA. 2018. Código de Aguas. Decreto con Fuerza de Ley 1122.
- DICTUC. 2006. Evolución del nivel de la napa en la Pampa del Tamarugal. Estudio de Impacto Ambiental proyecto Soronal. Annex VIII.1 Hidrogeología, Pramar Ambiental. Santiago de Chile: SQM.
- DICTUC. 2008. Estudio de impacto ambiental proyecto Pampa Hermosa (Environmental Impact Study of the Pampa Hermosa Project). Santiago de Chile: SQM.
- Dingman, R.J. and Galli, C. 1965. Geology and Ground-Water Resources of the Pica Area, Tarapaca Province, Chile. Geological Survey Bulletin 1189. Washington DC: United State Department of the Interior.
- Dolatyar, M. and Gray, T.S. 2000. The politics of water scarcity in the Middle East. *Environmental Politics* 9(3): 65–88, <https://doi.org/10.1080/09644010008414538>.
- Donoso, G. and Vicuña, S. 2016. Aseguramiento responsable del agua para consumo humano. Espacio Público. Santiago de Chile: Centro Global UC.
- Earthscan and IWMI. 2007. Water for food. Water for life. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London and Colombo.
- English, P.W. 1968. The Origin and Spread of Qanats in the Old World. *Proceedings of the American Philosophical Society* 112(3), <http://www.jstor.org/stable/986162>.
- Failing, L.; Gregory, R. and Harstone, M. 2007. Integrating science and local knowledge in environmental risk management: A decision-focused approach. *Ecological Economics* 64(1): 47–60, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.03.010>.
- FAO. 2004. Fact sheet “What is local knowledge?” In Building on Gender, Agrobiodiversity and Local Knowledge: a training manual, Rome, Italy.
- FAO. 2011. *Highlands and Drylands. Mountains, a source of resilience in arid regions*. Rome, Italy: Nora Berrahmouni, FAO; Rosalaura Romeo, Douglas McGuire, Mountain Partnership, FAO Sergio Zelaya, UNCCD Secretariat Daniel Maselli, Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) Thomas Kohler, Centre for Development and Environment, University of Bern (CDE).
- Fariás, M.; Charrier, R.; Comte, D.; Martinod, J. and Hérail, G. 2005. Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: Evidence from the depositional, tectonic, and geomorphologic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19°30'S): WESTERN ALTIPLANO UPLIFT. *Tectonics* 24(4): n/a–n/a, <https://doi.org/10.1029/2004TC001667>.
- Faust, B. and Sardon, R.. 2001. Introduction and overview: environmental knowledge, rights, and ethics: co-managing with communities. *Environmental Science & Policy* 4(4): 147–151, [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(01\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(01)00025-9).
- Ferreccio, C.; Smith, A.H.; Duran, V.; Barlaro, T.; Benitez, H.; Valdes, R.; Aguirre, J.J.; Moore, L.E.; Acevedo, J.; Vasquez, M.I.; Perez, L.; Yuan, Y.; Liaw, J.; Cantor, K.P. and Steinmaus, C. 2013. Case-Control Study of Arsenic in Drinking Water and Kidney Cancer in Uniquely Exposed Northern Chile. *American Journal of Epidemiology* 178(5): 813–818, <https://doi.org/10.1093/aje/kwt059>.
- Fisher, J. 2013. Optimization of Water-Level Monitoring Networks in the Eastern Snake River Plain Aquifer Using a Kriging-Based Genetic Algorithm Method U.S. Scientific Investigations Report 5120 (DOE/ID-22224). U.S. Department of the Interior - U.S. Geological Survey, <http://pubs.usgs.gov/sir/2013/5120/>.
- Folke, C. 2004. Traditional knowledge in social–ecological systems. *Ecology and Society* 9(3): 7.

- Fritz, P.; Suzuki, O.; Silva, C. and Salati, E. 1981a. Isotope hydrology of groundwaters in the Pampa del Tamarugal, Chile. *Journal of Hydrology* 53(1–2): 161–184, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(81\)90043-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(81)90043-3).
- Gamboa, J.C.M.; Cornejo, L.; Acarapi, J. and Squella, J.A. 2013. Determination of arsenic (III) by differential pulse polarography in the waters of Camarones area, Chile. *Journal of the Chilean Chemical Society* 58(4): 2031–2034.
- Gayo, E.M.; Latorre, C.; Jordan, T.E.; Nester, P.L.; Estay, S.A.; Ojeda, K.F. and Santoro, C.M. 2012. Late Quaternary hydrological and ecological changes in the hyperarid core of the northern Atacama Desert (~21°S). *Earth-Science Reviews* 113(3–4): 120–140, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.04.003>.
- Gocht, M. 2007. Optimization of water systems Technische Universität Braunschweig, 2007.
- Grilli, A.; Aguirre, E.; Durán, M.; Townsend, F. and González, A. 1999. Origen de las aguas subterráneas del sector Pica-Salar del Huasco, Provincia de Iquique, I Región de Tarapacá [Origin of groundwaters in Pica-Salar del Huasco sector, Iquique Province, Tarapacá Región]. In XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Aidis-Chile.
- Hajkowicz, S. 2007. A comparison of multiple criteria analysis and unaided approaches to environmental decision making. *Environmental Science & Policy* 10(3): 177–184, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2006.09.003>.
- Hajkowicz, S. and Collins, K. 2007. A Review of Multiple Criteria Analysis for Water Resource Planning and Management. *Water Resources Management* 21(9): 1553–1566, <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9112-5>.
- Hajkowicz, S. and Higgins, A. 2008. A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *European Journal of Operational Research* 184(1): 255–265, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.045>.
- Halverson, M.J. and Fleming, S.W. 2015. Complex network theory, streamflow, and hydrometric monitoring system design. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(7): 3301–3318, <https://doi.org/10.5194/hess-19-3301-2015>.
- Hartley, A.J. and Evenstar, L. 2010. Cenozoic stratigraphic development in the north Chilean forearc: Implications for basin development and uplift history of the Central Andean margin. *From the trench to the arc: subduction along South America* 495(1): 67–77, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.05.013>.
- Huang, I.B.; Keisler, J. and Linkov, I. 2011. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of The Total Environment* 409(19): 3578–3594, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.022>.
- INE. 2017. Compendio Estadístico. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Estadísticas.
- Jayne, R.S.; Pollyea, R.M.; Dodd, J.P.; Olson, E.J. and Swanson, S.K. 2016. Spatial and temporal constraints on regional-scale groundwater flow in the Pampa del Tamarugal Basin, Atacama Desert, Chile. *Hydrogeology Journal* 24(8): 1921–1937, <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1454-3>.
- Johannes, R.. 1998. The case for data-less marine resource management: examples from tropical nearshore finfisheries. *Trends in Ecology & Evolution* 13(6): 243–246, [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(98\)01384-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(98)01384-6).
- Joly, F. 2006. Les eaux sauvages des régions arides. Notions de base sur l'hydrologie des déserts. The wild waters of arid lands: basic knowledge on the hydrology of deserts. *Géomorphologie: relief, processus, environnement* 12(4), <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.93>.
- Jordan, T.E.; Kirk-Lawlor, N.E.; Blanco, N.P.; Rech, J.A. and Cosentino, N.J. 2014. Landscape modification in response to repeated onset of hyperarid paleoclimate states since 14 Ma, Atacama Desert, Chile. *GSA Bulletin* 126(7–8): 1016–1046, <https://doi.org/10.1130/B30978.1>.



- Jordan, T.E.; Nester, P.L.; Blanco, N.; Hoke, G.D.; Dávila, F. and Tomlinson, A.J. 2010. Uplift of the Altiplano-Puna plateau: A view from the west: WEST FLANK CENTRAL ANDES. *Tectonics* 29(5): n/a-n/a, <https://doi.org/10.1029/2010TC002661>.
- Kaika, M. 2003. Constructing Scarcity and Sensationalising Water Politics: 170 Days That Shook Athens. *Antipode*.
- Karzulovic, J. and García, F. 1978. Evaluación de los Recursos Hídricos de la Provincia de Iquique. Dirección General de Aguas (DGA).
- Kotwicki, V. (Vincent), 1945-. 1986. *Floods of Lake Eyre / Vincent Kotwicki*. Accessed from <https://nla.gov.au/nla.cat-vn460253>. Adelaide: Engineering and Water Supply Dept.
- Labbé, N.; García, M.; Charrier, R.; Arraya, J. and Simicic, Y. 2015. Deformación sub-superficial en la cuenca de la Pampa del Tamarugal, Norte de Chile (22°30'S) [Subsurface deformation in the Pampa del Tamarugal catchment, North of Chile (22°30')]. In XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile.
- Lajaunie, M.-L.; Scheierling, S.; Zuleta, J.; Chinarro, L. and Vazquez, V. 2011. Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Washington DC: World Bank.
- Lamb, S.; Hoke, L.; Kennan, L. and Dewey, J. 1997. Cenozoic evolution of the Central Andes in Bolivia and northern Chile. *Geological Society, London, Special Publications* 121(1): 237–264, <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1997.121.01.10>.
- Li, C.; Singh, V.P. and Mishra, A.K. 2012. Entropy theory-based criterion for hydrometric network evaluation and design: Maximum information minimum redundancy. *Water Resources Research* 48(5): n/a-n/a, <https://doi.org/10.1029/2011WR011251>.
- Lictevoud, E.; Amaro, S.; Córdoba, D. and Rodriguez, J. 2014. Estudio histórico de la variación del nivel piezométrico del acuífero Pampa Del Tamarugal, Norte de Chile. In XII Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, Santiago de Chile, Chile.
- Lictevoud, E. and Faysse, N. 2018. A Doubly Invisible Aquifer: Hydrogeological Studies and Actors' Strategies in the Pampa del Tamarugal Aquifer, Northern Chile. *Water Alternatives* 11(3).
- Lictevoud, E. and Gocht, M. 2017. Hydrometric network design in hyper-arid areas: example of Atacama Desert (North Chile). *Hydrology Research* nh2017004, <https://doi.org/10.2166/nh.2017.004>.
- Lictevoud, E.; Maass, C.; Córdoba, D.; Herrera, V. and Payano, R. 2013. *Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá: Diagnostico y Sistematización de la información*. Iquique, Chile: UNAP.
- Lightfoot, D.R. 1996. Syrian qanat Romani: history, ecology, abandonment. *Journal of Arid Environments* 33(3): 321–336, <https://doi.org/10.1006/jare.1996.0068>.
- Maass, C. and Lobos, F. 2015. Caracterización climática de la Región de Tarapacá. Iquique, Chile.
- Magaritz, M.; Aravena, R.; Pena, H.; Suzuki, O. and Grilli, A. 1989. Water chemistry and isotope study of streams and springs in northern Chile. *Journal of Hydrology* 108: 323–341.
- Magaritz, M.; Aravena, R.; Pena, H.; Suzuki, O. and Grilli, A. 1990. Source of Groundwater in the Deserts of Northern Chile: Evidence of deep circulation of groundwater from the Andes. *Groundwater* 28(4).
- Maliva, R. and Missimer, T. 2012. Aridity and Drought. In *Arid Lands Water Evaluation and Management*, pp. 21–39. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3_2)
- Maniak, U. 2011. Wasserwirtschaft, Einführung in die Bewertung wasserwirtschaftlicher Vorhaben (Water management, introduction to the evaluation of project) Springer Heidelberg, 2011.

- Mehta, L. 2003. Contexts and Constructions of Water Scarcity. *Economic and Political Weekly* 38(48): 5066–5072.
- Mehta, L. 2007. Whose scarcity? Whose property? The case of water in western India. *Land Use Policy* 24(4): 654–663, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2006.05.009>.
- Michaud, J.D.; Auvine, B.A. and Penalba, O.C. 1995. Spatial Elevation Variations of Summer Rainfall in the Southwestern United States. *Journal of Applied Meteorology* 34(12): 2689–2703.
- Mishra, A.K. and Coulibaly, P. 2009. Developments in hydrometric network design: A review. *Reviews of Geophysics* 47(2), <https://doi.org/10.1029/2007RG000243>
- Molle, F. 2003. *Development Trajectories of River Basins: A Conceptual Framework*. Research report 72. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Montecinos, A. and Aceituno, P. 2003. Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *JOURNAL OF CLIMATE* 16: 17.
- Moreno, T. and Gibbons, W. (eds). 2007. *The Geology of Chile*. London: The Geological Society.
- Mostafaeipour, A. 2010. Historical background, productivity and technical issues of qanats. *Water History* 2(1): 61–80, <https://doi.org/10.1007/s12685-010-0018-z>.
- Motiee, H.; Mcbean, E.; Semsar, A.; Gharabaghi, B. and Ghomashchi, V. 2006. Assessment of the Contributions of Traditional Qanats in Sustainable Water Resources Management. *International Journal of Water Resources Development* 22(4): 575–588, <https://doi.org/10.1080/07900620600551304>.
- Moya, C.E.; Lictevout, E.; Amaro, S.; Viguier, B.; Lira, E.; Maringue, J.; Yañez, G. and García-Perez, T. 2015. Three-dimensional hydrogeological modelling of the Pampa del Tamarugal aquifer. Modelling with limited well-log data. In XIV Congreso Geológico Chileno, La Serena, Chile.
- Mustafa, D. and Qazi, M.U. 2007. Transition from Karez to Tubewell Irrigation: Development, Modernization, and Social Capital in Balochistan, Pakistan. *World Development* 35(10): 1796–1813, <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2007.06.002>.
- Naghibi, S.A.; Pourghasemi, H.R.; Pourtaghi, Z.S. and Rezaei, A. 2015. Groundwater qanat potential mapping using frequency ratio and Shannon's entropy models in the Moghan watershed, Iran. *Earth Science Informatics* 8(1): 171–186, <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0145-7>.
- Nilsson, B.; Højberg, A.L.; Refsgaard, J.C. and Trolborg, L. 2007. Uncertainty in geological and hydrogeological data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11.
- NOAA. 2017. Earth system research laboratory. Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/oni.data> (accessed 20 October 2018)
- Nunes, L.M.; Cunha, M.C. and Ribeiro, L. 2004. Groundwater monitoring network optimization with redundancy reduction. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(1): 33–43.
- Odom, K.R. 2003. Assessment and redesign of the synoptic water quality monitoring network in the Great Smoky Mountains National Park. PhD diss. University of Tennessee.
- Odom, K.R. 2005. Heuristic Approach to Monitoring Network Optimization using Simulated Annealing and Multivariate Statistics. In AII USGS Modelling Conference, Port Angeles, Washington.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. 2017. Región de Tarapacá: información regional 2017. Santiago, Chile: Ministerio de Agricultura.

- Oyarzún, J. and Oyarzún, R. 2011. Sustainable development threats, inter-sector conflicts and environmental policy requirements in the arid, mining rich, northern Chile territory. *Sustainable Development* 19(4): 263–274, <https://doi.org/10.1002/sd.441>.
- JICA. 1995. The study of the development of water resources in Northern Chile. Santiago de Chile: JICA (Japan Internacional Cooperation Agency) - DGA (Dirección General de Aguas).
- Palerm-Viqueira, J. 2004. Filtrating Galleries or Qanats in México: Introduction and Typology of techniques. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 1(2): 133–145.
- Palomino-Schalscha, M.; Leaman-Constanzo, C. and Bond, S. 2016. Contested water, contested development: unpacking the hydro-social cycle of the Ñuble River, Chile. *Third World Quarterly* 37(5): 883–901, <https://doi.org/10.1080/01436597.2015.1109436>.
- Raymond, C.M.; Fazey, I.; Reed, M.S.; Stringer, L.C.; Robinson, G.M. and Evely, A.C. 2010. Integrating local and scientific knowledge for environmental management. *Journal of Environmental Management* 91(8): 1766–1777, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.023>.
- Rech, J.A.; Quade, J. and Betancourt, J.L. 2002. Late Quaternary paleohydrology of the central Atacama Desert (lat 22–24HS), Chile. *Geological Society of America Bulletin* 15.
- Rinaudo, J.-D. and Donoso, G. 2018. State, market or community failure? Untangling the determinants of groundwater depletion in Copiapó (Chile). *International Journal of Water Resources Development* 1–21, <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1417116>.
- Risacher, F.; Alonso, H. and Salazar, C. 1998. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II, III regiones, Chile. SIT N 51. Santiago de Chile: Dirección General de Aguas (DGA).
- Rivera, D. 2015. Diagnóstico jurídico de las aguas subterráneas. *Revista Lus et Praxis* 21(2): 225–266.
- Rojas, R.; Batelaan, O.; Feyen, L. and Dassargues, A. 2010. Assessment of conceptual model uncertainty for the regional aquifer Pampa del Tamarugal-North Chile. *Hydrology and Earth System Sciences* 14(2): 171–192.
- Rojas, R. and Dassargues, A. 2007. Groundwater flow modelling of the regional aquifer of the Pampa del Tamarugal, northern Chile. *Hydrogeology Journal* 15(3): 537–551, <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0084-6>.
- Salazar, C.; Rojas, L. and Pollastri, A. 1998. Evaluación de recursos hídricos en el sector de Pica, hoy de la Pampa del Tamarugal, I Región. [Water Resources Assessment in the sector of Pica, Pampa del Tamarugal, Region I]. S.I.T 48. Santiago de Chile: DGA-CCHEN.
- Scheihing, K.; Moya, C.; Struck, U.; Lictevout, E. and Tröger, U. 2017. Reassessing Hydrological Processes That Control Stable Isotope Tracers in Groundwater of the Atacama Desert (Northern Chile). *Hydrology* 5(1): 3, <https://doi.org/10.3390/hydrology5010003>.
- Scheihing, K.W.; Moya, C.E. and Tröger, U. 2017. Insights into Andean slope hydrology: reservoir characteristics of the thermal Pica spring system, Pampa del Tamarugal, northern Chile. *Hydrogeology Journal*, <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1533-0>
- Schlunegger, F.; Kober, F.; Zeilinger, G. and von Rotz, R. 2010. Sedimentology-based reconstructions of paleoclimate changes in the Central Andes in response to the uplift of the Andes, Arica region between 19 and 21°S latitude, northern Chile. *International Journal of Earth Sciences* 99(S1): 123–137, <https://doi.org/10.1007/s00531-010-0572-8>.
- Semsar Yazdi, A.A. and Labbaf Khaneiki, M. 2017. *Qanat Knowledge. Construction and Maintenance*. The Netherland: Springer Science+Business Media B.V.

- Shepherd, J.M.; Taylor, O.O. and Garza, C. 2004. A dynamic GIS-Multicriteria technique for siting the NASA-Clark Atlanta urban rain gauge network. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 21(9): 1346–1363.
- Superintendencia de Servicios Sanitarios. 2013. Estudio de determinación de tarifas 2013-2018 Aguas del Altiplano S.A. Tomo I. Informe final. Santiago de Chile: SISS.
- Suzuki, O. and Aravena, R. 1985. Hidrología isotópica y el recurso agua del sector Esmeralda-Pia-Matilla. *Nucleotecnica* 4(8): 41–51.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. 1990. Cambridge University Press. Cambridge.
- UN. 2010. United Nations decade for deserts and fight against desertification, [http://www.un.org/en/events/desertification\\_decade/whynow.shtml](http://www.un.org/en/events/desertification_decade/whynow.shtml) (accessed 20 October 2018)
- UN. 2011. Global drylands: A UN system-wide response. United Nations.
- UNESCO. 2018. Local and indigenous knowledge systems, <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/priority-areas/links/related-information/what-is-local-and-indigenous-knowledge/> (accessed 20 October 2018)
- Uribe, J.; Muñoz, J.F.; Gironás, J.; Oyarzún, R.; Aguirre, E. and Aravena, R. 2015. Assessing groundwater recharge in an Andean closed basin using isotopic characterization and a rainfall-runoff model: Salar del Huasco basin, Chile. *Hydrogeology Journal* 23(7): 1535–1551, <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1300-z>.
- Urteaga, P. 2014. Entre la abundancia y la escasez de agua: discursos, poder y biocombustibles en Piura, Perú. *Debates en Sociología* (38): 55–80.
- Usón, T.J.; Henríquez, C. and Dame, J. 2017. Disputed water: Competing knowledge and power asymmetries in the Yali Alto basin, Chile. *Geoforum* 85: 247–258, <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.07.029>.
- Valdés-Pineda, R.; Pizarro, R.; García-Chevesich, P.; Valdés, J.B.; Olivares, C.; Vera, M.; Balocchi, F.; Pérez, F.; Vallejos, C.; Fuentes, R.; Abarza, A. and Helwig, B. 2014. Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology* 519: 2538–2567, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>.
- Victor, P.; Oncken, O. and Glodny, J. 2004. Uplift of the western Altiplano plateau: Evidence from the Precordillera between 20° and 21°S (northern Chile). *Tectonics* 23(4): n/a-n/a, <https://doi.org/10.1029/2003TC001519>.
- Viguié, B. 2016. Caractérisation des facteurs de contrôle de la recharge et des écoulements souterrains a différentes échelles de temps en zone de piedmont aride a hyper-aride. PhD thesis, University of Montpellier, France.
- Viguié, B.; Jourde, H.; Yáñez, G.; Lira, E.S.; Leonardi, V.; Moya, C.E.; García-Pérez, T.; Maringue, J. and Lictevoid, E. 2018. Multidisciplinary study for the assessment of the geometry, boundaries and preferential recharge zones of an overexploited aquifer in the Atacama Desert (Pampa del Tamarugal, Northern Chile). *Journal of South American Earth Sciences* 86: 366–383, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.05.018>.
- Villalobos, R., S. 1979. La economía de un desierto. Tarapacá durante la colonia. Nueva Universidad. Santiago, Chile.
- Vivekan, N. and Jagtap, R. 2012. Optimization of hydrometric network using spatial regression approach. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science* 2(Special Issue Special Issue on Geospatial Technology Development in Natural Resource and Disaster Management): 56–61.
- Volkman, T.H.M.; Lyon, S.W.; Gupta, H.V. and Troch, P.A. 2010. Multicriteria design of rain gauge networks for flash flood prediction in semiarid catchments with complex terrain. *Water Resources Research* 46(11): W11554, <https://doi.org/10.1029/2010WR009145>.
- WHO (Ed). 2011. *Guidelines for drinking-water quality*. 4th ed. Geneva: World Health Organization.



WMO (Ed). 2008. *Guide to hydrological practices*. 6th ed. WMO no. 168. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.

## Annexe 1 : Références personnelles

### Articles scientifiques, livres et chapitres de livre

**Lictevout E.** & Faysse N. (2018). A Doubly Invisible Aquifer: Hydrogeological Studies and Actors' Strategies in the Pampa del Tamarugal Aquifer, North Chile. *Water Alternatives 11* (3):592-606. *Special Issue on "Local- and national-level politics of groundwater overexploitation"*.

Viguiet B., Jourde H., Lira E., Yañez G., Leonardi V., Moya C., García-Perez T., Maringue J., **Lictevout E.** (2018). Multidisciplinary study for the assessment of the geometry, boundaries and preferential recharge zones of an overexploited aquifer in the Atacama Desert (Pampa del Tamarugal, Northern Chile). *Journal of South American Earth Sciences 86* (2018) 366-383. DOI: 10.1016/j.jsames.2018.05.018

**Lictevout, E.** & Gocht, M. (2017). Hydrometric network design in hyper-arid area. *Hydrology Research 49* (4) 1208-1220. DOI 10.2166/nh.2017.004

Scheihing, K.; Moya, C.; Struck, U.; **Lictevout, E.** and Tröger, U. (2017). Reassessing Hydrological Processes That Control Stable Isotope Tracers in Groundwater of the Atacama Desert (Northern Chile). *Hydrology 2018* 5, 3. DOI: 10.3390/hydrology5010003.

**Lictevout, E.**, Maas, C., Córdoba, D., Herrera, V., Payano, R. (2014). Gestión de la información hídrica en zona árida: caso de la Región de Tarapacá, norte de Chile. *Aqua-LAC 5* (2) 69-77.

**Lictevout, E.**, Maas, C., Córdoba, D., Herrera, V., Payano, R. (2013). Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá: Diagnostico y sistematización de la información. Ed. UNAP – Universidad Arturo Prat. ISBN 978 956 302 081-6

González, F., **Lictevout, E.** (2005). Project Management. En: Water, Sanitation and Hygiene for Populations at Risk. *Action Contre la Faim, ed. Hermann*. ISBN 2 7056 6499 8.

**Lictevout, E.** & Affeltranger, B. (2006). La gestion locale des inondations et annonce des crues. Exemple d'une approche participative au Cambodge. En: Politiques de l'eau. Grands principes et réalités locales. *Presse de l'Université du Québec*. ISBN 2-7605-1457-9.

**Lictevout E.**, Abellanosa C., Maass C., Estay N. & Yañez G. (en revision, soumis 10/2018). Socavones of the Oasis of Pica: Exploration, Mapping and Description of Atacama Desert Filtration Galleries. *Journal of Arid Environnement*.

Viguiet B., De Montety V., Batiot-Ghilhe C., Favreau G. Jourde H., Leonardi V., Taupin J.D., Daniele L. & **Lictevout E.** (en révision. Soumis 09/2018). Impacts of the ephemeral recharge processes in the distribution of renewable groundwater resources in the fossil aquifers of Atacama Desert using  $^{14}\text{C}/\delta^{13}\text{C}$  and CFCs (Pampa del Tamarugal, Northern Chile).

Clemo F., Farias L., Rondanelli R., **Lictevout E.**, and Gayo E. (en revision, soumis 07/2018). A geochemical perspective for evaluating ocean influence on relict fog forests from semi-arid Chile. *Journal of Arid Environnement*.

Viguiet B., Leonardi V., **Lictevout E.**, Jourde H (Under review). Bedrock morphology and tectonic control alluvial cover architecture and groundwater circulation in the Andean Piedmont between 19.5°S and 20°S (Northern Chile). *Basin Research*.

## Congrès

Bricquet J.P., Boyer J.F., **Lictevout E.**, Servat E. Building a water resources information system in the Tarapaca region – Chile- IAHS Scientific Assembly, 10-14 July 2017, Port Elizabeth, South Africa

Moya, C., **Lictevout, E.**, Amaro, S., Viguiet, B., Lira, E., Maringue, J., Yáñez, G. & García-Pérez, T. Three-dimensional hydrogeological modelling of the Pampa del Tamarugal aquifer. Modelling with limited well-log data. XIV Congreso Geológico Chileno; La Serena 4-8 Octubre 2015.

Viguiet, B., Jourde, H., Leonardi, V. & **Lictevout, E.** Recharge controls in arid and hyperarid piedmont. Example of the Pampa del Tamarugal basin, Northern Chile. Poster. AGU Joint Assembly, Canada, Montreal. May 2015.

**Lictevout, E.**, Amaro, S., Cordoba. D. & Rodriguez, J. Estudio histórico de la variación del nivel piezométrico del acuífero Pampa del Tamarugal, norte de Chile. XII Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, Santiago, Chile, 27-29 agosto 2014.

**Lictevout, E.**, Payano, R., Amaro, S. Córdoba, D., Herrera, V. & Arancibia, F. Design of a regional water resources monitoring network in arid area. Water in Mining congress, Viña del Mar, 2014.

Amaro, S., Herrera, V. & **Lictevout, E.** Spatial distribution of arsenic in the region of Tarapacá, northern Chile. 5th Congreso Internacional sobre el Arsénico en el Medio Ambiente, Buenos Aires, Argentina, 11 a 16 de mayo 2014.

Herrera, V., Amaro, S., Cordoba. D. & **Lictevout, E.** Arsénico en aguas continentales de las cuencas de Tarapacá, norte de Chile. XXX Jornadas Chilenas de Química, Pucón, Chile. 12 a 15 de noviembre 2013.

Maass, C., Rodriguez, J. & **Lictevout, E.** Creation of a Water Observatory, region of Tarapacá, north of Chile: an information management and transfer tool. Knowledge for the Future. Joint Assembly Gothenburg IAHS-IAPSO-IASPEI. 24 de Julio 2013.

## Annexe 2 : Matériel supplémentaire



Tableau 1: Durée et continuité des séries de données historiques des précipitations des stations DGA de la région de Tarapacá. Légende au bas du tableau 2, page suivante (Élaboration propre).

Nº	Station name	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2013	Nº of years with data	Nº of full years data
1	Altos del Huasco							2	2
2	Apamilca							4	4
3	Camiña							42	39
4	Cancosa							37	36
5	Cerro Colorado							20	20
6	Chiapa							1	1
7	Chuzmiza							25	25
8	Colchane							38	37
9	Collahuasi							20	20
10	Copaquire							36	33
11	Coposa							31	20
12	Coyacagua							52	52
13	Diablo Marca							2	2
14	Enquelca							28	24
15	Esmeralda							6	4
16	Guatacondo							36	36
17	Huara en Fuerte Baquedano							20	20
18	Huaytani							31	29
19	Iquique							29	29
20	Lagunillas (Pampa Lirima)							31	30
21	Mamiña							27	27
22	Mocha							25	24
23	Pampa Lirima							12	12
24	Pampa Lirima DCP							2	2
25	Parca							36	36
26	Poroma							45	41
27	Puchultiza							6	6
28	Pumire							29	29
29	Camiña en Tarcavire							7	7
30	Tarapacá en Sibaya							9	9
31	Sagasca							21	18
32	Salar Huasco							1	1
33	Sillillica							2	2
34	Ujina							39	33

Tableau 2: Durée et continuité des séries de données historiques des débits des stations de jaugeages DGA de la région de Tarapacá (élaboration propre).

Nº	Station name	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019	Nº of years with data	Nº of full years data
1	Río Cariquima en Cariquima							6	3
2	Qda. Camiña en Altusa							20	9
3	Río Batea en Confluencia							28	13
4	Río Tarapacá en Mina San Juan							20	10
8	Qda. Camiña en Tarcavire							5	0
9	Qda. Tarapacá en Sibaya							21	7
10	Qda. Quipisca en Candelabro							3	2
11	Qda. Quipisca en Quipisca							3	2
12	Qda. Huatahuata							3	2
13	Río Guatacondo en Copaquire							39	21
14	Río Cancosa en el Tambo							21	14
18	Qda. Tarapacá en Laonsana							10	6
19	Río Coscaya en Pampa Lirima							13	11
20	Río Isluga en Bocatoma							19	7
21	Río Collacagua en Penablanca							35	15
22	Río Coscaya en Saitoco							31	9
23	Río Piga en Collacagua							51	40

Legend of Table 1 and 2: Colors correspond to the number of month with full data per year:

	Full year (12 months)
	9-11 months
	7-8 months
	< 7 months
	No data

Tabla 3. Piezómetros seguidos por la DGA dans la region de Tarapacá (Élaboration propre à partir des données DGA accessibles sur [www.dga.cl](http://www.dga.cl))

<b>ID piezometer</b>	<b>Nom</b>	<b>UTM_E*</b>	<b>UTM_N*</b>	<b>Altitude (m)*</b>	<b>Date début suivi</b>
PM_009_A	SALAR PINTADOS	432326	7720575	966	mar-88
PM_013_A	SALAR BELLAVISTA	426236	7695371	945	abr-88
PM_015_A	SALAR BELLAVISTA	441994	7699154	964	mar-88
PM_020_A	SALAR PINTADOS (SARA - TIRANA)	426836	7751866	1008	abr-88
PM_022_A	SALAR PINTADOS 2	435285	7720321	972	mar-88
PM_031_A	BELLAVISTA	438772	7708111	966	mar-88
PM_032_A	SALAR SUR VIEJO	440303	7685003	917	feb-92
PM_033_A	PUNTA DOLORES	401718	7824249	1115	mar-88
PM_038_A	CONCOVA	468013	7735137	1472	jun-00
PM_039_A	LA CALERA 3	455171	7745881	1105	feb-92
PM_040_A	LA CALERA 2	453299	7744812	1055	feb-00
PM_041_A	ESMERALDA 6	449653	7742623	994	jun-00
PM_042_A	ESMERALDA 11	459519	7735752	1096	abr-92
PM_045_A	ESMERALDA 28	460136	7735493	1114	jun-93
PM_047_A	ESMERALDA 34	460596	7734578	1117	jun-93
PM_051_A	PLANTA AP. HISPANIA	432833	7739176	991	mar-92
PM_056_A	PUQUIO NUNEZ	463283	7721558	1184	jun-00
PM_057_A	SALAR PINTADOS	432710	7726292	964	abr-92
PM_063_A	SALAR BELLAVISTA	440396	7703579	969	mar-88
PM_066_A	LUIS QUISPE	440611	7735599	970	jun-00
PM_070_A	REMOLINO	410925	7820114	1153	mar-92
PM_071_A	REMOLINO	409142	7823328	1138	ene-80
PM_074_A	SALAR SUR VIEJO	437606	7686957	922	jun-99
PM_075_A	JICA 5	427467	7760047	1023	mar-98

PM_076_A	JICA 7	430539	7731731	975	mar-98
PM_077_A	JICA 9	438495	7705014	964	mar-98
PM_078_A	JICA 8	445891	7722691	1009	mar-98
PM_079_A	JICA 6	445636	7739238	986	mar-98
PM_080_A	JICA 4	421753	7803816	1163	mar-98
PM_081_A	JICA 3	413907	7815718	1143	mar-98
PM_082_A	JICA C	426482	7790035	1108	mar-98
PM_083_A	CARMELO 2	440824	7757975	1059	mar-88
PM_085_A	JICA G	516566	7775678	3847	ene-00
PM_086_A	JICA 10	517483	7766001	3844	mar-98
PM_087_A	CHACARILLA	465954	7716212	1276	feb-92
PM_088_A	JICA D	428238	7770096	1062	ene-00
PM_089_A	JICA E	428123	7751680	1001	ene-00
PM_090_A	JICA F	447451	7708706	1010	ene-00

\*Projection WGS84.



Tableau 4: Détails du relevé topographique avec GPS différentiel des forages sélectionnés pour les campagnes piézométriques de 2012, 2013 et 2014.

ID	Référence	N_UTM*	E_UTM*	Altitude (m)	Précision horizontale (m)	Précision verticale (m)	NP 2013 (m)
PE_001_L	Pozo 1	7756377,13	443528,39	1063,40	0,017	0,031	
PE_001_W	G;11	7734802,53	416954,91	993,47	0,015	0,025	979,67
PE_001_X	Pozo Aragón 106	7828767,1	399007,86	1116,09	0,014	0,023	1111,38
PE_001_Y	Rodal 11	7813744,02	409670,91	1137,99	0,016	0,03	
PE_002_L	Pozo 2	7756647,07	443967,79	1072,85	0,015	0,0255	988,86
PE_002_X	CH20;NORIA	7807651,35	416176,52	1154,58	0,008	0,0145	1129,15
PE_002_Y	Rodal 12	7813004,04	408414,68	1136,45	0,017	0,035	
PE_003_L	Pozo 3	7756780,82	444160,24	1077,70	0,016	0,0235	
PE_003_O	Dupliza 3	7767050,52	435920,63	1058,20	0,026	0,049	1004,59
PE_003_X	CH1;NORIA	7742143,2	442857,63	987,11	0,013	0,021	974,04
PE_004_M	CH2;CHARC A	7767525,21	416604,07	1038,25	0,016	0,034	1027,59
PE_004_O	Dupliza 1	7766859,82	435546,79	1057,13	0,017	0,042	
PE_004_X	CH3;NORIA	7803629,41	416930,56	1153,24	0,013	0,026	1118,08
PE_005_O	Canchones D (Pozo 659)	7739741,73	446196,80	995,71	0,014	0,028	969,14
PE_005_X	CH32;SOND AJE	7790245,84	425169,11	1111,72	0,013	0,0195	1058,20
PE_006_W	Pozo 8	7711259,81	424971,76	960,84	0,025	0,036	955,80
PE_006_X	CH4;NORIA	7823868,62	401004,42	1121,12	0,014	0,0205	1113,09
PE_007_EW	Pozo 10;1	7710993,15	426731,50	960,87	0,025	0,0365	955,62
PE_007_O	Canchones F (Pozo 1158)	7740138,44	445619,53	992,51	0,013	0,027	968,83
PE_007_X	CH30;NORIA	7823600,79	393251,04	1126,31	0,015	0,023	1112,46
PE_008_EW	S11	7764282,12	425153,24	1038,76	0,019	0,043	1002,21
PE_008_O	Canchones G	7739827,87	445416,05	992,54	0,013	0,0255	969,04
PE_008_X	Pozo 658;AA2	7824092,13	396788,03	1123,76	0,015	0,027	1112,93
PE_008_Y	Rodal 1	7815828,43	415275,04	1148,89	0,015	0,029	1134,52
PE_009_M	Democracia 1	7802796,24	410084,40	1143,38	0,013	0,022	1129,86
PE_009_O	Canchones I	7739540,15	445983,60	995,41	0,014	0,028	
PE_009_W	Pozo Animitas	7706165,86	431540,81	956,52	0,013	0,024	951,48
PE_009_X	CH5;NORIA	7757087,53	419263,41	1022,96	0,008	0,013	
PE_009_Y	Rodal 2	7816237,56	415487,25	1151,07	0,015	0,026	1135,24
PE_010_X	CH6;NORIA	7756985,02	419407,66	1022,85	0,011	0,0135	
PE_010_Y	Rodal 3	7816397	415400,72	1151,76	0,014	0,023	1135,39
PE_011_EW	Pozo P;1	7736543,93	411888,74	993,54	0,031	0,0485	964,03
PE_011_O	Canchones 2	7740708,73	445826,24	993,33	0,012	0,0265	968,32
PE_011_X	CH7;POZO	7751199,42	429387,91	1005,60	0,008	0,0125	990,06
PE_012_EW	Pozo 1	7786771,55	423270,69	1096,94	0,009	0,014	1046,69
PE_012_X	CH8;NORIA	7751401,65	429304,00	1006,82	0,01	0,016	
PE_013_EW	SCN 968	7779674,44	425504,68	1079,35	0,019	0,03	1024,91
PE_013_X	CH9;NORIA	7748267,2	432274,90	999,49	0,011	0,0195	985,23
PE_014_EW	Pozo 2	7786868,55	424743,93	1098,02	0,011	0,0165	1044,17
PE_014_M	Susana 1	7803748,58	410981,83	1142,03	0,017	0,026	

PE_014_X	CH10;NORIA	7748455,86	432409,82	1000,27	0,01	0,0165	982,84
PE_014_Y	Rodal 7	7815387,87	415397,36	1148,79	0,014	0,026	1135,39
PE_015_W	Pozo 1	7805376,43	411000,11	1141,82	0,015	0,022	1127,55
PE_015_X	CH11;NORIA	7748011,45	432231,15	999,50	0,01	0,0185	983,90
PE_016_W	Pozo 3	7806934,77	411893,16	1143,69	0,017	0,037	1127,97
PE_016_X	CH12;NORIA	7751497,85	429151,10	1007,33	0,012	0,018	987,08
PE_016_Y	Rodal 9	7815357,73	415083,71	1147,85	0,014	0,026	1133,95
PE_017_W	Pozo 4	7807804,29	410533,55	1140,95	0,046	0,065	1128,19
PE_017_X	CH31;NORIA	7751503,63	429143,91	1007,10	0,012	0,0195	
PE_017_Y	Rodal 10	7815237,01	414853,98	1147,13	0,015	0,029	1133,96
PE_018_X	Deslinde Este	7751434,7	428309,19	1006,21	0,013	0,022	988,36
PE_018_Y	CH13;NORIA	7814878,78	414503,57	1145,45	0,014	0,0255	1132,44
PE_019_EM	Susana 4	7803613,79	411812,64	1144,15	0,018	0,027	
PE_019_W	Pozo 7	7809529,47	410601,23	1140,66	0,013	0,025	1132,44
PE_019_X	CH21;CHAR CA	7694370,94	426550,75	943,99	0,006	0,0145	942,41
PE_019_Y	Rodal 12	7815050,49	413853,59	1143,62	0,014	0,0295*	1131,06
PE_020_X	CH22;CHAR CA	7694373,96	426544,20	946,84	0,006	0,012	941,55
PE_021_X	CH14;NORIA	7802159,52	418243,38	1151,37	0,013	0,028	1118,29
PE_022_X	Carmelo Lote 80	7752571,16	434048,05	1011,51	0,068	0,116	990,38
PE_023_X	CH15;SOND AJE	7760970,63	431961,84	1033,98	0,018	0,025	998,38
PE_024_X	CH16;SOND AJE	7744239,45	433207,36	992,93	0,016	0,031	982,86
PE_024_Y	Rodal 17	7815674,41	414758,75	1147,14	0,012	0,026	1132,93
PE_025_X	CH17;NORIA	7696961,43	424940,46	949,61	0,01	0,021	
PE_026_W	Pozo Brac	7710169,99	430482,23	961,69	0,014	0,032	955,84
PE_026_X	CH19;NORIA	7807565,72	416040,74	1154,35	0,009	0,017	1129,15
PE_027_O	CuminallaA(S ondaje656)	7738714,79	444495,61	988,85	0,013	0,026	969,30
PE_027_X	CH23;POZO	7710179,99	430497,92	961,45	0,015	0,0305	955,84
PE_027_Y	RODAL 20	7816564,81	415334,52	1152,92	0,015	0,0225	1135,84
PE_028_O	Cuminalla (Sondaje 4919)	7738419,89	444417,83	989,03	0,011	0,028	970,22
PE_028_X	CH18;SOND AJE	7718196,16	439328,65	983,37	0,017	0,026	967,38
PE_029_X	Sondaje 1 (Kumina 1)	7803718,98	417431,41	1154,09	0,015	0,027	1120,02
PE_029_Y	Rodal 5 (Bellavista)	7702051,1	433335,00	951,08	0,015	0,032	942,35
PE_030_O	Cuminalla 493 Diesel	7737572,54	443588,54	986,46	0,015	0,029	968,80
PE_030_X	Pozo 2 (Kumina 2)	7803528,94	417621,30	1154,19	0,011	0,022	1120,20
PE_030_Y	Rodal 9 (Bellavista)	7700198,95	435016,81	949,25	0,047	0,113	938,04
PE_032_W	PM;02	7779903,89	425598,65	1079,85	0,016	0,025	1025,31
PE_033_Y	Cachango	7696058,84	429441,53	944,92	0,008	0,017	943,12
PE_034_Y	Huaycazo 10	7729336,17	435841,29	976,45	0,018	0,033	
PE_037_EW	Pozo Bellavista	7701860,25	437511,69	961,31	0,029	0,038	947,54
PE_037_O	Dolores N1	7824197,87	401569,61	1121,69	0,014	0,021	
PE_037_Y	Huaycazo 18	7726949,22	435929,55	976,39	0,018	0,026	962,80
PE_038_EW	Pozo 13	7704813,05	439227,15	970,90	0,019	0,025	954,93
PE_038_Y	Huaycazo 20	7725703,14	437145,75	979,88	0,019	0,03	966,33
PE_039_O	Dupliza 2 (Sondaje 2)	7766848,42	435787,58	1057,41	0,037	0,0495	1004,25

PE_039_Y	Huaycazo 21	7723495,09	436877,03	979,90	0,023	0,047	967,41
PE_040_EW	Pique N4	7705197,52	439398,38	971,97	0,024	0,03	955,04
PE_042_EW	Pique N2	7702818,22	436844,88	960,91	0,109	0,0915	949,47
PE_042_O	Dolores 2(Sondaje 2)	7823954,66	401507,94	1121,67	0,014	0,019	1112,62
PE_042_Y	Junoy 3;1	7737269,72	426675,86	988,62	0,016	0,029	
PE_045_Y	Administracion	7739922,92	427204,09	992,38	0,025	0,043	979,10
PE_047_Y	Felipe 16	7741855,81	428250,10	994,79	0,05	0,126	979,72
PE_048_M	Germania C	7800907,22	407959,47	1165,75	0,009	0,0135	1135,79
PE_048_W	Pozo S;3	7709988,07	431344,05	962,31	0,014	0,0325	955,81
PE_048_Y	Felipe 20	7741416,65	427370,41	994,59	0,025	0,0445	979,46
PE_049_M	Candelaria 2	7816574,71	405078,14	1136,14	0,015	0,027	1128,26
PE_049_W	Pozo S;23	7710083,63	429558,15	961,40	0,015	0,0745	955,74
PE_049_Y	Felipe 9	7742510,14	426222,65	995,53	0,028	0,049	981,17
PE_050_M	Pozo Angela 1	7815821,53	404130,41	1135,57	0,015	0,03	1127,96
PE_050_W	S;16	7712065,44	432298,70	965,73	0,022	0,036	956,76
PE_051_M	Pola 2	7789481,62	423134,96	1107,28	0,01	0,0145	1056,38
PE_052_M	Sondaje	7789323,13	421491,38	1107,64	0,008	0,0135	1059,05
PE_053_W	S;17A	7711965,98	431202,21	963,89	0,078	0,107	956,43
PE_053_Y	Algarrobal 1	7736531,42	429782,95	987,46	0,019	0,027	974,75
PE_054_W	S;30	7696138,43	426016,84	946,21	0,007	0,016	943,01
PE_054_Y	Algarrobal	7739492,06	429938,77	990,51	0,056	0,076	975,91
PE_055_W	S;6B	7703353,62	428740,14	950,59	0,007	0,011	949,79
PE_055_Y	Cantera 9	7738066,98	424297,58	991,74	0,044	0,042	979,04
PE_056_W	TC;9	7705115,24	448361,41	1020,31	0,017	0,0245	958,03
PE_057_W	CH24;SOND AJE	7712406,12	442978,04	991,60	0,008	0,0105	961,92
PE_058_W	CH25;SOND AJE	7705760,53	447625,20	1015,86	0,015	0,0235	958,14
PE_058_Y	Finao 6	7733383,35	428458,42	981,81	0,014	0,0285	970,13
PE_059_W	CH26;SOND AJE	7703225,11	443623,08	988,52	0,015	0,025	954,76
PE_059_Y	Finao 7	7734320,92	428057,43	983,83	0,013	0,029	971,58
PE_060_W	CH27;SOND AJE	7705098,13	448366,14	1020,12	0,015	0,023	958,11
PE_060_Y	Finado 10	7731749,66	427251,52	980,10	0,013	0,025	971,46
PE_061_W	CH28;SOND AJE	7705144,09	446296,54	1007,05	0,015	0,0215	957,04
PE_062_W	Pique Aurrera	7718228,2	437500,89	978,98	0,079	0,106	
PE_062_Y	Pillaya 8	7730569,61	429661,15	978,34	0,016	0,0275	966,65
PE_063_Y	Pillaya 1	7731551,7	429306,56	979,20	0,14	0,0275	967,84
PE_067_Y	Rodal 6	7736190,57	435803,53	981,56	0,013	0,02	968,42
PE_069_Y	La Gatica 2A	7734533,89	433920,63	980,96	0,014	0,0215	969,67
PE_070_Y	Esperanza 8	7730236,84	433273,94	976,40	0,014	0,0215	965,60
PE_071_Y	Esperanza 5	7730759,59	431921,89	978,49	0,015	0,0265	965,31
PE_073_Y	Casa Vieja	7737398,85	431309,68	986,34	0,019	0,027	974,34
PE_074_Y	La Habana	7732967,21	433057,04	979,95	0,013	0,0245	967,91
PM_003_L	DGA;3	7764825,82	462465,37	1581,02	0,02	0,033	1567,79
PM_004_O	Dolores 4	7824344,19	401603,53	1121,59	0,013	0,021	1111,41
PM_005_A	Salar Pintados (DGA C;162)	7733808,17	420148,82	989,52	0,011	0,024	
PM_005_O	Dolores 3	7823960,67	401513,30	1121,53	0,015	0,02	1111,13

PM_006_O	Pozo Obs 1	7756748,46	438353,23	1035,53	0,018	0,035	986,73
PM_007_O	Pozo Obs 2	7755761,35	438503,92	1032,83	0,014	0,024	986,47
PM_009_A	Salar Pintados (DGA B;254)	7720572,93	432323,25	973,90	0,021	0,03	967,81
PM_013_A	Salar Bellavista (DGA D;290)	7695371,6	426236,79	946,22	0,007	0,015	943,10
PM_015_A	Salar Bellavista (DGA D;286)	7699157,36	441996,49	971,39	0,021	0,038	950,55
PM_020_A	Sara; Tirana (D; 81)	7751865,52	426837,22	1008,72	0,011	0,0175	989,96
PM_022_A	Salar Pintados 2 (DGA 256)	7720323,17	435284,96	976,77	0,084	0,0485	966,93
PM_031_A	Bellavista (DGA B; 276)	7708113,58	438775,45	973,07	0,015	0,026	956,82
PM_033_A	Punta Dolores (Dolores 6)	7824250,44	401718,93	1122,14	0,012	0,019	1110,74
PM_039_A	La Calera 3	7745879,41	455169,87	1104,58	0,032	0,086	1090,69
PM_040_A	La Calera 2	7744807,68	453299,59	1055,59	0,017	0,026	987,02
PM_041_A	Esmeralda 6 (C;174)	7742622,08	449652,84	1002,03	0,016	0,023	981,60
PM_042_A	Esmeralda 11- 183	7735751,41	459514,75	1095,66	0,01	0,016	1069,26
PM_045_A	Esmeralda 28- 197	7735492,26	460133,38	1110,62	0,01	0,017	1067,37
PM_047_A	Esmeralda34- 203	7734577,29	460596,54	1120,06	0,007	0,0145	1072,59
PM_051_A	Hispania	7739172,64	432834,07	987,97	0,035	0,0555	977,72
PM_056_A	Puquio Nuñez	7721559,4	463282,09	1188,19	0,016	0,034	1168,43
PM_057_A	Salar Pintados Salar	7726291,13	432708,48	974,08	0,016	0,0235	967,09
PM_063_A	Bellavista (DGA D;281)	7703580,2	440400,86	972,98	0,017	0,024	954,24
PM_066_A	Luis Quispe	7735597,5	440612,35	981,27	0,031	0,052	968,20
PM_070_A	Remolino	7820114,59	410924,29	1146,07	0,012	0,022	1133,30
PM_071_A	Remolino A17	7823328,53	409142,79	1141,95	0,007	0,016	1127,67
PM_075_A	Jica 5	7760042,73	427468,83	1029,74	0,019	0,028	997,99
PM_076_A	Jica 7	7731735,69	430539,86	981,27	0,016	0,037	972,71
PM_077_A	Jica 9	7705021,12	438500,54	969,71	0,017	0,0315	955,88
PM_078_A	Jica 8	7722690,43	445892,63	1017,04	0,033	0,052	977,99
PM_079_A	Jica 6	7739233,89	445634,32	993,95	0,012	0,0245	979,01
PM_080_A	Jica 4	7803808,64	421746,12	1169,03	0,013	0,0275	1121,83
PM_081_A	Jica 3	7815703,86	413903,80	1144,69	0,014	0,0285	1133,68
PM_082_A	Jica C	7790032,09	426484,23	1110,34	0,013	0,024	1060,85
PM_087_A	Chacarilla	7716210,58	465954,04	1283,26	0,017	0,0405	1212,83
PM_088_A	Jica D	7770095,81	428240,89	1056,69	0,022	0,053	1009,29
PM_089_A	Jica E	7751674,13	428123,23	1007,01	0,013	0,0215	991,11
PM_090_A	Jica F	7708712,6	447453,47	1017,30	0,01	0,0175	962,74
PM_093_A	Pozo en Qda. de Aroma	7808172,82	427964,63	1238,07	0,014	0,028	1229,46
PM_094_A	CH29;POZO	7724687,2	427347,97	975,36	0,012	0,02	

\* Sistema de coordenadas UTM datum WGS 1984, zona 19 Sur (69 Oeste).



## Annexe 3 : Publications personnelles

### Contenu:

**Lictevout E.** & Faysse N. (2018). A Doubly Invisible Aquifer: Hydrogeological Studies and Actors' Strategies in the Pampa del Tamarugal Aquifer, North Chile. *Water Alternatives 11* (3):592-606. *Special Issue on "Local- and national-level politics of groundwater overexploitation"*.

Viguiet B., Jourde H., Lira E., Yañez G., Leonardi V., Moya C., García-Perez T., Maringue J., **Lictevout E.** (2018). Multidisciplinary study for the assessment of the geometry, boundaries and preferential recharge zones of an overexploited aquifer in the Atacama Desert (Pampa del Tamarugal, Northern Chile). *Journal of South American Earth Sciences 86* (2018) 366-383. DOI: 10.1016/j.jsames.2018.05.018

**Lictevout, E.** & Gocht, M. (2017). Hydrometric network design in hyper-arid area. *Hydrology Research 49* (4) 1208-1220. DOI 10.2166/nh.2017.004

Scheihing, K.; Moya, C.; Struck, U.; **Lictevout, E.** and Tröger, U. (2017). Reassessing Hydrological Processes That Control Stable Isotope Tracers in Groundwater of the Atacama Desert (Northern Chile). *Hydrology 2018* 5, 3. DOI: 10.3390/hydrology5010003.

**Lictevout, E.**, Maas, C., Córdoba, D., Herrera, V., Payano, R. (2013). Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá: Diagnostico y sistematización de la información. Ed. UNAP – Universidad Arturo Prat. ISBN 978 956 302 081-6