



## Sobreingesta de boro durante la época precolombina en las poblaciones de Arica: implicancias biológicas y culturales

### Boron overexposure in pre-Columbian times. Biological and cultural implications

Bernardo Arriaza<sup>1\*</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9921-9253>

Leonardo Figueroa Tagle<sup>2</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-4885-9714>

Vivien Standen<sup>3</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-7510-5160>

Natalia Aravena Sánchez<sup>4</sup>  <https://orcid.org/0000-0002-0050-0246>

Arnoldo Vizcarra Rojas<sup>5</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-9911-1488>

Camila Contreras Carmona<sup>6</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-6121-6049>

<sup>1</sup>Universidad de Tarapacá, Instituto de Alta Investigación, Arica, CHILE. \*Autor correspondiente. [barriazaarica@gmail.com](mailto:barriazaarica@gmail.com)

<sup>2</sup>Universidad de Tarapacá. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Arica, CHILE. [lfigueroa.arica@gmail.com](mailto:lfigueroa.arica@gmail.com)

<sup>3</sup>Universidad de Tarapacá, Departamento de Antropología, Arica, CHILE. [vivien.standen@gmail.com](mailto:vivien.standen@gmail.com)

<sup>4</sup>Universidad de Tarapacá, Instituto de Alta Investigación, Arica, CHILE. [natalia.aravena.sanchez@gmail.com](mailto:natalia.aravena.sanchez@gmail.com)

<sup>5</sup>Universidad de Tarapacá, Instituto de Alta Investigación, Arica, CHILE. [arnoldo.vizcarra.rojas@gmail.com](mailto:arnoldo.vizcarra.rojas@gmail.com)

<sup>6</sup>Universidad de Tarapacá. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Arica, CHILE. [camila.contreras.carmona@gmail.com](mailto:camila.contreras.carmona@gmail.com)

#### Resumen

Algunos valles del norte de Chile presentan alto contenido de boro en sus aguas (> 25 mg/L), reservorios naturales para el consumo humano. En las poblaciones precolombinas del norte de Chile, este consumo conllevó una sobreingesta de boro, elemento nocivo para la salud que causa problemas gastrointestinales, entre otros. Las aguas de los valles de Lluta y Camarones presentan los promedios más elevados de boro (14 y 25 mg/L respectivamente) y el valle de Azapa, los más bajos (1 mg/L). Considerando estos antecedentes, mediante espectrofotometría de absorción molecular se estudiaron muestras de costillas de 211 individuos de los valles señalados, para estimar las concentraciones de boro en poblaciones precolombinas del norte de Chile. Todas las muestras estudiadas presentaron valores promedios entre aproximadamente 7 a 23 veces más que los reportados para poblaciones modernas (10,2 mg/Kg de boro). Las poblaciones que habitaron los valles de Lluta (235,52 mg/Kg) y Camarones (119,09 mg/Kg) fueron las más afectadas, seguidas por el valle de Azapa (69,97 mg/Kg). Concluimos que las antiguas poblaciones del norte de Chile fueron significativamente afectadas por la sobreingesta de boro y que la calidad de las aguas debería ser considerada en las discusiones sobre el poblamiento y trayectorias bioculturales precolombinas.

**Palabras clave:** momias andinas, contaminación, toxicidad.

#### Abstract

In some valleys in northern Chile, the natural water reservoirs used for human consumption contain high levels of boron (> 25 mg/L). In local Pre-Columbian populations, this resulted in overexposure which is harmful to human health, causing gastrointestinal and other issues. Boron levels vary regionally, with the Lluta and Camarones Valleys presenting higher mean values (14 and 25 mg/L, respectively) than the Azapa Valley (1 mg/L). To estimate concentrations in northern Chile's pre-Columbian populations, we used molecular absorption spectrophotometry to analyze rib samples of 211 individuals from these valleys. All the ancient rib samples presented mean boron values approximately 7 to 23 times higher than the 10.2 mg/Kg reported for modern bone tissue. Levels were highest in inhabitants of the Lluta Valley (235.52 mg/Kg) and Camarones Valley (119.09 mg/Kg), followed by those from the Azapa Valley (69.97 mg/Kg). We conclude that boron overexposure significantly impacted northern Chile's ancient populations, and the discussions of pre-Columbian settlements and biocultural trajectories should consider water quality.

**Keywords:** Andean mummies, contamination, toxicity.

Recibido: 27 julio 2021 | Aceptado: 18 noviembre 2021

## Introducción

En el extremo norte de Chile las fuentes hídricas presentan altos niveles de boro, así en los valles de la zona se observan las siguientes medias de este elemento: Lluta 14 mg/L, Azapa 1 mg/L y Camarones 25 mg/L (Torres y Acevedo, 2008; Ministerio de Obras Públicas [MOP], 2016). Estas concentraciones presentan un potencial riesgo para el ser humano (Ver Tabla 1), aunque actualmente el agua de estos valles se desaliniza y potabiliza debido a la alta cantidad de minerales presentes (Cortes et al., 2011).

La principal vía de ingesta de boro en el ser humano son las fuentes hídricas, sumado a su bioacumulación en los recursos vegetales. Tomando en consideración las grandes concentraciones de boro en las fuentes hídricas que, en algunos sectores hasta el día de hoy, representan un riesgo para la salud, nos preguntamos, ¿hasta qué punto las antiguas poblaciones fueron afectadas por la sobreingesta de boro y cuáles serían las concentraciones de este elemento en huesos humanos arqueológicos? Para responder esta pregunta, analizamos individuos procedentes de siete sitios arqueológicos del norte de Chile (Lluta 54, Az 71, Az 140, Mo 1, Mo 1-6, Cam 8 y Cam 9), con un rango temporal entre el 3000 AC - 1500 DC y que se encuentran almacenados en el Museo Arqueológico San Miguel de Azapa (MASMA) de la Universidad de Tarapacá, en Arica. Estos análisis nos permitirán indagar sobre algunos aspectos de salud y las condiciones medioambientales que afectaron a las antiguas poblaciones de la región, así como también, brindar mayor profundidad temporal a los estudios actuales del norte de Chile, con poblaciones que ocupan los mismos espacios y que continúan consumiendo estas fuentes hídricas.

### Desde el agua a los sistemas bióticos

El boro es un elemento químico común en la naturaleza y sus concentraciones varían dependiendo de la región geográfica (Cöl y Cöl, 2003). Este se libera al ambiente gracias a los sistemas hídricos de escorrentía que participan en los procesos de solubilización y transporte, ingresando al cuerpo humano mediante el consumo de agua y alimentos (Albornoz et al., 2007; Huanca et al., 2018). Respecto a la cantidad de boro asimilado por el consumo hídrico, este dependerá de su disponibilidad en los ríos del norte de Chile. Considerando un consumo diario de dos litros de agua, se estima una ingesta diferenciada de boro en los distintos valles: Lluta 28 mg, Azapa 2 mg y Camarones 50 mg (Torres y Acevedo, 2008; MOP, 2016). En tiempos prehispánicos el agua se consumía directamente de las fuentes locales, lo cual es relevante debido a la ingesta crónica que se genera en comunidades cuya ubicación está determinada por su cercanía a las fuentes hídricas (Muñoz, 2004). De igual manera, podría generarse una bioacumulación por la ingesta de vegetales, en donde plantas como el maíz Lluteño (*Zea mays L.*) aportarían 67,6 mg de boro diarios en base a una dieta de 100 g de este cereal (Bañuelos et al., 1999).

**Tabla 1.** Rangos de concentración de boro en las fuentes de agua actuales asociadas al consumo humano en la Región de Arica y Parinacota.

Valle	Boro (mg/L)	N° de veces sobre la recomendación de 2,4 mg/L (*)	Referencia
Lluta	1-92	0,4-38,3	Campos et al., 2007; Cortes et al., 2011
Lluta	0-22	0-9,2	MOP, 2002
Lluta	0-14,5	0-6,0	MOP, 1994
Lluta	0-89,6	0-37,3	MOP, 1994
Lluta	12,4-16,0	5,2-6,7	Torres y Acevedo, 2008
Azapa	0,6-2,8	0,3-1,2	MOP, 2002
Azapa	1,4-1,9	0,6-0,8	MOP, 1994
Azapa	0-2	0-0,8	MOP, 1997
Azapa	1,0	0,4	Torres y Acevedo, 2008
Camarones	18,8-29,1	7,8-12,1	Ministerio de Agricultura [MINAGRI], 2009
Camarones	13,5-30,0	5,6-12,5	MOP, 2002
Camarones	10,7-89,6	4,5-37,3	MOP, 1994
Camarones	16-31	6,7-12,9	MOP, 2016

(\*) Organización Mundial de la Salud [OMS] 2011.

## Efectos del boro en el ser humano

El boro tiene una gran solubilidad y baja bioacumulación, así el cuerpo humano es capaz de miccionar hasta un 84% de este elemento (Samman et al., 1998). Por esto la OMS sugiere una concentración máxima de boro para el consumo humano de 2,4 mg/L (OMS, 1998).

Los seres humanos necesitan una ingesta media de 0,5 mg/día de boro, con un límite superior de 20 mg/día. Una ingesta más allá de estos valores es potencialmente dañina (Devirian y Volpe, 2003; OMS, 2009), produciendo intoxicación aguda, náuseas, vómitos, diarrea, dermatitis y letargo (Hunt, 1993; Devirian y Volpe, 2003). Más aún, la intoxicación crónica por boro en rangos entre 4-5 g/día produce falta de apetito, náuseas, pérdida de peso y efectos adversos sobre el sistema reproductivo, disminuyendo el volumen seminal, conteo de espermatozoides y motilidad (Schillinger et al., 1982; Hunt, 1993), así como atrofia y esterilidad testicular (Ku et al., 1991).

En un estado de homeostasis, el boro restante se almacena en el organismo y contribuye a minimizar la desmineralización ósea (Nielsen, 1997), reforzando la densidad de los huesos y su formación (Hakki et al., 2010). También se deposita en el cabello en la

zona de la médula y actúa como biomarcador, hallándose que concentraciones  $< 0,85 \mu\text{g/g}$  son normales en muestras contemporáneas (Prejac et al., 2018).

El boro afecta el metabolismo macromineral, y en estado de depleción disminuye la concentración hormonal del hidroxicolecalciferol, lo que reduce la absorción intestinal del calcio. En estado de repleción aumenta la concentración de esta hormona en el suero sanguíneo, favoreciendo la asimilación de calcio (Vielma et al., 2017). Por otro lado, Cortes et al. (2011) señalan que un sobreconsumo de boro produce una relación de parábola positiva entre la actividad seminal y la concentración de este elemento.

### **Boro en la matriz ósea**

En el cuerpo humano este elemento se concentra mayoritariamente en los huesos (Moseman, 1994), participando en la regulación del calcio (Vielma et al., 2017). Si bien los estudios de boro en huesos humanos son escasos, dan cuenta de que en condiciones normales las costillas albergan concentraciones medias de hasta  $10,2 \text{ mg/Kg}$  de boro, aproximadamente 3 veces más de lo que se registra en tejidos blandos (Devirian y Volpe, 2003). Aunque estudios de la década de los 50 relevan valores más altos de boro en costillas, entre  $32\text{-}138 \text{ mg/Kg}$  en ceniza, los cuales equivaldrían a  $19,2\text{-}82,8 \text{ mg/Kg}$  en la matriz ósea (Alexander et al., 1951). Debido a la antigüedad de este estudio, usaremos los niveles más recientes como valores referenciales para investigar si las antiguas poblaciones del extremo norte de Chile estuvieron efectivamente expuestas a altos niveles de boro debido a su abundancia en los recursos hídricos locales.

### **Interacción con el medio**

Diversos estudios han demostrado que la diagénesis es despreciable en muestras bioarqueológicas provenientes del Desierto de Atacama (Byrne et al., 2010; Kakoulli et al., 2014), debido a los altos índices de evapotranspiración en sus suelos, los que minimizan el flujo de iones en el proceso de descomposición orgánica, manteniendo los tejidos de los cuerpos inhumados en un estado permanente de deshidratación o momificación natural. Dado lo anterior, la actividad microbiana en los suelos del norte de Chile es mínima y se debe en gran parte a las condiciones ambientales que incluyen: una alta radiación solar, elevadas temperaturas, suelos salinos y una baja tasa de precipitación anual equivalente a  $1,1 \text{ mm}$  (Bastías et al., 2004; Torres y Acevedo, 2008). La gran cantidad de sales presentes en el suelo de la región impiden la proliferación de microorganismos que degradan el colágeno y por ende, mantienen intacta la matriz ósea de muestras bioarqueológicas (Barrientos et al., 2016), permitiendo llevar a cabo diversos estudios arqueométricos.

## Contexto arqueológico: breve síntesis de los periodos culturales asociado a las muestras estudiadas

### *Periodo Arcaico (3000-1500 AC)*

Durante este periodo, las poblaciones Chinchorro basaron su economía en la caza, pesca y recolección de recursos a lo largo y ancho de la costa del Desierto de Atacama. En particular, se asentaron en espacios cercanos a las desembocaduras de los ríos Lluta, Azapa, Vitor y Camarones. Así, en este entorno desértico extremo y gracias a estos pequeños valles, las poblaciones Chinchorro pudieron contar con un acceso continuo y confiable de agua dulce para su subsistencia diaria, junto a la recolección de plantas y animales terrestres a modo de recursos complementarios (Schiappacasse y Niemeyer, 1984; Arriaza, 1995; Standen et al., 2018).

Estudios isotópicos recientes de carbono (C), nitrógeno (N) y estroncio (Sr) indican que estas poblaciones arcaicas dependían ampliamente de los recursos marinos que recolectaban (King et al., 2018; Standen et al., 2018). La sobre dependencia costera también se ve reflejada en los grandes conchales con acumulaciones de múltiples productos malacológicos e ictiológicos, y la presencia de herramientas y artefactos ligados a la subsistencia costera (arpones, anzuelos, chopes, etc.). Se observan además, algunas patologías asociadas a la continua exposición a aguas frías como exostosis auditiva externa (Standen et al. 1997). Este periodo se destaca también por la presencia de complejas prácticas de momificación artificial en sitios como: Mina Macarena, Maestranza Chinchorro, Morro, Quiani y Camarones, entre otros. Lo anterior implica una movilidad costera y utilización de los recursos marinos, terrestres e hídricos de los diferentes valles. Para este periodo se contó con 67 muestras óseas: 35 del sitio arqueológico Morro 1 y 32 de Morro 1-6, ambos ubicados en la costa, cercanos a la desembocadura del río San José.

### *Periodo Formativo (1000 AC - 500 DC)*

En este periodo las poblaciones costeras se expandieron para ocupar los valles y oasis cercanos, surgiendo los primeros asentamientos aldeanos y los campos de cultivo (Núñez, 1982; Muñoz, 2004; Rivera, 2005). A pesar de este cambio en la subsistencia, las actividades pesqueras no fueron abandonadas, generándose una dieta mixta, como lo demuestran las señales de los isótopos de C y N en los análisis bioantropológicos (King et al., 2018).

Los valles de Lluta y Camarones fueron escasamente poblados, debido en gran parte a la alta salinidad de sus aguas, haciéndolos inadecuados para la incipiente agricultura. Mientras tanto el valle de Azapa tuvo un gran apogeo de población local, cultivándose plantas como maíz (*Zea mays*), ají (*Capsicum* sp.), calabaza (*Lagenaria* sp.), yuca (*Manihot*

*esculenta*) y frijoles (*Phaseolus vulgaris*) (Santoro, 1980; Muñoz, 1985; Díaz y Bastías, 2014). Esto favoreció el desarrollo de nuevas tecnologías como la cerámica y los textiles (Santoro, 1980). Para este periodo se cuenta con seis muestras óseas: cinco del sitio Azapa 71 y una de Azapa 140, los cuales se encuentran a unos 15-16 km de la costa en línea recta, o a unos 12 km desde la entrada del valle de Azapa (Muñoz y Chacama, 2012).

#### *Periodo Medio (500-1000 DC)*

Durante esta etapa continúa el poblamiento del valle de Azapa, superando con creces al de Lluta y Camarones. Las poblaciones locales construyeron sus viviendas utilizando barro y quincha (palos) en las terrazas intermedias y cercanas a las fuentes de agua, desde donde podían canalizarla para regar sus campos de cultivo (Muñoz, 2004). Este periodo también vio una intensificación de las interacciones interregionales con las regiones andinas vecinas y distantes a través del tráfico de caravanas. Para este periodo se cuenta con 95 muestras óseas: 25 del sitio Azapa 71 y 70 muestras de Azapa 140.

#### *Periodo Intermedio Tardío (1000-1450 DC)*

Este periodo se caracteriza por la adopción de estrategias agro-marítimas, donde se explotaban los recursos costeros por pescadores especializados, quienes al igual que sus predecesores, ocuparon las desembocaduras de los ríos (Santoro et al., 2004). Debido al aumento demográfico podemos observar un incremento de la densidad poblacional en los valles de Azapa, Lluta y Camarones, con nuevos asentamientos y campos cultivados con sofisticados sistemas de riego. Esto fue en gran parte el resultado del cultivo intensificado de maíz, que durante este periodo ya se habría adaptado al agua salobre de los valles de Lluta y Camarones (Santoro et al., 2004).

Para el Periodo Intermedio Tardío (PIT) se cuenta con 15 muestras óseas: nueve del sitio Camarones 8, que se encuentra a 1 Km de la costa (Muñoz, 1989) y seis muestras de Azapa 140.

#### *Periodo Tardío (1450-1550 DC)*

Se caracteriza por la presencia inca en la costa, valle y en las tierras altas de la región. Este periodo también trajo consigo la mejora de la tecnología de riego, lo que amplió las áreas cultivables. Las redes de intercambio comercial, entre los diferentes pisos ecológicos, se intensifican gracias al empleo de camélidos como bestias de carga y las múltiples vasijas (ej. aríbalos) para el transporte de agua y bebidas como la chicha.

En resumen, independiente de la calidad de las aguas podemos encontrar asentamientos humanos frente a las costas del norte de Chile durante milenios, en parte porque el ecosistema costero demostró ser una fuente confiable y constante de subsistencia para las poblaciones y debido a los procesos de experimentación en el cultivo de plantas.

Esto último es más notable durante el Periodo Tardío, donde se intensifica la agricultura del maíz en los valles salobres de Lluta y Camarones (García y Santoro, 2014; Muñoz, 2019).

Para el Periodo Tardío (PT) se cuenta con 33 muestras óseas: 16 de Camarones 9 y 17 de Lluta 54 que se encuentran a 1 y a 15 Km de la costa, respectivamente. Para este último sitio no hay fechados de los cuerpos, pero sí hemos fechado muestras de maíz asociado al enterramiento Lluta 54 T13 70, ubicándolo en el año  $1570 \pm 30$  DC, o cal 1460 al 1635 Cal DC ( $2\sigma$ ) (Beta 406996, muestra vegetal,  $\delta^{13}\text{C} = -10.6$ ); fecha que fue calculada usando la curva de calibración terrestre SHCAL13 (Hogg et al., 2013). Por último, es importante mencionar que para el análisis de datos, a pesar de que el sitio Lluta 54 haya sido clasificado dentro del Periodo Intermedio Tardío/Tardío (Horta, 2015), considerando el fechado señalado, sus muestras serán consideradas parte del Periodo Tardío.

## Materiales

Para determinar los niveles de boro se analizaron 216 fragmentos de costillas de individuos de ambos sexos y diferentes edades, provenientes de siete sitios arqueológicos del extremo norte de Chile y de tres valles: Lluta (sitio: Lluta 54), Azapa (sitios: Az 71, Az 140, Mo 1 y Mo 1-6) y Camarones (sitios: Cam 8 y Cam 9) (Ver Figura 1), abarcando desde el Periodo Arcaico al Tardío (Ver Tabla 2).

Los sitios estudiados se encuentran en terrazas o taludes, a una elevación mayor que los ríos aledaños y no presentarían riesgos de inundaciones que contaminaran los cuerpos con boro. Aunque se encuentren cercanos a los recursos hídricos, consideramos que la diferencia de alturas mantendría los cementerios fuera del alcance del agua. Por ejemplo, la mayor diferencia de altura, de al menos 40 metros, ocurre entre los sitios Mo 1 y Mo 1-6 y el lecho del río San José, mientras que la menor diferencia se da entre el sitio Lluta 54 y su río epónimo, con al menos 10 metros.

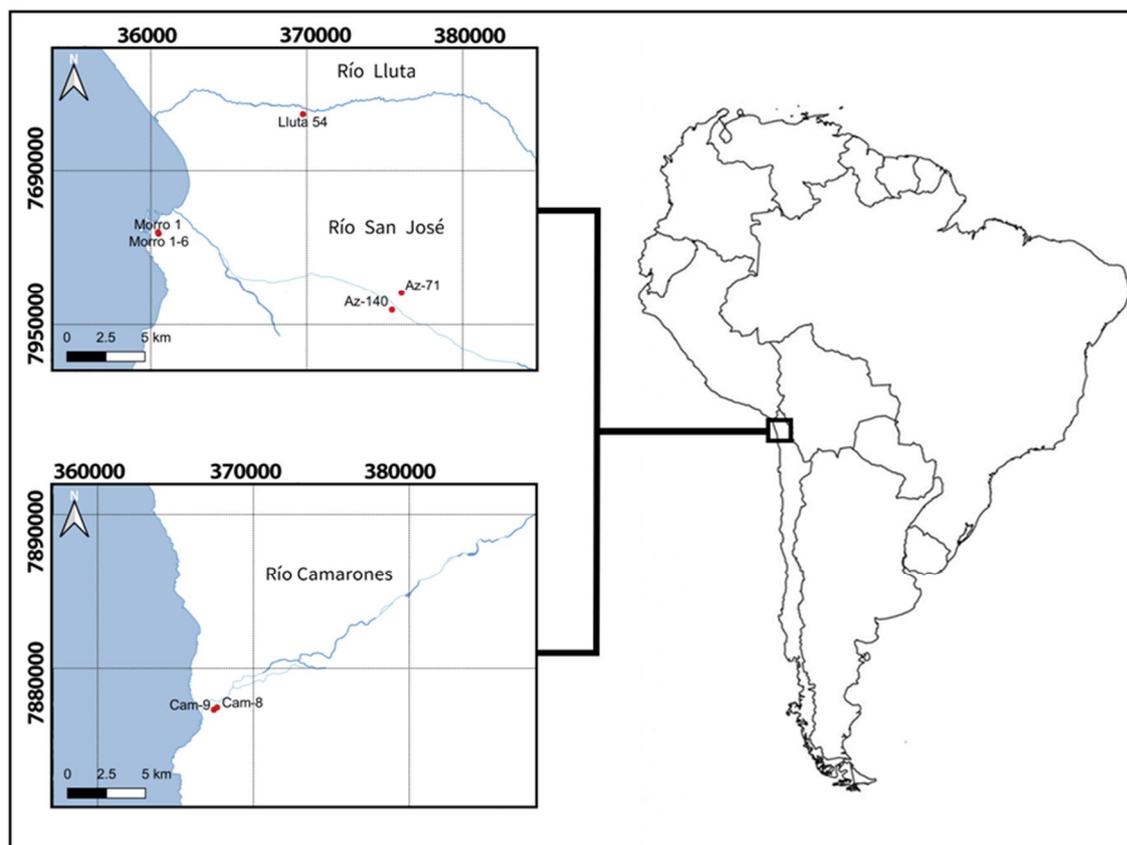


Figura 1. Mapa de la ubicación geográfica de los sitios arqueológicos en estudio y ríos asociados.

Tabla 2. Muestras de costillas arqueológicas analizadas por valle y periodo.

Sitio	Valle	Muestras analizadas	Femenino	Masculino	Indeterminado	Periodo cultural	Periodo
Lluta 54	Lluta	17	4	6	7	Intermedio tardío/Tardío	1000-1450 DC/ 1450-1550 DC
Azapa 71	Azapa	5	3	2	0	Formativo	1000 AC - 500 DC
Azapa 71	Azapa	25	17	8	0	Medio	500-1000 DC
Azapa 140	Azapa	1	1	0	0	Formativo	1000 AC-500 DC
Azapa 140	Azapa	70	38	31	1	Medio	500-1000 DC
Azapa 140	Azapa	6	5	1	0	Intermedio tardío	1000-1450 DC
Morro 1	Azapa	35	17	17	1	Arcaico	3000-1500 AC
Morro 1-6	Azapa	32	16	15	1	Arcaico	3000-1500 AC
Camarones 8	Camarones	9	6	3	0	Intermedio tardío	1000-1450 DC
Camarones 9	Camarones	16	3	11	2	Tardío	1450-1550 DC
	Total	216	110	94	12		

## Metodología

Para contar con un patrón de referencia comparativo se recopilaron, de la literatura especializada, las concentraciones de boro actual en las fuentes de agua de los diferentes valles de la zona norte de Chile (Ver Tabla 1) (MOP, 1994, 1997, 2002, 2016; Campos et al., 2007; Torres y Acevedo, 2008; MINAGRI, 2009; Cortes et al., 2011). Para contextualizar las muestras arqueológicas se utilizó la documentación existente en los archivos del MASMA.

Para la determinación del sexo y la edad se utilizaron características estándares como el dimorfismo sexual de la pelvis y el desarrollo óseo, incluyendo la fusión de las epífisis, morfología del pubis y las características craneanas, entre otros parámetros (Buikstra y Ubelaker, 1994). En general se aplicaron los procedimientos estándar descritos en la literatura (Bass, 1987; Ubelaker, 1999). De igual manera, la determinación de la asociación cultural estuvo basada en los contextos arqueológicos y antecedentes existentes.

Para la determinación de la edad de las muestras estudiadas, en los individuos más jóvenes se observó tanto el desarrollo de la erupción dental y el crecimiento óseo, como la fusión de epífisis y centros de osificación (Scheuer y Black, 2000). Para los adultos, se utilizó la morfología de la sínfisis púbica (Brooks y Suchey, 1990) y la superficie auricular (Lovejoy et al., 1985). En base a lo anterior, el 96 % de las muestras estudiadas provenían de adultos (9 infantes y 207 adultos) que, siguiendo los criterios de Buikstra y Ubelaker (1994), se agruparon en categorías de edad nominales: adolescente (12-20 años), adulto joven (20-35 años), adulto medio (35-50 años) y adulto mayor (> 50 años) (Ver Tabla complementaria 1).

El análisis químico de las muestras bioantropológicas se dividió en las siguientes etapas:

### *a) Limpieza:*

Mecánicamente con un bisturí, se retiró toda señal de material orgánico e inorgánico externo presente en las costillas, dejando la pieza ósea al descubierto cuidando el obtener siempre un mínimo de 1 g de muestra limpia. Posteriormente, estas se fragmentaron y molieron en un mortero de porcelana para su tratamiento químico.

### *b) Digestión:*

En un sistema semi cerrado (vaso precipitado Pyrex de 100 MI) se llevó a ebullición sobre una placa eléctrica de calefacción, una mezcla de disolución de 4 MI de HCl (37% p/p) y 2 MI HNO<sub>3</sub> (65% p/p) más  $1 \pm 1 \times 10^{-4}$  g de muestra de costilla procesada, la que se mantuvo en digestión hasta la disolución total del material óseo. Luego se retiró la fuente de calor hasta reducir la temperatura del sistema equilibrándola con la del medio ambiente a 20-21

grados centígrados. Acto seguido, la muestra se diluyó parcialmente a temperatura ambiente con agua extra pura y se llevó a ebullición. Posteriormente se pasó por un filtro Whatman Grado 10 de 110 mm de diámetro, libre de cenizas e impurezas para ser aforada a 25 ml con agua libre de boro, donde se obtuvo un extracto concentrado con todos los iones presentes en las muestras de costillas, y el elemento boro en su especie soluble: ácido bórico.

*c) Análisis mediante espectrofotometría de absorción molecular:*

En el laboratorio de Investigación Química Analítica Aplicada de la Universidad de Tarapacá, se determinó por duplicado la concentración de boro en los extractos, mediante espectrofotometría de absorción molecular (VIS). Se utilizó el cromóforo derivado de la reacción de Azometina-H y ácido bórico debido a su alta sensibilidad, y a la vez, amplio rango de cuantificación. La lectura se realizó en el instrumento UV-Shimadzu 1800, a una longitud de onda de 420 nm en celdas de poliestireno de 10 mm de largo en paso de luz. La concentración de boro en esta disolución se estableció con la respectiva ecuación y curva de calibración entre en el rango de 1 a 15 mg/L de boro (Rodríguez et al., 2009).

### **Análisis estadístico**

Primero se calcularon los valores  $z$  para las muestras, agrupadas según el valle/río asociado, para excluir los casos atípicos con un valor  $z$  mayor que tres, asegurando trabajar con 99,7% de los datos más representativos. Los valores atípicos corresponden a números extremos y normalmente no se consideran, ya que pueden conducir a errores en la interpretación de los resultados cuando se utilizan modelos estadísticos de comparación en base a una tendencia central. Sin embargo, todos los datos obtenidos se presentan en la Tabla complementaria 1. Luego se realizó un análisis descriptivo de las concentraciones de boro en las muestras de costillas, y un contraste estadístico de medias en la variable sexo con la prueba  $t$  de Student. Además, se realizó un análisis multifactorial (ANOVA) y prueba de Tukey como Post hoc, para determinar las posibles diferencias entre las concentraciones de boro según los distintos valles, periodos y categoría etaria. Estos análisis fueron ejecutados utilizando el *software* SPSS25® y Origin Pro versión 9, considerando un nivel de significancia de  $p \leq 0,05$ .

### **Resultados**

Del total de las muestras de costillas arqueológicas analizadas ( $n = 216$ ), cinco casos del sitio Azapa 140 presentaron valores atípicos (Ver Tabla complementaria 1). El 100% de las costillas estudiadas presentaron valores mayores a los 10,2 mg/Kg de boro reportado como referencia para muestras óseas de poblaciones modernas (Devirian y Volpe, 2003), y en promedio una bioacumulación de 8,74 veces más de boro que lo recomendado. Las costillas

arqueológicas de los casos válidos, presentaron una media de 89,13 mg/Kg (Mín.: 17,35; Máx.: 425,10) por individuo (Ver Tabla 3 y Tabla complementaria 1).

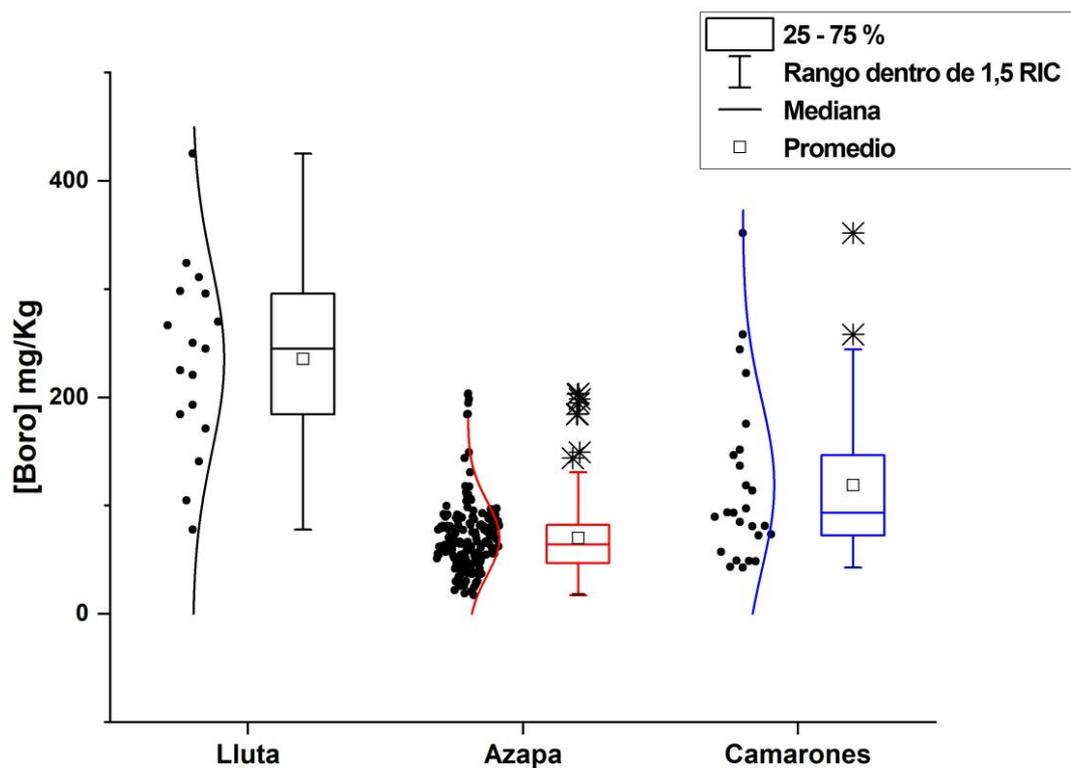
Utilizando los datos de la distribución de boro en las costillas arqueológicas, sin los valores atípicos, y analizando los datos de forma agrupada, se obtiene una media de 84,91 mg/Kg para los individuos de sexo femenino (D.E.: 66,72; Mín.: 18,85; Máx.: 425,10) y de 83,13 mg/Kg para los masculinos (D.E.: 50,49; Mín.: 17,35; Máx.: 324,10). La prueba t de Student para estos datos agrupados no presentó diferencias significativas entre los sexos,  $t(197) = 0,210$ ;  $p = 0,834$ ; IC95% [-14,94; 18,50]. De igual manera al observar y comparar la distribución de boro entre hombres y mujeres en cada sitio arqueológico, no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ; Tabla 4).

El análisis ANOVA de los valles estudiados, en función de la concentración de boro en las muestras de costillas, mostró diferencias significativas,  $F(2; 208) = 101,15$ ;  $p = 0,001$ . La prueba Post hoc de Tukey indica que las muestras provenientes de los tres valles del norte de Chile (Lluta, Azapa y Camarones) fueron significativamente diferentes entre sí ( $p \leq 0,001$ ). El valle de Lluta presentó la media más alta (235,52 mg/Kg), seguido por el valle de Camarones (119,09 mg/Kg) y luego el valle de Azapa (69,97 mg/Kg) (Ver Tabla 3 y Figura 2).

**Tabla 3.** Concentración de boro (mg/Kg) en costillas de momias, clasificadas por valle, sin valores atípicos (n=5).

Valle	n	Media	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Veces sobre la recomendación †
Lluta	17	235,52	245,00	86,33	78,00	425,10	23,09
Azapa	169	69,97	64,03	34,15	17,35	203,41	6,86
Camarones	25	119,09	93,24	78,06	42,98	351,94	11,68
Total	211	89,13	70,33	65,83	17,35	425,10	8,74

† Media normal en costillas contemporáneas < 10,2 mg/Kg (Devirian y Volpe, 2003).



**Figura 2.** Gráfico de caja y bigotes de la concentración (mg/Kg) de boro en las muestras de costillas por valle estudiado con ajuste de distribución normal.

Lluta (n = 17), Azapa (n = 169) y Camarones (n = 25) son las tres principales áreas de donde provienen los restos bioantropológicos. Las cajas indican los cuartiles entre el 25% y 75% en relación con la mediana. Los bigotes representan el rango de las concentraciones de boro dentro de 1,5 RIC (rango intercuartílico). Los puntos a la izquierda de las cajas representan los datos y los asteriscos sobre los bigotes los valores atípicos generados en la nueva distribución. El pequeño cuadrado dentro de la caja representa la media.

**Tabla 4.** Comparación de la concentración de boro (mg/Kg) en función del sitio y sexo, y sin considerar valores atípicos (n=5).

Sitio	Sexo	n	Media	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Valor prueba t	p (dos colas)
Lluta 54	Masculino	6	198,7	188,75	77,82	104,7	324,1	1,56	0,16
	Femenino	4	284,35	245,85	96,11	220,6	425,1		
	MFI*	17	235,52	245	86,33	78	425,1		
Azapa 71	Masculino	10	53,16	43,61	26,3	20,65	98,56	0,16	0,88
	Femenino	20	54,59	48,49	22,44	18,85	110,12		
	MFI	30	54,11	45,27	23,34	18,85	110,12		
Azapa 140	Masculino	31	70,52	65,51	37,75	17,35	202,95	0,58	0,56
	Femenino	40	76,7	59,15	48,69	24,58	203,41		
	MFI	72	74,25	65	43,8	17,35	203,41		
Morro 1	Masculino	17	75,45	76,94	15,08	54,63	112,37	0,35	0,73
	Femenino	17	73	71,07	24,55	36,2	130,73		
	MFI	35	73,8	71,81	19,96	36,2	130,73		
Morro 1-6	Masculino	15	76,67	77,83	19,71	41,76	118,1	1,37	0,18
	Femenino	16	64,08	56,85	30,1	21,9	143,77		
	MFI	32	71,03	65,88	26,01	21,9	143,77		
Camarones 8	Masculino	3	184,06	175,66	70,08	118,56	257,96	0,16	0,87
	Femenino	6	194,43	179,52	97,29	97,39	351,94		
	MFI	9	190,97	175,66	84,68	97,39	351,94		
Camarones 9	Masculino	11	76,07	73,58	30,93	43,6	151,58	0,61	0,55
	Femenino	3	90,23	81,11	52,41	42,98	146,61		
	MFI	16	78,66	77,22	32,88	42,98	151,58		

\*MFI: Masculino + Femenino + Casos indeterminados.

En relación con los periodos estudiados, la prueba ANOVA en función de la concentración de boro en las costillas, identificó diferencias significativas,  $F(4; 206) = 26,867$ ;  $p = 0,001$ , y la prueba Post hoc de Tukey agrupó los datos en dos grupos. En el primero encontramos las muestras del periodo Intermedio Tardío y Tardío las cuales fueron semejantes entre sí ( $p = 0,999$ ) y son significativamente diferentes al Arcaico, Formativo y Medio, con un  $p \leq 0,001$ . En el segundo conjunto se agruparon las muestras de los periodos Arcaico, Formativo y Medio, las cuales no presentaron diferencias entre sí ( $p > 0,05$ ; Tabla 5).

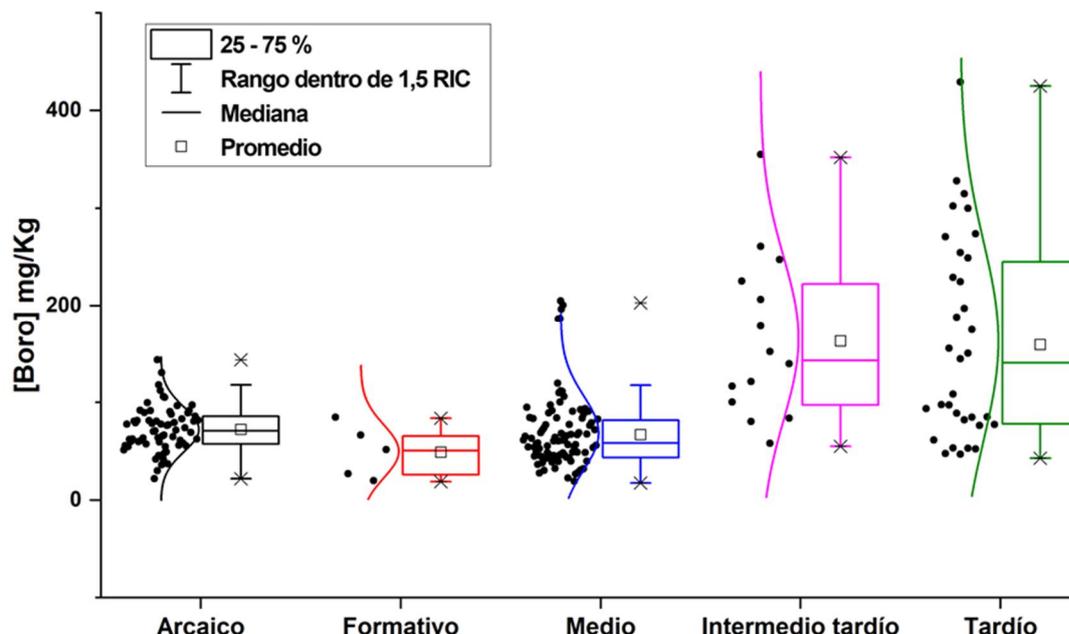
Al comparar los individuos según temporalidad y sexo, no se observaron diferencias significativas en los niveles de boro entre hombres y mujeres en ninguno de los períodos estudiados, lo que se demuestra mediante la prueba t de Student (Ver Tabla 5).

**Tabla 5.** Concentración de boro (mg/Kg) en costillas de momias, clasificadas por periodo, sin valores atípicos (n=5).

Periodo	Sexo	n	Media	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Veces sobre la recomendación†	Valor prueba t	p (dos colas)
Arcaico	Masculino	32	76,02	77,38	17,12	41,76	118,1	7,45	1,29	0,2
	Femenino	33	68,68	64,04	27,32	21,9	143,77	6,73		
	MFI*	67	72,47	71,07	22,91	21,9	143,77	7,1		
Formativo	Masculino	2	54,83	54,83	40,91	25,9	83,76	5,38	0,35	0,75
	Femenino	3	45,09	50,83	23,89	18,85	65,59	4,42		
	MFI	5	48,99	50,83	27,06	18,85	83,76	4,8		
Medio	Masculino	38	66,59	60,35	36,46	17,35	202,95	6,53	0,02	0,99
	Femenino	53	66,71	54,09	39,36	24,58	198,54	6,54		
	MFI	92	66,94	58,63	37,85	17,35	202,95	6,56		
Intermedio tardío	Masculino	4	157,41	147,11	78,2	77,45	257,96	15,43	0,16	0,88
	Femenino	10	165,53	143,02	90,3	55,16	351,94	16,23		
	MFI	14	163,21	143,02	84,09	55,16	351,94	16		
Tardío	Masculino	17	119,35	89,77	78,35	43,6	324,1	11,7	1,93	0,07
	Femenino	7	201,16	220,6	127,67	42,98	425,1	19,72		
	MFI	33	159,46	140,9	102,82	42,98	425,1	15,63		
	Total	211	89,13	70,33	65,83	17,35	425,1	8,74		

†Media normal en costillas contemporáneas < 10,2 mg/Kg (Devirian y Volpe, 2003).

\*MFI: Masculino + Femenino + Casos indeterminados.



**Figura 3.** Gráfico de caja y bigotes de la concentración (mg/Kg) de boro en las muestras de costillas por periodo estudiado. Las cajas indican los cuartiles entre el 25% y 75% en relación con la mediana. Los bigotes representan el rango de las concentraciones de boro dentro de 1,5 RIC (rango intercuartílico). Los puntos a la izquierda de las cajas representan los datos y los asteriscos sobre los bigotes los valores atípicos generados en la nueva distribución. El pequeño cuadrado dentro de la caja representa la media.

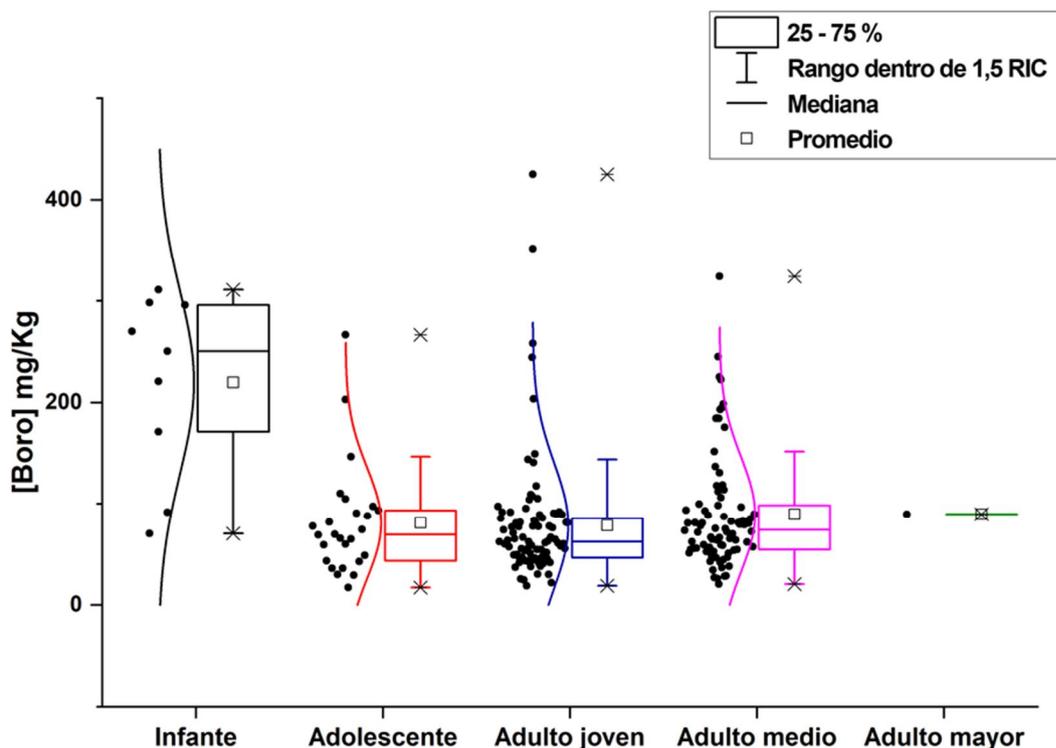
Al comparar los niveles de boro según las categorías de edad de los individuos, la prueba ANOVA indica que hay diferencias significativas entre los grupos etarios  $F(3; 206) = 15,38; p = 0,001$  (Ver Tabla 6 y Figura 4). La prueba de Post hoc de Tukey muestra diferencias significativas entre el grupo Infante ( $p < 0,001$ ) y todas las categorías etarias subsiguientes. Estos grupos (Adolescente, Adulto joven, y Adulto medio) no presentan diferencias entre sí ( $p > 0,05$ ). El grupo Adulto mayor no cumplió con el n mínimo para ser parte del análisis ANOVA.

**Tabla 6.** Concentración de boro (mg/Kg) en costillas de momias, clasificadas por edad, sin valores atípicos (n=5).

Categoría edad	n	Media	Mediana	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	Veces sobre la recomendación†
Infante (0-3 años)	9	219,87	250,50	89,99	70,33	310,90	21,55
Adolescente (12-20 años)	26	81,08	69,49	54,61	17,35	266,70	7,95
Adulto joven (20-35 años)	93	78,26	62,34	61,24	18,85	425,10	7,67
Adulto medio (35-50 años)	82	89,65	74,31	56,58	20,65	324,10	8,79
Adulto mayor (> 50 años)	1	89,53	89,53	-	-	-	8,78
Total	211	89,13	70,33	65,83	17,35	425,10	8,74

† Media normal en costillas contemporáneas < 10,2 mg/Kg (Devirian y Volpe, 2003).

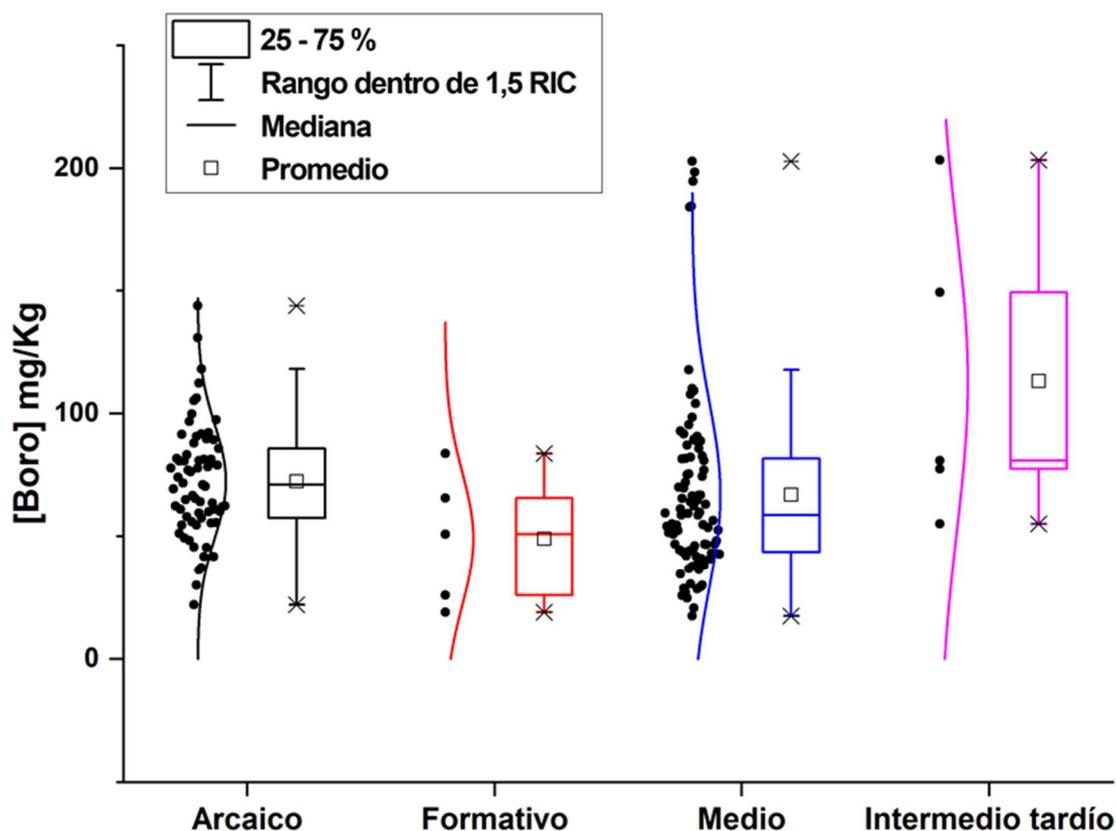
Al realizar un análisis ANOVA considerando período y edad, no se observaron diferencias significativas  $F(10; 192) = 0,374; p = 0,957$ .



**Figura 4.** Gráfico de caja y bigotes de la concentración (mg/Kg) de boro en las muestras de costillas por categorías de edades.

Las cajas indican los cuartiles entre el 25% y 75% en relación con la mediana. Los bigotes representan el rango de las concentraciones de boro dentro de 1,5 RIC (rango intercuartílico). Los puntos a la izquierda de las cajas representan los datos y los asteriscos sobre los bigotes los valores atípicos generados en la nueva distribución. El pequeño cuadrado dentro de la caja representa la media.

Tomando en consideración la gran cantidad de muestras procedentes del valle de Azapa ( $n = 169$ ), estudiamos la distribución de boro en las costillas de los distintos periodos temporales de este valle (Ver Figura 5). La prueba ANOVA no mostró diferencias significativas entre los periodos estudiados (Arcaico, Formativo, Medio e Intermedio tardío),  $F(12; 156) = 1,45; p = 0,148$ .



**Figura 5.** Gráfico de caja y bigotes de la concentración (mg/Kg) de boro en las muestras de costillas provenientes del valle de Azapa por periodo.

Las cajas indican los cuartiles entre el 25% y 75% en relación con la mediana. Los bigotes representan el rango de las concentraciones de boro dentro de 1,5 RIC (rango intercuartílico). Los puntos a la izquierda de las cajas representan los datos y los asteriscos sobre los bigotes los valores atípicos generados en la nueva distribución. El pequeño cuadrado dentro de la caja representa la media.

## Discusión

Respecto a la influencia de la carga macro mineral que ejerció el boro en la vida de los individuos, podemos destacar que todas las costillas analizadas presentaron valores más altos que los 10,2 mg/Kg reportados como normales para la matriz ósea (Devirian y Volpe, 2003). Algunas muestras bioantropológicas estudiadas de los sitios de Arica y Camarones, presentaron hasta 42 veces más boro que el valor referencial ya señalado (Ver Tabla 4 y Tabla complementaria 1).

Es interesante que, al comparar los niveles de boro en las muestras óseas agrupadas en función del sexo, y según los sitios y periodos estudiados, no se encontraron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ; Tablas 4 y 5). Esto nos permite inferir que independiente de la carga mineral de boro que pudieran traer los ríos, sus aguas afectaban tanto a hombres como a mujeres a lo largo de los diferentes momentos de ocupación.

En promedio las poblaciones del norte de Chile fueron afectados 8,7 veces más que lo esperado (Ver Tabla 3), y al comparar las antiguas poblaciones por valle, resulta que las inhumadas en Lluta y Camarones presentan valores promedios de boro más altos en sus huesos (235,52 mg/Kg y 119,09 mg/Kg, respectivamente), que aquellas asociadas o que dependían de las aguas del río San José (69,97 mg/Kg). Dicho de otra manera, podemos resaltar que las poblaciones de Lluta y Camarones presentan evidencia de haber bioacumulado en promedio entre 1,7 a 3,4 veces más boro que aquellas que se asentaron en el valle de Azapa, cuyas aguas son de mejor calidad. Esto es concordante con los mayores niveles de boro presentes en las aguas de Camarones y Lluta, lo que es un reflejo de su ingesta en la antigüedad (Ver Tabla 3 y Figura 2).

Al comparar las muestras de costillas del valle de Azapa, que contienen la mayoría de los periodos culturales estudiados, la distribución de boro en las muestras óseas analizadas no mostró diferencias significativas entre los distintos periodos y poblaciones que lo ocuparon. Esto probablemente porque en vida consumieron las mismas fuentes de agua del río San José. Sin embargo, se observa un amplio rango de consumo de boro en sus huesos, con un mínimo de 17,35 mg/Kg y un máximo de 203,41 mg/Kg.

Esta relación entre la ocupación de los diferentes valles también presentaría un posible correlato de acuerdo a los diferentes periodos culturales. Según Álvarez (2014), las poblaciones bajo la esfera *Tiwanaku* eligieron valles como Tambo, Moquegua, Caplina-Tacna, Azapa y Chaca-Codpa, que presentan aguas de mejor calidad, mientras que los incas, en contraste, preferían los valles más salados de Locumba, Sama, Lluta, Camarones y Loa porque proporcionan agua durante todo el año para sus cultivos a base de maíz. No obstante, cabe señalar que actualmente no se considera que *Tiwanaku* tuviera un control directo en estos valles (Korpisaari y Chacama, 2015; Ogalde, 2019). Y algunas tradiciones alfareras presentes en Arica (Cabuzá), originalmente atribuidas al estilo *Tiwanaku*, serían posteriores al colapso de este estado altiplánico (Ogalde, 2019).

Los datos obtenidos en el presente estudio concuerdan con lo reportado en Arriaza et al. (2020) quienes, analizando muestras de cabellos de los mismos valles utilizando *Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS), hallan concentraciones de 1,5 a 4 veces más altas que lo considerado normal para boro en esta matriz pilosa (0,85 µg/g). En el estudio citado, el valle de Lluta presentó la mayor concentración (3,36 µg/g), seguido de Azapa (1,49 µg/g) y luego Camarones (1,37 µg/g), desafortunadamente los casos analizados con anterioridad, no corresponden en su totalidad a los estudiados en costilla, producto de la disponibilidad de muestras.

Al analizar los datos obtenidos en costillas según su temporalidad, todas las poblaciones de Arica y Camarones resultaron positivas para la presencia de boro, ya fueran las primeras poblaciones Chinchorro (3000-1500 AC) como se observa en los sitios Mo 1 y

Mo 1-6, o aquellas asociadas al PT (ca. 1450-1550 DC) provenientes de los sitios Lluta 54 y Cam 9 (Ver Tabla 5 y Figura 3). No obstante, es destacable la situación detectada en el PIT (Media: 163,21 mg/Kg), donde los valores de boro se incrementan en comparación a los demás periodos (Rango medias: 48,99-159,46 mg/Kg). Es probable que los altos valores de boro que hemos observado en los huesos de las poblaciones del PIT y PT se asocien además a la explotación de plantas como el maíz, que se adaptaron para tolerar condiciones salinas extremas (Díaz y Bastías, 2014), resultando una nueva vía de ingesta de este elemento, en las poblaciones estudiadas.

Otra vía de ingesta de maíz muy relevante durante los periodos PIT y PT es la incorporación de este en forma de bebidas fermentadas como la chicha, brebaje que formaba parte de la ritualidad de estas poblaciones (Arriaza et al., 2015). La preparación de la chicha requirió de las aguas locales, lo cual generaría una acumulación de boro por dos vías, una nutricional proveniente del maíz propiamente tal, y otra por la calidad del agua.

Analizando otro aspecto como la edad, los infantes presentaron mayores niveles de boro en sus costillas (Media: 219,87 mg/Kg) que en las otras categorías de edad (Ver Tabla 6 y Figura 4), lo que se refleja en las pruebas ANOVA y Post hoc de Tukey, que separan a los infantes de los demás grupos etarios. Es posible que la alta acumulación en los infantes se deba al consumo de leche materna, la cual puede ser considerada un reservorio de boro natural, aumentando su bioacumulación producto de la lactancia (Harari et al., 2012). Por otro lado, es interesante señalar que King et al. (2018) indican que alrededor de la fase de destete los infantes están siendo alimentados con una especie de papilla a base de maíz, lo que también contribuiría en incrementar los niveles de boro en este grupo etario.

La alta ingesta de boro de forma cotidiana, proveniente de las aguas naturalmente contaminadas y/o de recursos alimenticios de origen vegetal (bioacumuladores), debe haber generado una intoxicación silenciosa en los pobladores de esta región. Considerando que los individuos estudiados presentan valores de boro en la matriz ósea entre 7 a 23 veces más que lo recomendado, su calidad de vida debió haber generado diversos problemas gastrointestinales recurrentes, como también efectos adversos sobre el sistema reproductivo.

Los efectos de un sobreconsumo de boro debieron haber afectado a aquellas personas más susceptibles y a las primeras poblaciones que comienzan a asentarse en zonas con alto contenido de este elemento. La continua ocupación de estos espacios con aguas ricas en boro, hipotéticamente debió haber generado una tolerancia a este elemento tal como se manifiesta en plantas como el maíz, que son capaces de resistir altos niveles de boro sin afectar su desarrollo (Torres y Acevedo, 2008; Díaz y Bastías, 2014). Por último, las dinámicas sociales y su velocidad de cambio, también deben ser analizadas en relación con la calidad de los recursos hídricos disponibles y a la bioadaptación, tanto de las plantas como de las poblaciones que se asentaron en estos valles transversales.

En resumen, se observan variaciones importantes en los individuos que ocuparon los distintos valles, producto de la contaminación natural existente o por la movilidad de los individuos. Futuros estudios deberán profundizar si las poblaciones ancestrales que habitaron los valles de Lluta y Camarones presentan algunas malformaciones que pudiesen ser atribuibles a un sobreconsumo de boro, considerando que estudios experimentales en animales en gestación alimentados con dosis  $> 13$  mg/Kg señalan la presencia de malformaciones en costillas y agénesis de algunas de estas (OMS, 2009).

## Conclusiones

Es interesante que, al ser este uno de los primeros estudios de boro en muestras óseas de individuos precolombinos, todas las muestras bioarqueológicas analizadas -independiente de su ubicación geográfica y cronológica-, presentan altos niveles de boro. En los casos más extremos como en el valle de Lluta, los restos óseos reflejan una bioacumulación de este elemento que excede hasta 42 veces lo considerado normal en la actualidad para los huesos. Esta evidencia resulta sumamente llamativa, si consideramos que el cuerpo excreta en la orina hasta un 84% del contenido del boro, que con una ingesta normal mantiene una alta solubilidad y baja bioacumulación.

Estos datos nos permiten inferir que la cantidad de boro ingerido por las antiguas poblaciones que se establecieron en los valles del norte de Chile era excesiva y recurrente. Este sobreconsumo, producto de la ingesta de aguas naturalmente contaminadas con boro y en menor medida aumentada por la dieta vegetal consumida (bioacumuladores), contribuyó a crear una firma química permanente en los huesos de los antiguos pobladores precolombinos. Esta ingesta se ve reflejada en diferentes matrices analíticas, con una bioacumulación ósea promedio que supera entre 7 a 23 veces lo reportado como normal en poblaciones actuales (Devirian y Volpe, 2003). Estudios realizados en 144 muestras de cabello en poblaciones arqueológicas de la misma región (3000 AC - 1500 DC), obtuvieron una concentración de boro de 1,5 a 4 veces más alta que la normal en este tipo de muestras (Arriaza et al., 2020).

Los altos valores de boro a nivel osteológico reflejan un ambiente rico en dicho elemento, proveniente del agua de bebida, así como de sus alimentos de origen vegetal, los que son en cierta forma endémicos, propios de cada valle rico en boro. El consumo cotidiano de este mineral en la dieta, mediante el agua contaminada y/o de plantas que lo bioacumulaban, probablemente afectó la calidad de vida de las poblaciones del norte de Chile, generando diversos cuadros de intoxicación y problemas gastrointestinales (ej. náuseas, vómitos, diarrea). Además, pudo generar efectos adversos sobre el sistema reproductivo, especialmente en aquellas personas más susceptibles, y en las primeras poblaciones que comienzan a asentarse en zonas con alto contenido de boro. Es decir, las

dinámicas sociales y su velocidad de cambio también deben ser analizadas en relación con la calidad de los recursos disponibles y a la bioadaptación, tanto de las plantas como de las poblaciones que se asentaron en estos valles transversales. La continua ocupación de estos espacios con aguas salobres, hipotéticamente debió haber retardado el proceso de domesticación de plantas y posteriormente, generado una tolerancia a este elemento, tal como se manifiesta en cultivos como el maíz, que son capaces de resistir altos niveles de boro sin afectar su desarrollo (Torres y Acevedo, 2008; Díaz y Bastías, 2014). Si bien todas las poblaciones estuvieron expuestas al exceso de boro de forma natural, la domesticación de plantas y consumo de maíz durante el PIT y PT, ya fuera producto de la dieta o de ritualidad (chicha), conllevó a un aumento de la ingesta de boro.

Por último, cabe señalar que la sobreingesta de múltiples elementos como boro, arsénico y litio, entre otros (Arriaza et al., 2010; Bartkus et al., 2011; Blumenstiel et al., 2020) debe haber producido cambios fisiopatológicos importantes en el organismo de los individuos que habitaron esta zona, y que en última instancia, debe haber afectado la morbilidad y mortalidad de las antiguas poblaciones según los valles y los recursos hídricos utilizados. Esta policontaminación natural también podría verse reflejada en las elevadas tasas de mortalidad en niños y en las múltiples lesiones que a menudo se observan, como la presencia de cribas orbitarias, hiperostosis poróticas o líneas hipoplásicas (Brito, 2020). Futuros estudios deberán explorar esta posible correlación entre la policontaminación natural y las diversas osteopatologías o marcadores generales de salud ósea y dental. Además, se debería investigar la posible existencia de marcadores genéticos que podrían ayudar a la eliminación del boro, de forma similar a lo que ocurre con la tolerancia para el arsénico, donde poblaciones sometidas al hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE) presentan una mayor tolerancia al arsénico y mínimos cuadros epidemiológicos (Bundschuh et al., 2012; Apata et al. 2017).

En síntesis, los análisis químicos de los huesos arqueológicos y esta bioarqueología de lo invisible aportan datos novedosos para debatir las consecuencias de la vida en el desierto, la dieta y los procesos de adaptación a los que se vieron enfrentadas las antiguas poblaciones que ocuparon diversos ambientes eco-tóxicos del Desierto de Atacama. Una contaminación silenciosa pero importante que afectó a las antiguas poblaciones del extremo norte de Chile que consumieron recursos hídricos naturalmente contaminados con boro y otros minerales (Arriaza et al., 2010; Bartkus et al., 2011; Blumenstiel et al., 2020). La explosión demográfica en los diversos valles de la zona norte también conlleva un correlato con la adaptación de las plantas a las aguas salobres, sobre todo con la introducción del maíz en los valles salados. Esta sobreexposición endémica a diversos minerales comenzó hace más de 5000 años y desafortunadamente continúa hasta el día de hoy en algunos sectores, donde el consumo de agua con altas concentraciones de boro y otros minerales todavía se encuentra presente en el agua potable de la zona norte de Chile, observándose un rango actual de boro

que fluctúa entre los 0,22-11,3 mg/L, con una mediana de 2,9 mg/L (Cortes et al., 2011). Más aún, los datos bioantropológicos obtenidos son concordantes con la ocupación y demografía actual de estos valles, donde la mayor densidad poblacional se presenta en Arica, que posee mejor calidad de agua, mientras que los valles de Lluta y Camarones, con aguas más salobres, presentan menor densidad poblacional.

## Agradecimientos

Se agradece el financiamiento del Proyecto Fondecyt 1170120 y al Museo Arqueológico San Miguel de Azapa de la Universidad por autorizar el estudio de sus colecciones bioantropológicas.

## Referencias citadas

- Albornoz, F., Torres, A., Tapia, M. L. y Acevedo, E. (2007). Hydroponic tomato (*Lycopersicon esculentum* mill.) crop with desalted and deborified water in Lluta valley. *Idesia (Arica)*, 25(2), 73-80. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292007000200010>
- Alexander, G., Nusbaum, R. y MacDonald, N. (1951). The boron and lithium content of human bones. *Journal of Biological Chemistry*, 192(2), 489-496. <https://doi.org/jfnj>
- Álvarez, L. (2014). Etnopercepción andina: valles dulces y valles salados en la vertiente occidental de los Andes. *Diálogo Andino*, (44), 5-14. <https://doi.org/jfnh>
- Apata, M., Arriaza, B., Llop, E., Moraga, M. (2017). Human adaptation to arsenic in Andean populations of the Atacama Desert. *American Journal of Physical Anthropology*, 163(1), 192-199. <https://doi.org/10.1002/ajpa.23193>
- Arriaza, B. (1995). *Beyond death. The Chinchorro mummies of ancient Chile*. Smithsonian Institution Press. <https://bit.ly/3CyeFMx>
- Arriaza, B., Amarasiriwardena, D., Cornejo, L., Standen, V., Byrne, S., Bartkus, L. y Bandak, B. (2010). Exploring chronic arsenic poisoning in pre-Columbian Chilean mummies. *Journal of Archaeological Science*, 37(6), 1274-1278. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.12.030>
- Arriaza, B., Blumenstiel, D., Amarasiriwardena, D., Standen, V. y Vizcarra, A. (2020). Five thousand years of bellyaches: Exploring boron concentration in ancient populations of the Atacama Desert. *American Journal of Physical Anthropology*, 174(2), 254-267. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24155>
- Arriaza, B., Ogalde, J., Chacama, J., Standen, V., Huamán, L. y Villanueva, F. (2015). Estudio de almidones en queros de madera del norte de Chile relacionados con el consumo de chicha durante el Horizonte Inca. *Estudios Atacameños*, (50), 59-84. <https://doi.org/jfng>

- Bañuelos, G. S., Ajwa, H. A., Caceres, L. y Dyer, D. (1999). Germination responses and boron accumulation in germplasm from Chile and USA grown with boron enriched water. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 43(1), 62-67. <https://doi.org/dsbw8q>
- Bartkus, L., Amarasiriwardena, D., Arriaza, B., Bellis, D. y Yáñez, J. (2011). Exploring lead exposure in ancient Chilean mummies hair by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS). *Microchemical Journal*, 98(2), 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.02.008>
- Barrientos, G., Sarmiento, P. y Galligani, P. (2016). Evaluación de la diagénesis ósea mediante el uso de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB): Aproximaciones analíticas aplicables a muestras arqueológicas. *Revista Argentina de Antropología Biológica*, 18(2), 1-13. <https://bit.ly/3SFKOXZ>
- Bass, W. (1987). *Human osteology: A laboratory and field manual* (3a ed.). Missouri Archaeological Society.
- Bastías, E., González-Moro, M. B. y González-Murua, C. (2004). *Zea mays* L. amylacea from the Lluta Valley (Arica-Chile) tolerates salinity stress when high levels of boron are available. *Plant Soil*, 267, 73-84. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-4292-y>
- Blumenstiel, D., McDonald, M., Arriaza, B. y Amarasiriwardena, D. (2020). Exposure to geogenic lithium in ancient Andeans: unraveling Li in mummy hair using LA-ICP-MS. *Journal of Archaeological Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.105062>
- Brito, Y. (2020). *Análisis bioarqueológico de los infantes provenientes de los sitios Camarones 8 y Camarones 9 y su relación con la contaminación medioambiental* [Tesis de pregrado no publicada]. Universidad de Tarapacá.
- Brooks, S. y Suchey, J. (1990). Skeletal age determination based on the os pubis: A comparison of the Acsádi-Nemeskéri and Suchey-Brooks methods. *Human Evolution*, 5, 227-238. <https://doi.org/10.1007/BF02437238>
- Buikstra, J. E. y Ubelaker, D. H. (1994). *Standards for data collection from human skeletal Remains*. Arkansas Archeological Survey.
- Bundschuh, J., Litter, M., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H., Jean, J., Liu, C., López, D., Armienta, M., Guilherme, L., Gomez, A., Cornejo, L., Cumbal, L. y Toujaguez, R. (2012). One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries. *Science of the Total Environment*, 429, 2-35. <https://doi.org/c7c2hw>
- Byrne, S., Amarasiriwardena, D., Bandak, B., Bartkus, L., Kane, J., Jones, J., Yáñez, J., Arriaza, B. y Cornejo, L. (2010). Were Chinchorros exposed to arsenic? Arsenic determination in Chinchorro mummies' hair by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Microchemical Journal*, 94(1), 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.08.006>

- Campos, H., Díaz, G. y Campos, C. (2007). Aportes sedimentarios de los ríos Lluta y San José en la zona costera de la rada de Arica, Chile. *Idesia (Arica)*, 25(2), 37-48. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292007000200005>
- Cöl, M. y Cöl, C. (2003). Environmental boron contamination in waters of Hisarcik area in the Kutahya Province of Turkey. *Food and Chemical Toxicology*, 41(10), 1417-1420. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(03\)00160-1](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(03)00160-1)
- Cortes, S., Reynaga-Delgado, E., Sancha, A. M. y Ferreccio, C. (2011). Boron exposure assessment using drinking water and urine in the North of Chile. *Science of the Total Environment*, 410-411, 96-101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.073>
- Devirian, T. y Volpe, S. (2003). The Physiological effects of dietary boron. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 43(2), 219-231. <https://doi.org/10.1080/10408690390826491>
- Díaz, A. y Bastías, E. (2014). *Historia de los cultivos del maíz en un valle salado*. Universidad de Tarapacá.
- García, M. y Santoro, C. (2014). El maíz arqueológico como patrimonio genético y cultural del valle de Lluta. En A. Díaz y E. Bastías (Eds.), *Historia de los cultivos del maíz en un valle salado norte de Chile* (pp. 19-28). Universidad de Tarapacá. <https://bit.ly/3EfJAyo>
- Hakki, S. S., Bozkurt, B. S. y Hakki, E. E. (2010). Boron regulates mineralized tissue-associated proteins in osteoblasts (MC3T3-E1). *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 24(4), 243-250. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2010.03.003>
- Harari, F., Roncob, A. M., Concha, G., Llanos, M., Grandér, M., Castro, F., Nermell, B. P. y Vahter, M. (2012). Early-life exposure to lithium and boron from drinking water. *Reproductive Toxicology*, 34(4), 552-560. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2012.08.009>
- Hogg, A., Hua, Q., Blackwell, P., Niu, M., Buck, C., Guilderson, T., Heaton, T., Palmer, J., Reimer, P., Reimer, R., Turney, C. y Zimmerman, S. (2013). SHCal13 Southern Hemisphere Calibration, 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon*, 55(4), 1889-1903. [https://doi.org/10.2458/azu\\_js\\_rc.55.16783](https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16783)
- Horta, H. (2015). El señorío Arica y los reinos altiplánicos (1.000-1.540 d.C.). Complementariedad ecológica y multiétnicidad durante los siglos pre-conquista en el norte de Chile. Quillqa.
- Huanca, M., Arias, R., Cárdenas, S., Rojas, M., Sepúlveda, G., Caris, J., Caris-Maldonado, J., Bastías, E. y Maracaja-Coutinho, V. (2018). Long non-coding RNAs responsive to salt and boron stress in the hyper-arid lluteño maize from Atacama Desert. *Genes (Basel)*, 9(3), 170. <https://doi.org/10.3390/genes9030170>
- Hunt, C. (1993). Boron. En R. Macrae, K. Robinson y M. J. Sadler (Eds.), *Encyclopedia of food science, food technology and nutrition* (pp. 440-447). Academic Press.

- Kakoulli, I., Prikhodko, S. V., Fischer, C., Cilluffo, M., Uribe, M., Bechtel, H. A., Fakra, S. C. y Marcus, M. A. (2014). Distribution and chemical speciation of arsenic in ancient human hair using synchrotron radiation. *Analytical Chemistry*, 86(1), 521-526. <https://doi.org/10.1021/ac4024439>
- King, C. L., Arriaza, B. T., Standen, V. G., Millard, A. R., Gröcke, D. R., Halcrow, S. E. y Muñoz, I. (2018). Isotopic study of marine and terrestrial resources in the prehistory of the Atacama Desert. *Chungará (Arica)*, 50(3), 369-396. <https://doi.org/jfnm>
- Korpisaari, A. y Chacama, J. (Eds.). (2015). *El Horizonte Medio: Nuevos Aportes para el Sur del Perú, Norte de Chile y Bolivia*. Universidad de Tarapacá. <https://bit.ly/3CxtlpN>
- Ku, W. W., Chapin, R. E., Moseman, R. F., Brink, R. E., Pierce, K. P. y Adams, K. Y. (1991). Tissue disposition of boron in male fischer rats. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 111(1), 145-151. [https://doi.org/10.1016/0041-008X\(91\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0041-008X(91)90143-3)
- Lovejoy, C., Meindl, R., Pryzbeck, T. y Mensforth, R. (1985). Chronological metamorphosis of the auricular surface of the ilium: A new method for the determination of adult skeletal age at death. *American Journal of Physical Anthropology*, 68(1), 15-28. <https://doi.org/fvkkdq>
- Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. (2009). *Resultados y lecciones en reducción de boro en aguas de riego. Proyecto de innovación en XV Región de Arica y Parinacota*. <https://bit.ly/3rrufD9>
- Ministerio de Obras Públicas, República de Chile. (1994). *Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres. Estadística hidroquímica nacional. Etapa 1. Primera región*. <https://bit.ly/3RAPbH9>
- Ministerio de Obras Públicas, República de Chile. (1997). *Modelo de simulación hidrológico operacional cuenca del río San José*. <https://bit.ly/3EfNhUM>
- Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. (2002). *Estudios básicos de los recursos hídricos valles de Lluta, Azapa, Vitor y Camarones*. <https://bit.ly/3ydRJPM>
- Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile. (2016). *Estudio diagnóstico de disponibilidad hídrica, Cuenca del río Camarones*. <https://bit.ly/3yfvj0O>
- Moseman, R. (1994). Chemical disposition of boron in animals and humans. *Environmental Health Perspectives*, 102(7), 113-117. <https://doi.org/10.1289/ehp.94102s7113>
- Muñoz, I. (1985). Tempranos cultivos de plantas en poblaciones prehispánicas del valle de Azapa (Arica, Chile). *Idesia (Arica)*, 9, 57-62. <https://bit.ly/3rr6ds7>
- Muñoz, I. (1989). Perfil de la organización económico-social en la desembocadura del río Camarones: Períodos Intermedio tardío e Inca. *Chungará (Arica)*, (22), 85-111. <https://bit.ly/3V2bYKk>
- Muñoz, I. (2004). El período Formativo en los valles del norte de Chile y sur de Perú: Nuevas evidencias y comentarios. *Chungará (Arica)*, 36(S.E.1), 213-225. <https://doi.org/b5d8rk>

- Muñoz, I. (2019). Cronología del periodo Medio en el valle de Azapa, norte de Chile: Estilos, fechados y contextos culturales del poblamiento humano. *Chungará (Arica)*, 51(4), 595-611. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-73562019005001801>
- Muñoz, I. y Chacama, J. (2012). Transformación del paisaje social en Arica, norte de Chile: De pescadores arcaicos a agricultores incipientes. *Estudios Atacameños*, (44), 123-140. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-10432012000200007>
- Nielsen, F. (1997). Boron in human and animal nutrition. *Plant Soil*, 193, 199-208. <https://doi.org/10.1023/A:1004276311956>
- Núñez, L. (1982). Temprana emergencia de sedentarismo en el desierto chileno: Proyecto Caserones. *Chungará (Arica)*, 9, 80-122. <https://bit.ly/3EgDAP8>
- Ogalde, J.P (2019). *Sobre el origen cultural del quero Cabuza. Los grupos sociales detrás de sus tecnologías de producción y uso* [Tesis de doctorado no publicada]. Universidad Católica del Norte/Universidad de Tarapacá.
- Organización Mundial de la Salud. (1998). *The environmental health criteria. Boron*. <https://bit.ly/3Cy57Bc>
- Organización Mundial de la Salud. (2009). *Boron in drinking-water: Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality*. <https://bit.ly/3Ca6Afo>
- Organización Mundial de la Salud. (2011). *Guidelines for drinking-water quality* (4a ed). <https://bit.ly/2FdomIJ>
- Prejac, J., Skalny, A., Grabeklis, A., Uzun, S., Mimica, N. y Momčilović, B. (2018). Assessing the boron nutritional status by analyzing its cumulative frequency distribution in the hair and whole blood. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 45, 50-56. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2017.09.018>
- Rivera, M. A. (2005). *Arqueología del desierto de Atacama: La etapa formativa en el área de Ramaditas/Guatacondo*. Universidad Bolivariana.
- Rodríguez, M., Muñoz, E. y Bernal, M. (2009). Estudio comparativo de la tolerancia al boro de dos variedades de pimiento (*Capsicum annum* L.). *UDO Agrícola*, 9(3), 509-516. <https://bit.ly/3dZ95cE>
- Samman, S., Naghii, M. R., Lyons, P. M. y Verus, A. P. (1998). The Nutritional and metabolic effects of boron in humans and animals. *Biological Trace Element Research*, 66, 227-235. <https://doi.org/10.1007/BF02783140>
- Santoró, C. (1980). Fase Azapa, transición del Arcaico al desarrollo agrario inicial en los valles bajos de Arica. *Chungará (Arica)*, 6, 46-56. <https://bit.ly/3f11Civ>
- Santoró, C., Romero Á., Standen, V. y Torres, A. (2004). Continuidad y cambio en las comunidades locales, períodos Intermedio tardío y Tardío, valles occidentales del área centro sur andina. *Chungará (Arica)*, 36(S.E.1), 235-247. <https://doi.org/c7nmwr>

Sobreingesta de boro durante la época precolombina en las poblaciones de Arica: implicancias biológicas y...

Scheuer, L. y Black, S. (2000). *Developmental juvenile osteology*. Academic Press.

Schiappacasse, V. y Niemeyer, H. (1984). Descripción y análisis interpretativo de un sitio arcaico temprano en la Quebrada de Camarones. *Publicación Ocasional* (41), <https://bit.ly/3SzNTZF>

Schillinger, B. M., Berstein, M., Goldberg, L. A. y Shalita, A. R. (1982). Boric acid poisoning. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 7(5), 667-73. <https://doi.org/brwj4f>

Standen, V. G., Arriaza, B. T. y Santoro, C. M. (1997). External auditory exostosis in prehistoric Chilean populations: A test of the cold water hypothesis. *American Journal of Physical Anthropology*, 103(1), 119-129. <https://doi.org/bv269t>

Standen, V. G., Santoro, C. M., Arriaza, B. T. y Coleman, D. (2018). Hunting, gathering, and fishing on the coast of the Atacama Desert: Chinchorro population mobility patterns inferred from strontium isotopes. *Geoarchaeology: An International Journal*, 33(2), 162-176. <https://doi.org/10.1002/gea.21594>

Torres, A. y Acevedo, E. (2008). The salinity problem of the water and soil resources in Lluta and Azapa valleys in northern Chile. *Idesia (Arica)*, 26(3), 3-44. <https://doi.org/fw5wqf>

Ubelaker, D. (1999). *Human skeletal remains: Excavation, analysis, interpretation*. Taraxacum.

Vielma, J. R., Picón-Borregales, D., Vergara, M. A., Carrero, P. E. y Gutiérrez-Peña, L. V. (2017). El boro, un elemento benéfico que ayuda a prevenir la osteoporosis en el humano: Una revisión de literatura. *Avances en Biomedicina*, 6(3), 216-226. <https://bit.ly/3CwMX2l>

Para citar este artículo bajo norma APA 7a ed.

Arriaza, B., Figueroa, L., Standen, V., Aravena, N., Vizcarra, A. y Contreras, C. (2022). Sobreingesta de boro durante la época precolombina en las poblaciones de Arica: implicancias biológicas y culturales. *Estudios Atacameños (En línea)*, 68, e5047. <https://doi.org/10.22199/issn.0718-1043-2022-0024>



## Anexo Tabla Complementaria 1:

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg/Kg)	z-score
Lluta	Lluta 54	2	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	I	Infante	310,00	0,87
Lluta	Lluta 54	3	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	M	Adul	140,00	-1,10
Lluta	Lluta 54	4	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	M	Adul	193,00	-0,40
Lluta	Lluta 54	5	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	I	Infante	250,50	0,17
Lluta	Lluta 54	7	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	I	Adul	78,00	-1,82
Lluta	Lluta 54	9	Gentilar	Intermedio tardío/ Tardío	F	Adul	425,10	2,20
Lluta	Lluta 54	11	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	M	Adul	324,10	1,03
Lluta	Lluta 54	12	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	F	Infante	220,60	-0,17
Lluta	Lluta 54	14	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	I	Infante	298,10	0,72
Lluta	Lluta 54	16	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	I	Infante	295,80	0,70
Lluta	Lluta 54	17	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	M	Adol	104,70	-1,52
Lluta	Lluta 54	20	Gentilar	Intermedio tardío/ Tardío	F	Adol	266,70	0,36
Lluta	Lluta 54	21	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	M	Adul	184,20	-0,50
Lluta	Lluta 54	23	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	I	Infante	269,80	0,40
Lluta	Lluta 54	27	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	I	Infante	171,10	-0,75
Lluta	Lluta 54	32	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	F	Adul	225,00	-0,12
Lluta	Lluta 54	33	D. Regional/Inca	Intermedio tardío/ Tardío	M	Adul	245,00	0,11
Azapa	Az 71	39	Cabuza	Medio	F	Adul	44,30	-0,70
Azapa	Az 71	102	Cabuza	Medio	F	Adul	44,30	-0,70
Azapa	Az 71	104	Cabuza	Medio	F	Adul	46,14	-0,66
Azapa	Az 71	121	Cabuza	Medio	F	Adul	37,62	-0,86
Azapa	Az 71	139	Tiwanaku	Medio	F	Adul	66,41	-0,10
Azapa	Az 71	171	Maytas	Medio	F	Adul	44,07	-0,71

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg/Kg)	z-score
Azapa	Az 71	194	Cabuza	Medio	M	Adul	41,8	-
Azapa	Az 71	205	Cabuza	Medio	M	Adul	98,5	0,56
Azapa	Az 71	206	Cabuza	Medio	F	Adol	110,	0,82
Azapa	Az 71	207	Cabuza	Medio	F	Adul	59,3	-
Azapa	Az 71	215	Cabuza	Medio	F	Adul	58,6	-
Azapa	Az 71	245	Maytas	Medio	F	Adul	107,	0,77
Azapa	Az 71	249	Cabuza	Medio	F	Adul	42,0	-
Azapa	Az 71	258	Tiwanaku	Medio	F	Adol	59,9	-
Azapa	Az 71	264	Cabuza	Medio	F	Adul	30,4	-
Azapa	Az 71	265	Cabuza	Medio	M	Adul	20,6	-
Azapa	Az 71	282	Cabuza	Medio	M	Adul	43,6	-
Azapa	Az 71	287 b	Cabuza	Medio	F	Adul	40,9	-
Azapa	Az 71	288	Azapa	Formativo	F	Adol	65,5	-
Azapa	Az 71	326	Azapa	Formativo	F	Adul	18,8	-
Azapa	Az 71	331	Azapa	Formativo	M	Adul	83,7	0,21
Azapa	Az 71	601	Cabuza	Medio	M	Adul	36,7	-
Azapa	Az 71	602	Alto Ramírez	Formativo	M	Adul	25,9	-
Azapa	Az 71	603	Alto Ramírez	Formativo	F	Adul	50,8	-
Azapa	Az 71	606 a	Cabuza	Medio	M	Adul	82,2	0,18
Azapa	Az 71	615	Cabuza	Medio	F	Adul	37,9	-
Azapa	Az 71	616	Cabuza	Medio	F	Adul	64,0	-
Azapa	Az 71	617	Cabuza	Medio	M	Adul	43,5	-
Azapa	Az 71	TB 1	Cabuza	Medio	F	Adul	62,3	-
Azapa	Az 71	TCC	Cabuza	Medio	M	Adul	54,7	-

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg/Kg)	z-score
Azapa	Az 140	4	San Miguel	Intermedio tardío	F	Adul	149,24	1,73
Azapa	Az 140	5	San Miguel	Intermedio tardío	F	Adul	237,45	3,78
Azapa	Az 140	7	Maytas	Medio	M	Adul	58,64	-
Azapa	Az 140	8	Alto Ramírez	Formativo	F	Adul	221,59	3,41
Azapa	Az 140	10	Maytas	Medio	F	Adul	46,84	-
Azapa	Az 140	16	Maytas	Medio	F	Adul	44,52	-
Azapa	Az 140	18	San Miguel	Intermedio tardío	F	Adul	55,16	-
Azapa	Az 140	19	Maytas	Medio	F	Adul	75,40	0,02
Azapa	Az 140	21	San Miguel	Intermedio tardío	M	Adul	77,45	0,07
Azapa	Az 140	27	Maytas	Medio	F	Adul	89,52	0,35
Azapa	Az 140	28	Maytas	Medio	M	Adol	17,35	-
Azapa	Az 140	29	Maytas	Medio	M	Adol	65,16	-
Azapa	Az 140	32	Maytas	Medio	F	Adul	46,68	-
Azapa	Az 140	35	Maytas	Medio	M	Adul	95,48	0,48
Azapa	Az 140	36	Maytas	Medio	F	Adul	24,58	-
Azapa	Az 140	39	Maytas	Medio	F	Adul	89,02	0,33
Azapa	Az 140	41	Maytas	Medio	F	Adul	87,15	0,29
Azapa	Az 140	42a	Maytas	Medio	M	Adul	52,50	-
Azapa	Az 140	44	Maytas	Medio	M	Adul	53,54	-
Azapa	Az 140	45b	San Miguel	Intermedio tardío	F	Adul	203,41	2,99
Azapa	Az 140	49	Maytas	Medio	F	Adul	54,67	-
Azapa	Az 140	50	Maytas	Medio	F	Adul	40,70	-
Azapa	Az 140	51	Maytas	Medio	F	Adul	46,91	-
Azapa	Az 140	52	Maytas	Medio	M	Adul	75,02	0,01

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg/Kg)	z-score
Azapa	Az 140	55	Maytas	Medio	M	Adul	28,3	-
Azapa	Az 140	56	Maytas	Medio	F	Adul	64,8	-
Azapa	Az 140	58	Maytas	Medio	F	Adul	72,1	-
Azapa	Az 140	63	Maytas	Medio	F	Adul	27,0	-
Azapa	Az 140	67	Maytas	Medio	M	Adul	66,8	-
Azapa	Az 140	68	Maytas	Medio	M	Adol	69,7	-
Azapa	Az 140	69	Maytas	Medio	M	Adol	36,2	-
Azapa	Az 140	70	Maytas	Medio	M	Adol	90,7	0,37
Azapa	Az 140	71	Maytas	Medio	F	Adul	28,5	-
Azapa	Az 140	73	Maytas	Medio	F	Adul	43,0	-
Azapa	Az 140	74	Maytas	Medio	M	Adol	29,3	-
Azapa	Az 140	75	Maytas	Medio	M	Adul	66,8	-
Azapa	Az 140	76	Maytas	Medio	M	Adol	81,7	0,17
Azapa	Az 140	77	Maytas	Medio	F	Adul	50,8	-
Azapa	Az 140	78	Maytas	Medio	F	Adul	25,7	-
Azapa	Az 140	79	Maytas	Medio	F	Adol	29,9	-
Azapa	Az 140	80	Maytas	Medio	M	Adul	85,8	0,26
Azapa	Az 140	82	Maytas	Medio	M	Adul	56,5	-
Azapa	Az 140	89	Maytas	Medio	F	Adul	34,4	-
Azapa	Az 140	90	Maytas	Medio	I	Infan	91,6	0,40
Azapa	Az 140	91	Maytas	Medio	M	Adul	55,1	-
Azapa	Az 140	92	Maytas	Medio	F	Adul	46,7	-
Azapa	Az 140	93	Maytas	Medio	F	Adul	194,7	2,79
Azapa	Az 140	97	Maytas	Medio	M	Adul	65,5	-

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg/Kg)	z-score
Azapa	Az 140	99	Maytas	Medio	M	Adul	52,1	-
Azapa	Az 140	100	Maytas	Medio	F	Adul	88,8	0,33
Azapa	Az 140	104	Maytas	Medio	M	Adul	81,6	0,16
Azapa	Az 140	105	Maytas	Medio	M	Adul	48,1	-
Azapa	Az 140	106	Maytas	Medio	M	Adol	74,4	0,00
Azapa	Az 140	107	Maytas	Medio	F	Adul	109,	0,81
Azapa	Az 140	108a	Maytas	Medio	M	Adul	61,2	-
Azapa	Az 140	110	Maytas	Medio	F	Adul	231,	3,65
Azapa	Az 140	111	Maytas	Medio	F	Adul	77,0	0,06
Azapa	Az 140	112a	Maytas	Medio	F	Adul	82,6	0,19
Azapa	Az 140	113	Maytas	Medio	M	Adol	217,	3,31
Azapa	Az 140	116	Maytas	Medio	F	Adul	51,6	-
Azapa	Az 140	117	Maytas	Medio	F	Adul	52,5	-
Azapa	Az 140	118	Maytas	Medio	F	Adul	117,	1,00
Azapa	Az 140	120	Maytas	Medio	F	Adul	243,	3,93
Azapa	Az 140	122	Maytas	Medio	M	Adul	70,0	-
Azapa	Az 140	124	Maytas	Medio	F	Adul	184,	2,55
Azapa	Az 140	125	Maytas	Medio	F	Adul	92,9	0,43
Azapa	Az 140	126	Maytas	Medio	F	Adul	198,	2,88
Azapa	Az 140	127	Maytas	Medio	M	Adol	202,	2,98
Azapa	Az 140	128	Maytas	Medio	M	Adul	184,	2,55
Azapa	Az 140	129	Maytas	Medio	F	Adul	54,0	-
Azapa	Az 140	140	San Miguel	Intermedio tardío	F	Adul	80,8	0,14
Azapa	Az 140	MMB	Maytas	Medio	F	Adul	37,9	-

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg/Kg)	z-score
Azapa	Az 140	XPB	Maytas	Medio	F	Adul	63,1	-
Azapa	Az 140	XPB 3	Maytas	Medio	M	Adol	42,7	-
Azapa	Az 140	XPB 2a	Maytas	Medio	M	Adul	80,8	0,15
Azapa	Az 140	XPB 4	Maytas	Medio	F	Adul	104,09	0,68
Azapa	Az 140	XPB 6	Maytas	Medio	M	Adul	59,46	-
Azapa	Mo 1	1 C4	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	77,81	0,07
Azapa	Mo 1	2 C4	Chinchorro	Arcaico	F	Adol	36,20	-
Azapa	Mo 1	2 C5	Chinchorro	Arcaico	I	Adol	59,47	-
Azapa	Mo 1	3	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	65,44	-
Azapa	Mo 1	6	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	130,72	1,30
Azapa	Mo 1	9	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	64,04	-
Azapa	Mo 1	11	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	66,50	-
Azapa	Mo 1	15	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	80,95	0,15
Azapa	Mo 1	16 b	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	54,62	-
Azapa	Mo 1	18 C2	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	71,07	-
Azapa	Mo 1	18 C3	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	76,36	0,04
Azapa	Mo 1	19	Chinchorro	Arcaico	M	Infan	70,32	-
Azapa	Mo 1	19 C1	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	76,94	0,05
Azapa	Mo 1	20 C1	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	78,30	0,09
Azapa	Mo 1	22 C3	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	90,77	0,38
Azapa	Mo 1	22 C5	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	91,74	0,40
Azapa	Mo 1	22 C6	Chinchorro	Arcaico	M	Adol	88,02	0,31
Azapa	Mo 1	23 C3	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	81,34	0,16

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg/Kg)	z-score
Azapa	Mo 1	23 C5	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	64,8	-
Azapa	Mo 1	26	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	99,7	0,58
Azapa	Mo 1	27 C4	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	79,4	0,11
Azapa	Mo 1	27 C5	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	57,4	-
Azapa	Mo 1	27 C8	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	71,8	-
Azapa	Mo 1	27 C9	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	45,6	-
Azapa	Mo 1	27 C11	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	41,8	-
Azapa	Mo 1	27 C12	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	89,6	0,35
Azapa	Mo 1	27 C13	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	96,7	0,51
Azapa	Mo 1	27 C15	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	63,6	-
Azapa	Mo 1	27 C18	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	55,9	-
Azapa	Mo 1	28 C3	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	112,	0,88
Azapa	Mo 1	28 C6	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	45,4	-
Azapa	Mo 1	28 C7	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	61,1	-
Azapa	Mo 1	28 C9	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	61,1	-
Azapa	Mo 1	28 C10	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	92,1	0,41
Azapa	Mo 1	28 C11	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	83,2	0,20
Azapa	Mo 1-6	3	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	48,3	-
Azapa	Mo 1-6	4	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	59,9	-
Azapa	Mo 1-6	5	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	58,0	-
Azapa	Mo 1-6	7	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	81,3	0,16
Azapa	Mo 1-6	9	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	74,1	-
Azapa	Mo 1-6	9 sec D	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	79,0	0,10
Azapa	Mo 1-6	10	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	29,9	-

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg/Kg)	z-score
Azapa	Mo 1-6	10a	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	55,5	-
Azapa	Mo 1-6	13	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	49,4	-
Azapa	Mo 1-6	14	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	41,7	-
Azapa	Mo 1-6	17	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	80,7	0,14
Azapa	Mo 1-6	21	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	89,3	0,34
Azapa	Mo 1-6	22	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	62,4	-
Azapa	Mo 1-6	23	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	91,5	0,39
Azapa	Mo 1-6	24	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	60,1	-
Azapa	Mo 1-6	26	Chinchorro	Arcaico	M	Adol	69,2	-
Azapa	Mo 1-6	27	Quiani	Arcaico	M	Adul	62,0	-
Azapa	Mo 1-6	28	Chinchorro	Arcaico	I	Adol	97,4	0,53
Azapa	Mo 1-6	29	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	54,6	-
Azapa	Mo 1-6	32	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	80,6	0,14
Azapa	Mo 1-6	33	Chinchorro	Arcaico	M	Adol	77,8	0,08
Azapa	Mo 1-6	34	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	106,	0,73
Azapa	Mo 1-6	36	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	85,7	0,26
Azapa	Mo 1-6	41	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	118,	1,01
Azapa	Mo 1-6	46	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	55,6	-
Azapa	Mo 1-6	50	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	105,	0,71
Azapa	Mo 1-6	55	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	62,4	-
Azapa	Mo 1-6	58	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	37,2	-
Azapa	Mo 1-6	60	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	21,9	-
Azapa	Mo 1-6	U1	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	51,3	-
Azapa	Mo 1-6	U7	Chinchorro	Arcaico	M	Adul	81,6	0,16

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg/Kg)	z-score
Azapa	Mo 1-6	U8a	Chinchorro	Arcaico	F	Adul	143,77	1,61
Camaron	Cam 8	3	Gentilar	Intermedio tardío	F	Adul	222,25	1,32
Camaron	Cam 8	6	Gentilar	Intermedio tardío	F	Adul	351,04	2,98
Camaron	Cam 8	8	Gentilar	Intermedio tardío	M	Adul	118,56	-
Camaron	Cam 8	9	Gentilar	Intermedio tardío	F	Adul	244,26	1,60
Camaron	Cam 8	10	Gentilar	Intermedio tardío	M	Adul	257,06	1,78
Camaron	Cam 8	15	Gentilar	Intermedio tardío	F	Adul	136,60	0,23
Camaron	Cam 8	19	Gentilar	Intermedio tardío	F	Adul	113,84	-
Camaron	Cam 8	A1	Gentilar	Intermedio tardío	F	Adul	97,30	-
Camaron	Cam 8	A2	Gentilar	Intermedio tardío	M	Adul	175,66	0,28
Camaron	Cam 9	1	Inca	Tardío	M	Adul	84,84	-
Camaron	Cam 9	8	Inca	Tardío	M	Adul	80,86	-
Camaron	Cam 9	10	Inca	Tardío	M	Adol	93,24	-
Camaron	Cam 9	12	Inca	Tardío	F	Adul	42,98	-
Camaron	Cam 9	13	Inca	Tardío	M	Adul	72,56	-
Camaron	Cam 9	14	Inca	Tardío	M	Adul	49,25	-
Camaron	Cam 9	15	Inca	Tardío	I	Adul	93,62	-
Camaron	Cam 9	16	Inca	Tardío	F	Adul	81,11	-
Camaron	Cam 9	19	Inca	Tardío	I	Adul	57,41	-
Camaron	Cam 9	23	Inca	Tardío	M	Adol	49,01	-
Camaron	Cam 9	29	Inca	Tardío	F	Adol	146,05	0,35
Camaron	Cam 9	33	Inca	Tardío	M	Adul	151,61	0,42
Camaron	Cam 9	37	Inca	Tardío	M	Adul	73,59	-
Camaron	Cam 9	38	Inca	Tardío	M	Adol	43,60	-

Valle	Sitio	Tumba	Fase cultural	Periodo	Sexo	Categoría edad	Boro (mg /Kg )	z-score
Camaron	Cam 9	39	Inca	Tardío	M	Adul	48,4	-
Camaron	Cam 9	45	Inca	Tardío	M	Adul	89,7	-

**Tabla complementaria 1.** Casos analizados separados por valle y valores de boro obtenidos en muestras de costillas.

Nota. En letras rojas se destacan los casos atípicos ( $z > 3$ ) que no fueron utilizados.