



## Efecto del entrenamiento en altura media en la respuesta hormonal crónica en velocistas y mediofondistas de élite

*Effect of moderate altitude training on chronic hormonal response in elite sprinters and middle-distance runners*

**Pérez-Castillo, R<sup>1FDA</sup>; Silva-Fernández, J<sup>2BC</sup>; Almenares-Pujadas, E<sup>3BC</sup>; Yar Bolaños, PJ<sup>4DEF</sup>; Fernández Figueroa, FF<sup>5EF</sup>; Lutuala Catota, LF<sup>6EF</sup>; Reyes Ortiz, LJ<sup>7EF</sup>; Sevillano Barreno, PE<sup>8DF</sup>; Hidrobo-Coello, JF<sup>9DF</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Investigación del Deporte Cubano, Cuba, raydelp77@hotmail.com

<sup>2</sup> Instituto de Medicina Deportiva, Cuba; evaristaf80@gmail.com

<sup>3</sup> Instituto de Medicina Deportiva, Cuba; evaristaf80@gmail.com

<sup>4</sup> Centro Especializado en Medicina del Deporte "Asdrúbal de la Torre", Ecuador, paul.yar@mail.cmdat.gob.ec

<sup>5</sup> Centro Especializado en Medicina del Deporte "Asdrúbal de la Torre", Ecuador, fernandezfigueroamed@gmail.com

<sup>6</sup> Centro Especializado en Medicina del Deporte "Asdrúbal de la Torre", Ecuador, luislutuala21@gmail.com

<sup>7</sup> Centro Especializado en Medicina del Deporte "Asdrúbal de la Torre", Ecuador, leoreyes1922@gmail.com

<sup>8</sup> Unidad Metropolitana de Salud Norte, Ecuador, paulsevillano@hotmail.com

<sup>9</sup> Centro Especializado en Medicina del Deporte "Asdrúbal de la Torre", Ecuador, juan.hidrobo@mail.cmdat.gob.ec

Responsabilidades. (A Diseño de la investigación; B Recolector de datos; C Redactor del trabajo; D Tratamiento estadístico; E Apoyo económico; F Idea original y coordinador de toda la investigación)

Recibido el 26 de octubre de 2024

Aceptado el 17 de abril de 2025

DOI: 10.24310/riccafd.14.1.2025.20760

**Correspondencia:** Raydel Pérez Castillo: raydelp77@hotmail.com

### RESUMEN

Este estudio evaluó el impacto de la altitud moderada en los niveles hormonales de 15 atletas de élite (8 hombres, 7 mujeres) durante un ciclo de entrenamiento de cuatro semanas. Se midieron testosterona, T3, T4 y TSH en cinco momentos: antes del ascenso (S1), en los días 7, 14 y 21 en altitud (S2 a S4), y una semana después del regreso al llano. En hombres, la testosterona aumentó significativamente, alcanzando un máximo de 35.8 nmol/L en S5. En mujeres, también hubo un incremento a 2.95 nmol/L. T3 y T4 se mantuvieron dentro del rango normal, con ligeras elevaciones en S2 y S3. La TSH mostró un

aumento moderado en mujeres, permaneciendo dentro del rango normal. Los resultados indican que la altitud afecta las hormonas clave, lo que subraya la necesidad de ajustar los programas de entrenamiento en condiciones de hipoxia.

**PALABRAS CLAVE:** entrenamiento en altura, respuesta hormonal, atletismo, testosterona, tiroides.

### ABSTRACT

This study evaluated the impact of moderate altitude on the hormonal levels of 15 elite athletes (8 men, 7 women) during a four-week training cycle. Testosterone, T3, T4, and TSH levels were measured at five points: before ascent (S1), on days 7, 14, and 21 at altitude (S2 to S4), and one week after returning to sea level. In men, testosterone significantly increased, peaking at 35.8 nmol/L in S5. In women, there was also an increase to 2.95 nmol/L. T3 and T4 remained within the normal range, with slight elevations in S2 and S3. TSH showed a moderate increase in women, remaining within the normal range. The results indicate that altitude affects key hormones, highlighting the need to adjust training programs under hypoxic conditions to optimize physiological adaptation.

**KEY WORDS:** Altitude training, hormonal response, athletics, testosterone, thyroid

### INTRODUCCIÓN

El sistema endocrino desempeña un papel crucial ante las nuevas condiciones ambientales, al detectar y desencadenar respuestas biológicas para facilitar los procesos adaptativos. Las hormonas actúan a través de receptores de membrana o intracelulares (nucleares o citoplásmicos), y se ha observado que la hipoxia modula la expresión de estos receptores <sup>(1)</sup>. La tiroides es una glándula que secreta hormonas metabólicamente activas responsables del crecimiento, la maduración, el gasto energético y el recambio de sustratos corporales <sup>(2)</sup>.

Durante las últimas décadas, uno de los aspectos de mayor atención en el atletismo u otros deportes, está representado por la búsqueda un mejor performance y resultados. En la actualidad, los triatletas, ciclistas, nadadores, ciclistas de montaña, maratonistas y otros corredores suelen pasar tiempo entrenando o viviendo en lugares elevados. El entrenamiento en altura (*High Training o Altitude Training*) hace referencia a la práctica mediante la cual los deportistas efectúan estancias o entrenamientos en zonas situadas, por lo general, a más de 2000 metros de altitud. Esto genera una situación de hipoxia, así como una serie de respuestas y adaptaciones fisiológicas en el organismo, que permiten su funcionamiento en estas condiciones <sup>(3)</sup>. Este fenómeno aumenta la capacidad aeróbica, la tolerancia al ácido láctico y el flujo de oxígeno hacia los músculos <sup>(4)</sup>.

A partir de los Juegos Olímpicos de México en 1968 (2,240 m sobre el nivel del mar) comenzaron a incrementarse los estudios para valorar el efecto de la altitud moderada en el rendimiento físico y la necesidad o no de aclimatarse<sup>(5)</sup>. Millet et al<sup>(6)</sup> en una extensa revisión acerca del entrenamiento en altura/hipoxia, establece 4 tipos de entrenamiento: *Live High-Training High* (LT-TH), *Live High-Training Low* (LH-TL), *Intermittent Hypoxic Exposure* (IHE)-Entrenamiento en cámaras de hipoxia y el *Intermittent Hypoxic training* (IHT).

Entre los mecanismos fisiológicos compensatorios importantes en ambientes de altitud se incluyen aumentos de la presión arterial, frecuencia cardíaca, la masa de glóbulos rojos, el volumen corriente y la frecuencia respiratoria<sup>(7)</sup>. Estas respuestas pueden tener diversos efectos en el rendimiento atlético<sup>(8)</sup>. Los organismos reguladores del deporte tienen normativas limitadas y diferentes para el entrenamiento y la competición en grandes altitudes, con períodos de aclimatación recomendados que van desde los 3 días hasta las 3 semanas<sup>(9)</sup>.

El objetivo de este estudio fue analizar los efectos del entrenamiento en altitud media sobre los niveles de testosterona y hormonas tiroideas (T3, T4 y TSH) en velocistas y mediofondistas de élite, diferenciando la respuesta por sexo y momento de medición.

## MATERIAL Y METODOS

### *Diseño del estudio*

Se realizó un estudio de campo, con diseño longitudinal y se llevó a cabo para evaluar las fluctuaciones hormonales (testosterona, T3, T4 y TSH) en relación con el tiempo y el sexo de los participantes. Se reclutaron 15 sujetos, divididos que incluyó 9 velocistas (5 hombres, 4 mujeres) y 6 mediofondistas (3 hombres, 3 mujeres), todos pertenecientes a la selección cubana de Atletismo. Criterios de elegibilidad: Presentar adecuado estado de salud y no tener lesiones deportivas. Constar con las cinco determinaciones hormonales. Recibir toda la carga de entrenamiento planificada en condiciones de altura y en llano. El protocolo fue aprobado por el Comité de Ética del Instituto de Medicina del Deporte, y todos los participantes firmaron consentimiento informado.

### **Variables Medidas**

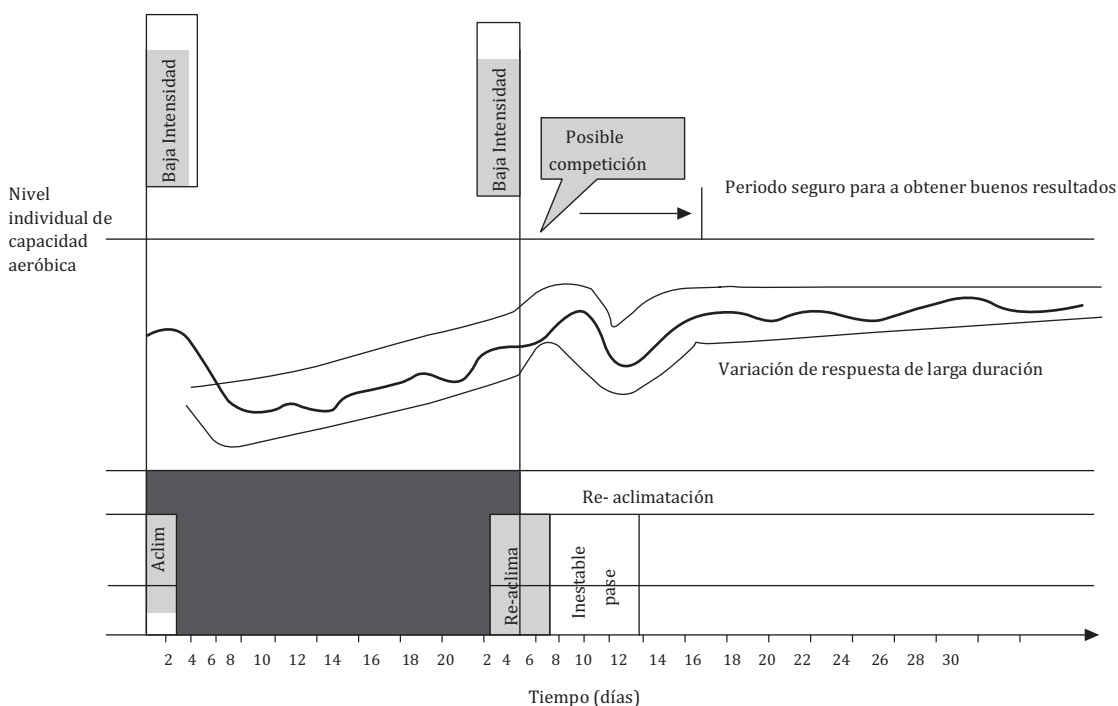
Se realizaron mediciones de los siguientes biomarcadores hormonales: 1) Testosterona: Hormona anabólica fundamental en la construcción muscular y recuperación. 2) T3 (Triyodotironina): Hormona tiroidea clave para el metabolismo energético. 3) T4 (Tiroxina): Hormona que regula la tasa metabólica y el uso de energía y 4) TSH (Hormona estimulante de la tiroides): Indicador del estado funcional de la tiroides.

## Procedimiento

Las mediciones hormonales se llevaron a cabo en cinco puntos de medición (S1 a S5) distribuidos a lo largo de un mes. Cada punto de medición tuvo una separación de aproximadamente 7 días para reflejar posibles fluctuaciones a corto y mediano plazo: S1: Antes de iniciar el ciclo de entrenamiento, S2: Día 7; S3: Día 14; S4: Día 21 y S5: Día 28 (final del ciclo de entrenamiento).

Se realizó una extracción de sangre venosa en cada punto de medición, siempre en las mismas condiciones: a las 7:00 a.m., después de un ayuno nocturno de 8 horas, y en un ambiente controlado para minimizar las variables externas que pudieran alterar los niveles hormonales. Las muestras de sangre se centrifugaron inmediatamente después de la extracción y se almacenaron a  $-80^{\circ}\text{C}$  hasta su análisis. Las concentraciones hormonales de testosterona, T3, T4 y TSH fueron determinadas mediante técnicas de inmunoensayo, utilizando kits comerciales validados.

*Metodología aplicada al entrenamiento deportivo en las diferentes. Fases de la Investigación.*



**Ilustración 1.** Vista esquemática del desarrollo de la capacidad aeróbica durante y después del entrenamiento “vivir en altura-entrenar en altura” (LHTH) adaptado y traducido del original propuesto por Millet et al <sup>(6)</sup>. Aclim. = aclimatación.

#### *Primera Fase (Altura):*

Los deportistas viajaron al centro de entrenamiento en México, en condiciones de altura media. En los primeros tres días de estancia, realizaron trabajo para la aclimatación a la altura, constituido por cargas aerobias regenerativas, que oscilaron entre el 70 o 75 % de las programadas para la etapa. En ese momento se les realizó la valoración clínica y el estudio bioquímico

establecido por el Instituto de Medicina del Deporte para estos entrenamientos. Se comprobó que los deportistas se habían aclimatados de forma consecuente a las condiciones de altitud.

Se inició entonces el aumento gradual del trabajo aerobio, hasta alcanzar el 90-92 % de las cargas planificadas para el desarrollo del umbral anaerobio. Terminada la segunda semana, se inició la aplicación de las cargas de trabajo de corta duración y altas intensidades (96-98 %), hasta terminar la tercera semana. Durante la permanencia en la altura, el trabajo de fuerza consistió en cargas encaminadas al mantenimiento de los volúmenes e intensidades alcanzados previamente al ascenso.

#### *Segunda Fase (En el Llano):*

Después del regreso al llano, se inició la readaptación, nuevamente con cargas aerobias regenerativas, hasta concluir el estudio y a partir de ese momento, se continuó con la aplicación del trabajo planificado para la etapa. La evaluación clínica evidenció asimilación adecuada de las cargas de entrenamiento recibidas.

La determinación sanguínea de Testosterona, Insulina, hormona estimulante del tiroides (TSH), triyodotironina (T3) y tetrayodotironina o tiroxina (T4) se recolectó en antes del ascenso, tres momentos en la altura (día 7, 14 y 21) y un muestreo tras descenso al llano (día 7). Las tomas de muestras se realizaron en ayunas, antes de comenzar las sesiones de entrenamiento, a la misma hora para no afectar los resultados de los valores hormonales. Los valores tomados como referencia se basaron en las recomendaciones del Instituto de Medicina del Deporte de Cuba. El suero fue procesado en un analizador AIA-360 de la firma TOSOH con la técnica de inmunoensayo.

#### **Análisis Estadístico**

Los datos fueron analizados utilizando ANOVA de medidas repetidas, tanto para los efectos principales de tiempo como para las interacciones entre tiempo y sexo. Los resultados se complementaron con pruebas post-hoc de Conover cuando se encontraron diferencias significativas en el análisis de Friedman. Los niveles de significancia fueron establecidos en  $p < 0.05$ .

Las variables de respuesta incluyeron:

- Niveles promedio de cada hormona en cada punto de medición.
- Diferencias entre sexos y sus interacciones con el tiempo.

Además, se calculó el tamaño del efecto ( $\eta^2p$ ) para evaluar la magnitud de las diferencias encontradas.

Tamaño del Efecto ( $\eta^2p$ ) para Evaluar la Magnitud de las Diferencias:

El tamaño del efecto es una medida estadística que evalúa la magnitud de las diferencias observadas entre las variables, más allá de la significancia estadística. En este estudio, se utilizó el tamaño del efecto parcial ( $\eta^2p$ ) para determinar la proporción de la variabilidad total que puede atribuirse a las variables independientes (tiempo, sexo, y su interacción) en relación con las hormonas estudiadas (testosterona, T3, T4 y TSH).

### Interpretación de los Valores de $\eta^2p$ :

- **0.01 o menos:** Tamaño del efecto pequeño. Las diferencias observadas son reales, pero tienen un impacto menor en las variaciones hormonales.
- **0.06 a 0.13:** Tamaño del efecto moderado. Las diferencias tienen un impacto apreciable en las hormonas, aunque no son predominantes.
- **0.14 o más:** Tamaño del efecto grande. Las diferencias son sustanciales y explican una parte importante de la variabilidad observada en los niveles hormonales.

En el contexto de este estudio, los valores de  $\eta^2p$  se calcularon para:

1. Efecto del tiempo de medición: Cuánto de la variabilidad en los niveles hormonales puede explicarse por los cambios a lo largo del tiempo (por ejemplo, entre las mediciones S1 a S5).
2. Efecto del sexo: Cuánto de la variabilidad se debe a las diferencias hormonales entre hombres y mujeres.
3. Interacción entre tiempo y sexo: Evalúa si el efecto del tiempo en los niveles hormonales varía entre hombres y mujeres, es decir, si el patrón de cambio a lo largo del tiempo es diferente según el sexo.

### Control de Factores Externos

Se implementaron los siguientes controles para reducir la influencia de factores externos en los resultados:

- Todos los participantes siguieron una dieta normocalórica diseñada por un nutricionista deportivo para asegurar una ingesta energética adecuada durante el estudio.
- No se permitieron suplementos hormonales o sustancias que pudieran alterar los niveles de testosterona, T3, T4 o TSH.

Todos los entrenamientos se realizaron bajo condiciones controladas y monitorizadas para asegurar la consistencia en la carga de trabajo.

## RESULTADOS

Los estudios hormonales, proporcionan información acerca de la adaptación a determinadas condiciones ambientales, niveles de intensidad y duración del ejercicio, también de alteraciones de esa adaptación <sup>(2)</sup>. Las muestras hormonales se tomaron en cinco momentos: antes del entrenamiento a nivel del llano, en los días 7, 14 y 21 de exposición a la altura, y siete días después de regresar al llano.

### Testosterona

En la presente serie los valores promedios de testosterona en los hombres estuvieron en un rango de 27,18 a 36,12 ng/ml y en las mujeres osciló entre 1,42 a 3,09 ng/ml; mostrando la marcada diferencia intergenérica que existe en las concentraciones de esta hormona. Durante las cinco semanas de evaluación existió homogeneidad en las variaciones de los valores de Testosterona ( $p < 0,005$ ) (**Tabla 1**).

**Tabla 1.** Valores descriptivos de la testosterona por sexo y semanas

Tiempo de medición	Sexo	Media (ng/ml)	DT	Coefficiente de variación
S1	Masculino	27.175	7.064	0.260
	Femenino	1.527	0.880	0.576
S2	Masculino	31.500	5.880	0.187
	Femenino	1.414	0.691	0.489
S3	Masculino	29.738	7.629	0.257
	Femenino	1.503	0.778	0.517
S4	Masculino	28.450	3.687	0.130
	Femenino	1.703	0.980	0.576
S5	Masculino	35.800	8.066	0.225
	Femenino	2.950	1.351	0.458

Los valores de testosterona en los hombres están dentro del rango de normalidad en las primeras cuatro mediciones (S1 a S4). Sin embargo, en la medición final (S5), el valor supera ligeramente el límite superior de la normalidad (35.8 nmol/L vs 30.1 nmol/L), lo que sugiere un aumento significativo que podría estar relacionado con el ciclo de entrenamiento o un cambio hormonal asociado. En las mujeres, en las primeras cuatro mediciones (S1 a S4), los valores de testosterona estuvieron dentro del rango de normalidad.

El análisis indica que hay diferencias significativas en los niveles de testosterona a través de los diferentes tiempos de medición ( $p < 0.05$ ). Un valor de tamaño del efecto de  $\eta^2p$  de 0.247 sugiere que aproximadamente el 24.7% de la varianza en los niveles de testosterona se puede explicar por el tiempo de medición, lo que se considera un tamaño del efecto moderado. La interacción entre el tiempo de medición y el sexo no es significativa ( $p > 0.05$ ), aunque  $\eta^2p$  de 0.150 indica un efecto pequeño. Esto sugiere que, aunque los niveles de testosterona pueden variar según el sexo y el tiempo de medición, no hay una interacción estadísticamente significativa que indique que la variación de testosterona en función del sexo dependa del tiempo de medición (**Tabla 2**).

**Tabla 2.** Efectos del tiempo de medición sobre la testosterona dentro de los sujetos.

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p	$\eta^2p$
Tiempo de medición	226.404	4	56.601	4.267	<b>0.005</b>	<b>0.247</b>
Tiempo de medición * Sexo	121.287	4	30.322	2.286	0.072	0.150
Residuales	689.780	52	13.265			

*Nota.* Suma de Cuadrados Tipo III

Los resultados indican una diferencia altamente significativa entre los niveles de testosterona de hombres y mujeres ( $p < 0.001$ ). El tamaño del efecto ( $\eta^2p = 0.945$ ) es extremadamente alto, lo que sugiere que el sexo explica



aproximadamente el 94.5% de la varianza en los niveles de testosterona (**Tabla 3**).

**Tabla 3.** Efectos del tiempo de medición sobre la testosterona entre los sujetos

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p	$\eta^2_p$
Sexo	15389.555	1	15389.555	225.474	< 0.001	0.945
Residuals	887.307	13	68.254			

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

El contraste **de Friedman** indica que hay diferencias significativas en los niveles de testosterona a través de los diferentes tiempos de medición ( $p < 0.001$ ) cuando se considera el conjunto de datos como un todo. Los resultados de las comparaciones post-hoc muestran que hay diferencias significativas entre ciertos pares de tiempos de medición, especialmente entre S5 y los otros tiempos (S1, S2, S3, S4), donde se observan  $p < 0.001$  (**Tabla 4**).

**Tabla 4.** Comparaciones Post-hoc de Conover de la testosterona

	Estadístico-T	gl	$W_i$	$W_j$	$r_{rb}$	p	pBonf	pHolm
S1 S2	0.344	56	36.5	39.0	-0.35	0.732	1.000	1.000
S1 S3	0.619	56	36.5	41.0	-0.23	0.539	1.000	1.000
S1 S4	0.344	56	36.5	39.0	-0.15	0.732	1.000	1.000
S1 S5	4.536	56	36.5	69.5	-0.79	< .001	< .001	< .001

Nota. Agrupado según sujeto.

### Análisis de los Resultados de T3

Los niveles grupales de T3 mostraron una tendencia decreciente durante el periodo de exposición a la altura. A nivel del llano (S1), los valores promedio de T3 fueron de  $1.8 \pm 0.3$  nmol/L. En el día 7 (S2), los niveles disminuyeron a  $1.7 \pm 0.3$  nmol/L, continuaron reduciéndose a  $1.6 \pm 0.2$  nmol/L en el día 14 (S3) y alcanzaron  $1.5 \pm 0.2$  nmol/L en el día 21 (S4). Siete días después de regresar al llano (S5), los niveles aumentaron ligeramente a  $1.7 \pm 0.3$  nmol/L por proceso de supercompensación.

Los datos descriptivos muestran fluctuaciones en los niveles de T3 a lo largo del tiempo, pero sin grandes diferencias entre sexos: En la primera medición (S1), los hombres tuvieron una media de 1.223 ng/dL, mientras que las mujeres tuvieron 1.341 ng/dL; y en la última medición (S5), los hombres presentaron un nivel medio de 1.626 ng/dL, y las mujeres de 1.507 ng/dL. Estas fluctuaciones sugieren que tanto hombres como mujeres experimentaron cambios en los niveles de T3 a lo largo del tiempo, pero las diferencias entre sexos no son significativas (**Tabla 5**).

**Tabla 5.** Valores descriptivos de T3 según semanas y sexo.

Tiempo de medición	Sexo	N	Media (nmol/L)	DT	ET	Coefficiente de variación
S1	Masculino	8	1.223	0.133	0.047	0.109
	Femenino	7	1.341	0.185	0.070	0.138
S2	Masculino	8	1.424	0.155	0.055	0.109
	Femenino	7	1.454	0.205	0.078	0.141



**Tabla 5.** Valores descriptivos de T3 según semanas y sexo.

Tiempo de medición	Sexo	N	Media (nmol/L)	DT	ET	Coefficiente de variación
S3	Masculino	8	1.336	0.137	0.048	0.103
	Femenino	7	1.417	0.251	0.095	0.177
S4	Masculino	8	1.399	0.119	0.042	0.085
	Femenino	7	1.300	0.233	0.088	0.180
S5	Masculino	8	1.626	0.216	0.076	0.133
	Femenino	7	1.507	0.300	0.114	0.199

Tanto en hombres como en mujeres, los niveles de T3 en todas las mediciones están dentro de los rangos normales (1.22 - 2.43 nmol/L). Esto indica que no hubo una alteración significativa en los niveles de T3 a lo largo del ciclo de mediciones, sugiriendo una adecuada regulación tiroidea durante el estudio.

El ANOVA de medidas repetidas mostró un efecto significativo del **tiempo de medición** sobre los niveles de T3  $F(4,52)=8.288$ ,  $p<0.001$ ,  $\eta^2p=0.389$ . Esto indica que los niveles de T3 varían significativamente a lo largo de los puntos de medición (S1 a S5), con un tamaño de efecto moderado a grande ( $\eta^2p = 0.389$ ). Aproximadamente el 38.9% de la variabilidad en los niveles de T3 se explica por los cambios en el tiempo de medición, lo que sugiere una fluctuación hormonal significativa en el tiempo (**Tabla 6**).

**Tabla 6.** Efectos Dentro de los Sujetos sobre la T3

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p	$\eta^2p$
Tiempo de medición	0.692 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	0.173 <sup>a</sup>	<b>8.288</b> <sup>a</sup>	<b>&lt; .001</b> <sup>a</sup>	<b>0.389</b>
Tiempo de medición * Sexo	0.170 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	0.042 <sup>a</sup>	2.037 <sup>a</sup>	0.103 <sup>a</sup>	0.135
Residual	1.085	52	0.021			

*Nota.* Suma de Cuadrados Tipo III

<sup>a</sup> El contraste de Esfericidad de Mauchly indica que no se cumple el supuesto de esfericidad ( $p < 0.05$ ).

Aunque no se encontró una interacción significativa entre **sexo y tiempo de medición de los Niveles de T3**  $F(4,52) = 2.037$ ,  $p=0.103$ ,  $\eta^2p=0.135$ , el tamaño del efecto sugiere una influencia moderada de esta interacción ( $\eta^2p = 0.135$ ). Si bien los niveles de T3 varían a lo largo del tiempo, esta variación no parece depender del sexo de los participantes de manera significativa. El análisis de los efectos entre sujetos reveló que no hay una diferencia significativa en los niveles de T3 entre hombres y mujeres  $F(1,13) = 0.001$ ,  $p=0.975$ ,  $\eta^2p=0.000$ . Este resultado sugiere que los niveles de T3 son similares en ambos sexos, lo cual contrasta con los resultados observados para la testosterona, donde las diferencias fueron mucho más pronunciadas (**Tabla 7**).

**Tabla 7.** Efectos entre de los Sujetos sobre la T3

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p	$\eta^2_p$
Sexo	$1.167 \times 10^{-4}$	1	$1.167 \times 10^{-4}$	0.001	0.975	$7.942 \times 10^{-5}$
Residuals	1.469	13	0.113			

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

El **contraste de Friedman** confirmó que el tiempo de medición tuvo un efecto significativo en los niveles de T3  $\chi^2 F(4) = 19.114$ ,  $p < .001$ , W de Kendall = 0.319. Este resultado respalda los hallazgos del ANOVA, mostrando que los niveles de T3 variaron significativamente entre las diferentes mediciones temporales. Las comparaciones post-hoc realizadas mediante la prueba de Conover revelaron diferencias significativas entre ciertos pares de tiempos de medición. Las diferencias más marcadas se observaron entre las mediciones S5 y otras (S1, S2, S3, y S4), con  $p < 0.001$ . Esto indica que, al igual que en el análisis de testosterona, la medición final (S5) muestra una diferencia significativa en comparación con los niveles de T3 en mediciones anteriores (**Tabla 8**).

**Tabla 8.** Comparaciones Post-hoc de Conover - Tiempo de medición

	Estadístico-T	gl	$W_i$	$W_j$	$r_{rb}$	p	pBonf	pHolm
S1	S2	2.169	56	35.5	51.5	-0.71	0.034	0.343
	S3	0.339	56	35.5	38.0	-0.43	0.736	1.000
	S4	0.136	56	35.5	34.5	-0.31	0.893	1.000
	S5	4.068	56	35.5	65.5	-0.85	< .001	0.002
	S3	1.830	56	51.5	38.0	0.43	0.073	0.725
S2	S4	2.305	56	51.5	34.5	0.70	0.025	0.249
	S5	1.898	56	51.5	65.5	-0.54	0.063	0.628
S3	S4	0.475	56	38.0	34.5	0.13	0.637	1.000
	S5	3.729	56	38.0	65.5	-0.80	< .001	0.005
S4	S5	4.203	56	34.5	65.5	-0.90	< .001	< .001

Nota. Agrupado según sujetos.

Nota. Correlación biserial de rango basada en contrastes de rangos de signos individuales.

El análisis de los niveles de T3 a lo largo del tiempo muestra una variación significativa, con un aumento notable en la medición final (S5). Sin embargo, a diferencia de la testosterona, no se encontraron diferencias significativas entre los sexos en los niveles de T3.

## Análisis de los Resultados de T4

Los datos descriptivos muestran fluctuaciones en los niveles de T4 a lo largo del tiempo, pero sin diferencias significativas entre sexos: En la primera medición (S1), los hombres presentaron una media de 75.787 ng/dL, mientras que las mujeres tenían una media similar de 75.229 ng/dL. En la última medición (S5), los hombres tenían un nivel medio de 87.925 ng/dL, mientras que las mujeres presentaban 87.986 ng/dL (**Tabla 9**).

**Tabla 9.** Valores descriptivos de T4 según semana y sexo

Tiempo de medición	Sexo	N	Media (ng/dL)	DT	ET	Coefficiente de variación
S1	Masculino	8	75.787	14.194	5.018	0.187
	Femenino	7	75.229	19.390	7.329	0.258
S2	Masculino	8	100.550	11.708	4.139	0.116
	Femenino	7	96.157	19.778	7.475	0.206
S3	Masculino	8	95.862	12.204	4.315	0.127
	Femenino	7	99.629	19.835	7.497	0.199
S4	Masculino	8	95.475	15.358	5.430	0.161
	Femenino	7	88.543	14.949	5.650	0.169
S5	Masculino	8	87.925	15.520	5.487	0.177
	Femenino	7	87.986	17.802	6.729	0.202

En todos los puntos de medición (S1 a S5), los niveles de T4 en hombres y mujeres se encuentran dentro del rango de normalidad (63.2 - 141.9 nmol/L). Los resultados sugieren que no hubo alteraciones significativas en la producción de tiroxina a lo largo del estudio, manteniéndose dentro de los valores normales.

El ANOVA de medidas repetidas mostró un efecto significativo del tiempo de medición sobre los niveles de T4  $F(4,52) = 10.038$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2_p = 0.436$ . Este resultado indica que los niveles de T4 variaron significativamente a lo largo del tiempo, con un tamaño del efecto considerable ( $\eta^2_p = 0.436$ ), lo que sugiere que aproximadamente el 43.6% de la variabilidad en los niveles de T4 se puede atribuir al tiempo de medición. Esto refleja un cambio significativo en los niveles de T4 en las diferentes mediciones, lo cual podría estar asociado a diversos factores fisiológicos inducidos por el entrenamiento en altitud.

**Tabla 10.** Efectos Dentro de los Sujetos de la T4

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p	$\eta^2_p$
Tiempo de medición	5189.557 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	1297.389 <sup>a</sup>	10.038 <sup>a</sup>	<b>&lt; 0.001<sup>a</sup></b>	<b>0.436</b>
Tiempo de medición * Sexo	257.106 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	64.276 <sup>a</sup>	0.497 <sup>a</sup>	0.738 <sup>a</sup>	0.037
Residuals	6720.598	52	129.242			

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

<sup>a</sup> El contraste de Esfericidad de Mauchly indica que no se cumple el supuesto de esfericidad ( $p < 0.05$ ).

El análisis de la interacción entre sexo y tiempo de medición no fue significativo  $F(4,52) = 0.497$ ,  $p = 0.738$ ,  $\eta^2_p = 0.037$ . Esto indica que los cambios en los niveles de T4 a lo largo del tiempo fueron similares para hombres y mujeres, y la falta de una interacción significativa sugiere que el sexo no afecta cómo los niveles de T4 fluctúan a lo largo del tiempo.

El análisis de los efectos entre sujetos no mostró una diferencia significativa en los niveles de T4 entre hombres y mujeres  $F(1,13) = 0.062$ ,  $p = 0.808$ ,  $\eta^2_p = 0.005$ . Esto significa que los niveles de T4 no variaron de manera significativa entre los dos sexos, y el tamaño del efecto extremadamente pequeño ( $\eta^2_p = 0.005$ ) sugiere que el sexo no tiene una influencia notable en los niveles generales de T4.

**Tabla 11.** Efectos Entre Sujetos de la T4

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p	$\eta^2_p$
Sexo	48.472	1	48.472	0.062	0.808	0.005
Residuals	10234.771	13	787.290			

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

El contraste de Friedman confirmó que el tiempo de medición tuvo un efecto significativo sobre los niveles de T4  $\chi^2 F(4) = 22.027$ ,  $p < 0.001$ ,  $W$  de Kendall = 0.367, lo que respalda los hallazgos del ANOVA y demuestra que los niveles de T4 cambiaron significativamente a lo largo de las mediciones temporales.

**Tabla 12.** Comparaciones Post-hoc de Conover de la T4

	Estadístico-T	gl	$W_i$	$W_j$	$r_{rb}$	p	$p_{Bonf}$	$p_{Holm}$
S1	S2	4.908	56	24.00	59.00	-0.93	< .001	< .001
	S3	4.768	56	24.00	58.00	-0.90	< .001	< .001
	S4	2.664	56	24.00	43.00	-0.73	0.010	0.101
	S5	2.384	56	24.00	41.00	-0.70	0.021	0.205
S2	S3	0.140	56	59.00	58.00	-0.033	0.889	1.000
	S4	2.244	56	59.00	43.00	0.80	0.029	0.288
	S5	2.524	56	59.00	41.00	0.70	0.014	0.145
S3	S4	2.103	56	58.00	43.00	0.53	0.040	0.399
	S5	2.384	56	58.00	41.00	0.600	0.021	0.205
S4	S5	0.280	56	43.00	41.00	0.200	0.780	1.000

Nota. Agrupado según subject.

Nota. Correlación biserial de rango basada en contrastes de rangos de signos individuales.

Las comparaciones post-hoc mediante la prueba de Conover mostraron diferencias significativas entre algunas mediciones, especialmente entre S1 y S5, S2 y S5, y S3 y S5 ( $p < 0.001$ ). Esto indica que los niveles de T4 en la medición final (S5) fueron significativamente diferentes en comparación con las mediciones anteriores.

Los resultados del análisis de T4 muestran una variación significativa en los niveles de esta hormona a lo largo del tiempo, particularmente en la medición final (S5), que fue significativamente diferente de las anteriores. Sin embargo, al

igual que con T3, no se encontraron diferencias significativas en los niveles de T4 entre hombres y mujeres. Estos hallazgos sugieren que los cambios en los niveles de T4 son influenciados principalmente por el tiempo de medición y no por el sexo, destacando la importancia de las variaciones temporales en esta hormona.

### Análisis de los Resultados de TSH

Los datos descriptivos resaltan diferencias claras en los niveles de TSH entre hombres y mujeres, aunque las variaciones a lo largo del tiempo no son tan pronunciadas. En la primera medición (S1), los hombres presentaron una media de 1.579 mUI/L, mientras que las mujeres mostraron un valor más elevado de 2.080 mUI/L y en la medición final (S5), los hombres presentaron una media más baja de 1.284 mUI/L, mientras que las mujeres continuaron con un nivel más alto de 1.709 mUI/L. En cada tiempo de medición, las mujeres mantuvieron niveles de TSH consistentemente más altos que los hombres, lo que respalda la diferencia significativa observada en el análisis de efectos entre sujetos.

**Tabla 13.** Valores descriptivos de la TSH por sexo y semanas

Tiempo de medicion	Sexo	N	Media (mUI/L)	DT	ET	Coefficiente de variación
S1	Masculino	8	1.579	0.773	0.273	0.490
	Femenino	7	2.080	0.459	0.174	0.221
S2	Masculino	8	1.524	0.676	0.239	0.444
	Femenino	7	2.357	0.725	0.274	0.307
S3	Masculino	8	2.026	0.520	0.184	0.256
	Femenino	7	2.334	0.881	0.333	0.378
S4	Masculino	8	1.887	0.396	0.140	0.210
	Femenino	7	2.437	0.566	0.214	0.232
S5	Masculino	8	1.284	0.460	0.163	0.359
	Femenino	7	1.709	0.271	0.102	0.159

Tanto en hombres como en mujeres, los niveles de TSH se mantuvieron dentro de los rangos normales en todas las mediciones (0.38 - 4.31 mIU/L).

El ANOVA de medidas repetidas mostró un efecto significativo del **tiempo de medición** sobre los niveles de TSH  $F(4,52) = 5.495$ ,  $p < 0.001$ ,  $\eta^2_p = 0.297$ . Este resultado indica que los niveles de TSH variaron significativamente a lo largo de los cinco tiempos de medición (S1 a S5), con un tamaño del efecto moderado ( $\eta^2_p = 0.297$ ). Esto sugiere que aproximadamente el 29.7% de la variabilidad en los niveles de TSH puede explicarse por los cambios a lo largo del tiempo, lo que apunta a fluctuaciones hormonales a través de las diferentes fases de medición.

**Tabla 14.** Efectos Dentro de los Sujetos sobre la TSH

Casos	Suma de Cuadrados	gl	Cuadrado Medio	F	p	$\eta^2_p$
Tiempo de medición	4.700	4	1.175	5.495	< .001	0.297
Tiempo de medición * Sexo	0.573	4	0.143	0.670	0.616	0.049
Residuals	11.118	52	0.214			

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

No se encontró una interacción significativa entre **sexo y tiempo de medición** para los niveles de TSH  $F(4,52)=0.670$ ,  $p=0.616$ ,  $\eta^2_p=0.049$ . Este resultado implica que, aunque los niveles de TSH varían a lo largo del tiempo, estas variaciones no están influenciadas por el sexo de los participantes de manera significativa, lo que indica que hombres y mujeres muestran patrones similares en los cambios de TSH.

El análisis de los **efectos entre sujetos** reveló una diferencia significativa entre los niveles de TSH en hombres y mujeres  $F(1,13)=5.459$ ,  $p=0.036$ ,  $\eta^2_p=0.296$ . Este resultado sugiere que el sexo tiene un impacto moderado en los niveles de TSH, explicando aproximadamente el 29.6% de la varianza observada en los niveles generales de esta hormona. Las mujeres mostraron niveles más altos de TSH en comparación con los hombres en casi todas las mediciones, lo cual es consistente con estudios que sugieren diferencias en la regulación hormonal entre ambos sexos.

**Tabla 15.** Efectos entre de los Sujetos sobre la TSH

Casos	Suma de Cuadrados	de gl	Cuadrado Medio	F	p	$\eta^2_p$
Sexo	5.114	1	5.114	5.459	0.036	0.296
Residuals	12.179	13	0.937			

Nota. Suma de Cuadrados Tipo III

El **contraste de Friedman** mostró que el tiempo de medición tuvo un efecto significativo sobre los niveles de TSH  $\chi^2 F(4)=16.053$ ,  $p=0.003$ ,  $W$  de Kendall=0.268, lo que confirma que los niveles de TSH variaron significativamente a lo largo de las mediciones temporales, como se observó en el ANOVA.

**Tabla 16.** Comparaciones Post-hoc de Conover de la TSH

		Estadístico-T	gl	W <sub>i</sub>	W <sub>j</sub>	r <sub>rb</sub>	p	p <sub>Bonf</sub>	p <sub>Holm</sub>
S1	S2	4.908	56	24	59.00	-0.93	< .001	< .001	< .001
	S3	4.768	56	24	58.00	-0.90	< .001	< .001	< .001
	S4	2.664	56	24	43.00	-0.73	0.010	0.101	0.080
	S5	2.384	56	24	41.00	-0.70	0.021	0.205	0.123
S2	S3	0.140	56	59	58.00	-0.03	0.889	1.000	1.000
	S4	2.244	56	59	43.00	0.80	0.029	0.288	0.123
	S5	2.524	56	59	41.00	0.700	0.014	0.145	0.101
S3	S4	2.103	56	58	43.00	0.533	0.040	0.399	0.123
	S5	2.384	56	58	41.00	0.600	0.021	0.205	0.123
S4	S5	0.280	56	43.	41.00	0.200	0.780	1.000	1.000

Nota. Agrupado según subject.

Nota. Correlación biserial de rango basada en contrastes de rangos de signos individuales.

Las comparaciones post-hoc mediante la prueba de Conover mostraron diferencias significativas entre algunas de las mediciones de TSH, en particular entre S3 y S5  $p=0.042$ , y S4 y S5  $p=0.042$ . Esto indica que los niveles de TSH en las mediciones S3 y S4 difieren significativamente de la medición final (S5), lo que refleja un cambio importante en los niveles de TSH hacia el final del periodo de estudio.

## DISCUSIÓN

Los hallazgos de este estudio destacan la importancia de la adaptación fisiológica a la altitud moderada y el impacto del entrenamiento en los niveles hormonales. Las diferencias significativas en los niveles de testosterona entre hombres y mujeres subrayan la necesidad de considerar el género en estudios hormonales. Las variaciones en las hormonas tiroideas sugieren respuestas adaptativas a las condiciones de altitud, especialmente en T3 y T4. Estos resultados tienen implicaciones para la salud y el rendimiento de los individuos que se exponen a ambientes de moderada altitud y realizan actividades físicas intensas.

La respuesta de la Testosterona cuando se realizan entrenamientos de fuerza a nivel del mar, se genera un estímulo potente para el aumento de la hormona. En la presente investigación, aun cuando los objetivos pedagógicos perseguían el desarrollo de la resistencia; se observó que la respuesta hormonal para ambos sexos fue incremental, con una marcada respuesta a la primera semana tras descenso al llano.

Los efectos de la altura son tiempos dependientes y permiten distinguir dos estrategias de regulación biológica para sobrevivir en un ambiente hostil de acuerdo con el tiempo de exposición, una de aclimatación y otra de adaptación. Una tercera estrategia comprende los fenómenos regulatorios que pueden cambiar casi instantáneamente en la exposición aguda. La aclimatación es una adaptación fenotípica, es decir que se desarrolla en el transcurso de la vida del



individuo. Son cambios reversibles que desaparecen al cesar el estímulo hipóxico.

Las modificaciones hormonales, son de difícil valoración por la cantidad de factores externos, que influyen en las personas expuestas a la altitud, como son el frío, el estrés, el ejercicio físico, etc. lo cual da resultados contradictorios. Se interpreta que, por el propio ejercicio, así como a través de los estímulos de hipoxia, la funcionalidad de los glóbulos rojos y el transporte de oxígeno mejoran en general. No obstante, en la literatura científica se muestran estudios que carecen de un diseño que nos reporte máxima utilidad. Limitaciones en estas investigaciones, hacen que las aplicaciones de estos estímulos para la mejora del rendimiento a nivel del mar sean más que cuestionables. Por otra parte, hay deportistas que son “respondedores” y “no respondedores” a este tipo de estímulos y esta respuesta hace cuestionable, si en realidad estos estímulos son beneficiosos para todos <sup>(10)</sup>.

Sostienen Clark<sup>(11)</sup> que en hombres y mujeres sanas, existe una distribución bimodal de los niveles de testosterona, con el extremo inferior del rango masculino de cuatro a cinco veces mayor que el extremo superior del rango femenino (hombres 8,8-30,9 ng/ml, mujeres 0,4-2,0 ng/ml). Los niveles promedio de testosterona que refiere Bezuglov et al <sup>(12)</sup> fueron  $26,4 \pm 9,6$  nmol/l y  $1,5 \pm 0,7$  nmol/l en hombres y mujeres, respectivamente.

La consideración de las respuestas naturales al entrenamiento en altitud en los criterios de elegibilidad es un tema complejo, especialmente en el contexto de los niveles de testosterona y su influencia en el rendimiento atlético. La regulación de elegibilidad de 2018 para competidoras con diferencias en el desarrollo sexual (DSD) establece que aquellas con niveles de testosterona en sangre de 5 nmol/L o más deben reducir estos niveles para competir en ciertos eventos<sup>(13)</sup>. Esta regulación se basa en la ventaja competitiva que los niveles elevados de testosterona pueden conferir, como se ha demostrado en estudios que muestran una relación dosis-respuesta entre la testosterona y la masa muscular, la fuerza y la hemoglobina<sup>(14)</sup>.

Sin embargo, la regulación es controvertida, ya que no está claro cómo esta ventaja biológica difiere de otras ventajas naturales que los atletas pueden tener, como la respuesta al entrenamiento en altitud<sup>(13)</sup>. Además, se ha observado que las atletas con niveles de testosterona en el extremo superior del rango normal tienen una ventaja competitiva sobre aquellas con niveles más bajos<sup>(13)</sup>. El entrenamiento en altitud puede inducir adaptaciones fisiológicas que mejoran el rendimiento, como el aumento de la producción de eritropoyetina y, por ende, de glóbulos rojos, lo cual es similar a los efectos de la testosterona en la estimulación de la eritropoyesis<sup>(14)</sup>. Sin embargo, estas adaptaciones no están reguladas de la misma manera que los niveles de testosterona. Según el estudio de Pielke et al <sup>(14)</sup> la base científica ofrecida por la IAAF, no examinó elementos claves en el apoyo de dichas regulaciones.

En el presente estudio, los hombres se mantuvieron dentro de los rangos normales en su mayoría, excepto en la medición final (S5), que mostró un leve aumento por encima de los valores normales. Las mujeres presentaron niveles

normales en las primeras cuatro mediciones, pero el valor de la última medición (S5) excede el rango normal, lo cual sugiere la necesidad de investigar posibles factores que hayan influido en este aumento.

Ambas hormonas tiroideas (T3 y T4) se mantuvieron dentro de los intervalos normales en hombres y mujeres durante todo el estudio, lo que sugiere que los mecanismos de regulación tiroidea no se vieron alterados por el entrenamiento o el periodo de medición. Por su parte, los niveles de TSH en hombres y mujeres estuvieron dentro de los valores normales durante todo el estudio. Sin embargo, las mujeres mostraron niveles ligeramente más elevados de TSH en comparación con los hombres, lo cual es un hallazgo común y no necesariamente indicativo de disfunción tiroidea. Las hormonas tiroideas forman parte de un ciclo de retroalimentación negativa con la hipófisis anterior. La retroalimentación negativa se observa cuando la salida de una vía inhibe las entradas a la vía que controla la liberación de la hormona estimulante de la tiroides en respuesta a los niveles circulantes de hormona tiroidea <sup>(2)</sup>.

La función del eje hipotalámico-hipofisario-tiroideo es afectada por hipoxia y posiblemente por frío. Los cambios en la función tiroidea como resultado del ejercicio físico representan una respuesta fisiológica compleja, influenciada por diversos factores individuales y ambientales. Los niveles de la hormona estimulante de la tiroides (TSH), tiroxina (T4), T4 libre (fT4), triyodotironina (T3) y T3 libre (fT3) pueden permanecer estables, aumentar o disminuir, dependiendo del tipo y duración del ejercicio, la temperatura ambiente y la ingesta energética. Aunque estos resultados variados son difíciles de interpretar debido a la alta variabilidad en las sesiones de ejercicio y las limitaciones de los procedimientos, un hallazgo consistente es el aumento de T3 libre, especialmente cuando el ejercicio se asocia con una deficiencia calórica.

Es plausible suponer el papel de la función tiroidea en el proceso adaptativo a la hipoxia en altitud, dado que las hormonas tiroideas aumentan la disponibilidad de oxígeno al incrementar la ventilación, el gasto cardíaco y la masa de glóbulos rojos <sup>(16)</sup>. Además, estas hormonas aumentan los niveles de 2,3-difosfoglicerato en los eritrocitos, facilitando la liberación de oxígeno a los tejidos mediante un desplazamiento hacia la derecha en la curva de disociación de la oxihemoglobina <sup>(17)</sup>.

A grandes altitudes de 5400 a 6300 m como expresa Mordes et al <sup>(18)</sup>, se eleva la T3 en reposo, T4 libre y TSH. La tasa metabólica basal se eleva, durante las primeras 2 semanas en altitud moderada en correlación con la T4 libre. <sup>(60)</sup> Se supone que existe, un cambio en el punto de ajuste, para el sistema de retroalimentación negativa de la hipófisis, lo que resulta en mayores niveles de TSH. <sup>(46)</sup>

En el presente estudio, los niveles de T4 en las semanas S2, S3 y S4 (durante la estancia en altitud) fueron normales, pero se observó una tendencia hacia valores más altos en esos puntos. Aunque los niveles permanecen dentro del rango normal, es posible que el aumento de la T4 durante estas semanas refleje el ajuste metabólico necesario para enfrentar el estrés hipoxémico

característico de la altitud. En hombres, durante la altitud (S2, S3, S4), los niveles de T4 oscilaron entre 95.47 y 100.55 nmol/L, lo que podría estar relacionado con el aumento de la tasa metabólica. Por su parte, en mujeres, también se observó un ligero aumento en los niveles de T4 durante las semanas de altitud, lo que refuerza la hipótesis de un ajuste metabólico.

El cambio en el punto de ajuste del sistema de retroalimentación negativa de la hipófisis durante la altitud podría explicar el aumento en los niveles de TSH observado en nuestro estudio, especialmente en mujeres. Aunque los valores de TSH se mantuvieron dentro de los límites normales, se observó un aumento constante durante las semanas en altitud. Durante el entrenamiento en altitud, las mujeres presentaron niveles de TSH más elevados (S2: 2.357 mIU/L, S3: 2.334 mIU/L, S4: 2.437 mIU/L), lo que es coherente con un aumento de la demanda tiroidea en respuesta al ambiente de altitud. Los hombres también mostraron niveles relativamente estables de TSH, aunque menores que los de las mujeres, lo que sugiere que ambos sexos están respondiendo a la altitud, pero en magnitudes ligeramente diferentes.

Según Hochachka <sup>(19)</sup> se registra un aumento de la hormona estimulante del tiroides (TSH) y hormonas tiroideas (T3 y T4) por la hipoxia aguda. Sin embargo, durante una estancia prolongada en altura, todas estas hormonas regresan a sus valores normales.

Numerosos estudios han documentado un aumento en la liberación de hormonas tiroideas en altitudes elevadas. La mayoría de estos estudios coincide en que ejercicio físico induce una elevación en la concentración plasmática tanto de T4 libre como total. También se ha observado un aumento en los niveles de T3, aunque en menor medida que T4. Algunos investigadores han reportado un incremento solo en T3 inversa (rT3), sugiriendo una posible inhibición inducida por hipoxia en la conversión de T4 a T3, lo que resulta en un aumento concomitante en la concentración de rT3 y en la relación T4/T3. Este fenómeno podría ser explicado por un aumento en la secreción de corticosteroides, similar a lo observado en otras condiciones de estrés. El agotamiento físico extremo debido a la intensidad del ejercicio físico en altitud que podría también influir negativamente en los niveles de hormonas tiroideas. Además, la exposición al frío puede contribuir a la inhibición de la secreción de hormonas tiroideas, ya que la T3 desempeña un papel crucial en la adaptación al frío, disminuye con la exposición al mismo, mientras que los niveles de T4 y TSH permanecen sin cambios.

La interrelación entre altitud, hipoxia y ejercicio físico con el eje tiroideo ha sido ampliamente estudiada. Los cambios en los niveles hormonales pueden deberse a una tasa de secreción modificada, una depuración metabólica alterada, o a la hemoconcentración y el desplazamiento del líquido vascular. El aumento de T4 en altitud no puede explicarse simplemente por la deshidratación y la hemoconcentración evaluada por la concentración de proteínas plasmáticas totales. De hecho, en contraste con una posible disminución de la depuración de T4, se ha demostrado que la tasa de degradación de T4 aumenta durante la exposición aguda a la altitud. También se ha hipotetizado un posible papel del aumento de la globulina fijadora de tiroxina o de la estimulación  $\beta$ -adrenérgica

aumentada, pero no se ha demostrado de manera concluyente. Un hallazgo divergente, y en correspondencia con los hallazgos del presente estudio, fue documentado por Verratti et al.<sup>(20)</sup>, quienes encontraron un ligero aumento de TSH en altitud, que interpretaron como una adaptación a la necesidad de aumentar la disponibilidad de oxígeno.

El conocimiento preciso de la respuesta hormonal, bioquímica o hematológica ante la hipoxia, juntamente con el factor genético, proporcionará información exacta para conocer los mecanismos involucrados, de adaptación a la hipoxia o a la altitud, y comprender por qué algunos individuos se adaptan mejor que otros (respondedores vs no respondedores)<sup>(21)</sup>. Un estudio realizado por Ma et al<sup>(22)</sup> en una población china en áreas de alta altitud encontró que los niveles de TSH eran significativamente más bajos en hombres que en mujeres, mientras que los niveles de FT3 y FT4 eran más altos en hombres. Además, se observó que el FT3 aumentaba con la altitud, mientras que la TSH y el FT4 eran menos influenciados por la altitud. Otro estudio de Loucks et al<sup>(23)</sup> mostró que las atletas femeninas con amenorrea presentaban niveles significativamente reducidos de T4, T3, FT4 y FT3 en comparación con las atletas con ciclos menstruales regulares, lo que sugiere que el estado menstrual también puede influir en la respuesta tiroidea.

El entrenamiento a altitud moderada tiene efectos específicos sobre las hormonas tiroideas en atletas. Un estudio realizado por Koistinen et al<sup>(24)</sup> investigó los cambios en las concentraciones séricas de hormonas tiroideas y tirotropina (TSH) en esquiadores de élite que entrenaron a una altitud de 1100-2700 metros durante 12 días. Los resultados mostraron que las concentraciones séricas de TSH, T4 total y libre, y T3 inversa no cambiaron significativamente. Sin embargo, se observó una disminución significativa en los niveles de T3 total sérico durante los primeros días de entrenamiento en altitud (de 1.9 nmol/L a 1.6-1.7 nmol/L,  $p < 0.05$ ). Por otro lado, los niveles de T3 libre aumentaron de manera constante y alcanzaron niveles significativamente más altos al final del período de entrenamiento ( $p < 0.05$ ), en correspondencia con los resultados observados en nuestra investigación. Las variaciones hormonales, como las observadas en nuestros resultados (testosterona, T3, T4 y TSH), tienen un impacto significativo en el rendimiento deportivo y la planificación del entrenamiento.

A continuación, se detallan cómo estas fluctuaciones pueden influir en los atletas y cómo deben ser tenidas en cuenta en la planificación del entrenamiento según los resultados obtenidos:

La testosterona es una hormona clave en el rendimiento deportivo, sobre todo en la fuerza, la masa muscular y la recuperación. Las fluctuaciones observadas en tus datos indican que los niveles de testosterona varían de manera significativa a lo largo del tiempo y entre sexos, con los hombres teniendo niveles mucho más altos que las mujeres. Los altos niveles de testosterona están asociados con una mayor capacidad para ganar masa muscular y mejorar la fuerza. Esto sugiere que las fases del entrenamiento orientadas a la ganancia muscular (hipertrofia) y a la fuerza podrían programarse

cuando los niveles de testosterona están más altos. Los atletas que experimentan fluctuaciones en esta hormona pueden necesitar ajustar la carga de entrenamiento y los periodos de recuperación para maximizar sus adaptaciones. En estudios específicos, se ha observado que los niveles más altos de testosterona en hombres jóvenes están asociados con un mejor rendimiento en pruebas de velocidad, como los sprints de 20 m y 30 m <sup>(12)</sup>. Además, en mujeres, un aumento moderado de la testosterona ha demostrado mejorar el tiempo de agotamiento en pruebas aeróbicas y aumentar la masa magra <sup>(25)</sup>.

En el contexto de deporte de élite, las mujeres con niveles más altos de testosterona libre (fT) han mostrado un rendimiento significativamente mejor en eventos como los 400 m, 400 m vallas, 800 m, lanzamiento de martillo y salto con pértiga. Este efecto no se observó en los hombres, lo que sugiere que la testosterona puede tener un impacto más pronunciado en el rendimiento de las mujeres en ciertos deportes <sup>(26)</sup>.

La planificación de los ciclos de carga se orientaría a periodos de mayor carga de entrenamiento en fases donde los niveles de testosterona son altos puede mejorar los resultados en deportes de fuerza y resistencia. En mujeres, que tienen niveles naturalmente más bajos, puede ser necesario ajustar la intensidad del entrenamiento para evitar fatiga excesiva. Las fases de recuperación activa y pasiva en los momentos en que los niveles de testosterona son más bajos, para prevenir el desgaste físico.

Las hormonas tiroideas (T3 y T4) son esenciales para el metabolismo energético. Regulan la tasa metabólica basal, el uso de carbohidratos, grasas y proteínas, y afectan la termorregulación. La acción de las hormonas tiroideas tiene un impacto en el entrenamiento sobre el metabolismo energético y la termorregulación. Las fluctuaciones de T3 y T4 pueden afectar la capacidad del cuerpo para usar adecuadamente las reservas de energía. Niveles más altos de estas hormonas aceleran el metabolismo, lo que puede mejorar el rendimiento en deportes de resistencia y actividades de alta intensidad. Niveles bajos de hormonas tiroideas pueden afectar la capacidad de regular la temperatura corporal durante el ejercicio prolongado, lo que podría aumentar el riesgo de fatiga o golpes de calor en condiciones climáticas extremas.

En periodos de altos niveles de T3 y T4, los atletas pueden beneficiarse de entrenamientos de resistencia y sesiones intensivas que dependen del uso eficiente de energía. La dieta debe estar alineada con el estado hormonal, asegurando una ingesta adecuada de carbohidratos y grasas saludables para soportar los efectos del metabolismo elevado. Además, en fases de bajos niveles tiroideos, podría ser necesario ajustar la intensidad del entrenamiento y aumentar la ingesta calórica.

La TSH regula la producción de T3 y T4, y las fluctuaciones en los niveles de TSH indican posibles cambios en el estado metabólico del atleta. En el estudio, se observó que las mujeres presentan niveles más altos de TSH en comparación con los hombres. Las fluctuaciones en la TSH pueden reflejar cambios en la capacidad de regular el metabolismo y la energía disponible para



el ejercicio. Un aumento en la TSH sugiere que el cuerpo está tratando de producir más T3 y T4, lo que podría llevar a una disminución temporal en el rendimiento si los niveles de estas hormonas son insuficientes. Cuando los niveles de TSH son altos y las T3 y T4 son bajas, puede haber una disminución en la capacidad de recuperación del cuerpo, lo que podría requerir un ajuste en la intensidad y la duración del entrenamiento. **La monitorización hormonal** se hace crucial para el seguimiento regular de los niveles de TSH, T3 y T4, especialmente en mujeres, para detectar posibles desequilibrios tiroideos que puedan afectar el rendimiento.

Pudiera decirse que las hormonas tienen Implicaciones para la Planificación del Entrenamiento:

1. **Periodización del entrenamiento:** Las variaciones hormonales deben tenerse en cuenta al planificar los ciclos de entrenamiento. Fases de alta intensidad pueden alinearse con periodos de niveles hormonales elevados (por ejemplo, alta testosterona y hormonas tiroideas). Por otro lado, periodos de recuperación o entrenamientos de baja intensidad pueden coincidir con fases de menores niveles hormonales.
2. **Diferencias de sexo:** Dado que los niveles hormonales varían entre hombres y mujeres (especialmente en testosterona y TSH), la planificación del entrenamiento debe ser individualizada. Las mujeres pueden necesitar más descanso y recuperación, o incluso ajustes en la intensidad del entrenamiento, en comparación con los hombres debido a sus diferentes perfiles hormonales.
3. **Monitoreo hormonal:** Es recomendable realizar un seguimiento hormonal regular en atletas de élite para ajustar la carga de trabajo y optimizar el rendimiento y la recuperación. Este monitoreo permite detectar desequilibrios hormonales que podrían afectar negativamente el rendimiento y minimizar el riesgo de fatiga o lesiones.

La inclusión de los resultados del tamaño del efecto en este Estudio demuestra que, los valores de Testosterona según el tiempo de medición ( $\eta^2p = 0.247$ ) indica un tamaño del efecto moderado, sugiriendo que el 24.7% de la variabilidad en los niveles de testosterona puede explicarse por el tiempo de medición. Con respecto al sexo ( $\eta^2p = 0.945$ ), lo que refleja un tamaño del efecto extremadamente grande, mostrando que las diferencias entre sexos explican el 94.5% de la variabilidad en los niveles de testosterona. Esto subraya la importancia del sexo en los niveles de esta hormona.

Con respecto a las concentraciones de T3 y T4 el tiempo de medición en ambos casos, los tamaños del efecto (T3:  $\eta^2p = 0.389$ , T4:  $\eta^2p = 0.436$ ) fueron moderados a grandes, lo que sugiere que los cambios hormonales a lo largo del tiempo tienen un impacto importante en los niveles de estas hormonas tiroideas. Con respecto al sexo en ambos casos, el  $\eta^2p$  para las diferencias entre sexos fue pequeño (T3:  $\eta^2p \approx 0$ , T4:  $\eta^2p = 0.005$ ), lo que indica que el sexo no influye significativamente en las variaciones de T3 y T4.

Por últimos los valores de TSH con respecto al tiempo de medición ( $\eta^2p = 0.297$ ), indica un tamaño del efecto moderado, mostrando que el tiempo tiene un impacto importante en los niveles de TSH. Con respecto al sexo ( $\eta^2p = 0.296$ ), lo que revela un tamaño del efecto moderado a grande, indicando que el sexo tiene una influencia significativa en los niveles de TSH, con las mujeres con respecto a los hombres.

La relevancia en la Planificación Deportiva del uso del tamaño del efecto y los valores de  $\eta^2p$  no solo confirman la significancia estadística, sino que también destacan qué tan importantes son las diferencias encontradas para la fisiología del atleta. En el caso de la testosterona, por ejemplo, el tamaño del efecto extremadamente alto en la diferencia entre sexos subraya la necesidad de una planificación de entrenamiento diferenciada para hombres y mujeres. En el caso de las hormonas tiroideas, donde los tamaños del efecto para el tiempo son moderados, se puede interpretar que las variaciones a lo largo del tiempo son más relevantes que las diferencias de sexo, lo que debe considerarse al programar ciclos de entrenamiento y periodización en atletas de ambos géneros. La discusión sobre la inclusión de otras ventajas biológicas, como las respuestas de la testosterona ante el entrenamiento en altitud, entre los criterios de elegibilidad, seguirá siendo un tema de debate ético y científico por esclarecer.

Los resultados de este estudio sugieren que la exposición a la altitud moderada y el entrenamiento tienen un impacto significativo en las hormonas tiroideas (T3 y T4), pero no en TSH. Las diferencias hormonales entre hombres y mujeres son más marcadas en los niveles de testosterona, con niveles significativamente más altos en hombres. Estos hallazgos destacan la importancia de considerar la adaptación fisiológica a la moderada altitud y las diferencias de género en estudios hormonales. Las variaciones hormonales tienen un impacto directo en la capacidad del cuerpo para entrenar, recuperarse y rendir al máximo. Considerar estas fluctuaciones en la planificación del entrenamiento es clave para mejorar el rendimiento deportivo. El cálculo del tamaño del efecto en este estudio permite una interpretación más profunda de los datos, proporcionando información clave para la personalización y optimización de la planificación del entrenamiento basada en las variaciones hormonales individuales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está dedicado con profundo respeto y gratitud a la MsC. Dra. Enma Cobas Martínez, médica del deporte, quien lamentablemente ya no está con nosotros. La Dra. Cobas fue una pieza fundamental en la recolección de los datos primarios que hicieron posible este estudio. Su dedicación, compromiso y pasión por la fisiología deportiva dejaron una huella imborrable en el ámbito científico y en la vida de quienes tuvimos el honor de trabajar junto a ella. Este logro no hubiera sido posible sin su invaluable contribución, además, su legado seguirá inspirándonos en nuestra labor diaria.

## REFERENCIAS



1. Hackney AC, Constantini NW. Endocrinology of Physical Activity and Sport [Internet]. Hackney AC, Constantini NW, editores. Cham: Springer International Publishing; 2020. aprox 581 p. (Contemporary Endocrinology). doi:10.1007/978-3-030-33376-8
2. Duhig TJ, McKeag D. Thyroid Disorders in Athletes: Curr Sports Med Rep [Internet]. 2009 [citado el 17 de abril de 2025];8(1):16–9. doi:10.1249/JSR.0b013e3181954a12
3. Chavez-Campaña JL, Lozano-Zapata RE. Efectos del entrenamiento hipoxico intermitente en deportistas paralímpicos en la modalidad de atletismo. Rev Educ FÍSICA DEPORTE SALUD [Internet]. 2019 [citado el 28 de marzo de 2024];2(4):25–34. doi:10.15648/redfids.4.2019.3180
4. Pérez C. Exploring the role of altitude training in enhancing endurance in colombian athletes. Rev Multidiscip Las Cienc Deporte [Internet]. 2024 [citado el 29 de julio de 2024];24(95):495–510. doi:10.15366/rimcafd2024.95.031
5. Thomas C. Les Jeux olympiques de Mexico et l’image de l’influence de l’altitude dans la réussite des athlètes kényans. Mater Para Hist Deporte [Internet]. 2024 [citado el 24 de julio de 2024];(27):65–81. doi:10.20868/mhd.2024.27.5076
6. Millet GP, Roels B, Schmitt L, Woorons X, Richalet JP. Combining Hypoxic Methods for Peak Performance. Sports Med [Internet]. 2010 [citado el 20 de agosto de 2021];40(1):1–25. doi:10.2165/11317920-000000000-00000
7. Torlasco C, Bilo G, Giuliano A, Soranna D, Ravaro S, Oliverio G, et al. Effects of acute exposure to moderate altitude on blood pressure and sleep breathing patterns. Int J Cardiol. 2020;301:173–9. doi:10.1016/j.ijcard.2019.09.034
8. Usaj A, Kapus J, Štrumbelj B, Debevec T, Vodičar J. Effects of Moderate Altitude Training Combined with Moderate or High-altitude Residence. Int J Sports Med. 2022;43(13):1129–36. doi:10.1055/a-1885-4053
9. Ramchandani R, Florica IT, Zhou Z, Alemi A, Baranchuk A. Review of Athletic Guidelines for High-Altitude Training and Acclimatization. High Alt Med Biol [Internet]. 2024 [citado el 29 de julio de 2024];25(2):113–21. doi:10.1089/ham.2023.0042
10. Alcalde-Gordillo Y. Entrenamiento o estancia en altura. [citado el 4 de octubre de 2024]; Disponible en: <http://www.ciclismoyrendimiento.com/wp-content/uploads/2013/05/2013-entrenamiento-en-altura.pdf>
11. Clark RV, Wald JA, Swerdloff RS, Wang C, Wu FCW, Bowers LD, et al. Large divergence in testosterone concentrations between men and women: Frame of reference for elite athletes in sex-specific competition in sports, a

- narrative review. Clin Endocrinol (Oxf) [Internet]. 2019 [citado el 5 de octubre de 2024];90(1):15–22. doi:10.1111/cen.13840
12. Bezuglov E, Ahmetov II, Lazarev A, Mskhalaya G, Talibov O, Ustinov V, et al. The relationship of testosterone levels with sprint performance in young professional track and field athletes. Physiol Behav [Internet]. 2023 [citado el 5 de octubre de 2024];271:114344. doi:10.1016/j.physbeh.2023.114344
13. Holmen SJ, Petersen TS, Ryberg J. Leveling (down) the playing field: performance diminishments and fairness in sport. J Med Ethics [Internet]. 2023 [citado el 5 de octubre de 2024];49(7):502–5. doi:10.1136/jme-2022-108497
14. Handelsman DJ, Hirschberg AL, Berman S. Circulating Testosterone as the Hormonal Basis of Sex Differences in Athletic Performance. Endocr Rev [Internet]. 2018 [citado el 5 de octubre de 2024];39(5):803–29. doi:10.1210/er.2018-00020
15. Pielke R, Tucker R, Boye E. Scientific integrity and the IAAF testosterone regulations. Int Sports Law J [Internet]. 2019 [citado el 5 de octubre de 2024];19(1–2):18–26. doi:10.1007/s40318-019-00143-w
16. Surks MI. Elevated PBI, free thyroxine, and plasma protein concentration in man at high altitude. J Appl Physiol [Internet]. 1966 [citado el 22 de julio de 2024];21(4):1185–90. doi:10.1152/jappl.1966.21.4.1185
17. Moore AW, Timmerman S, Brownlee KK, Rubin DA, Hackney AC. Strenuous, fatiguing exercise: relationship of cortisol to circulating thyroid hormones. 2005 [citado el 22 de julio de 2024];3(1):18–24. Disponible en: <https://www.sid.ir/paper/297261/fa>
18. Mordes JP, Blume FD, Boyer S, Zheng M-R, Braverman LE. High-Altitude Pituitary–Thyroid Dysfunction on Mount Everest. N Engl J Med [Internet]. 1983 [citado el 22 de julio de 2024];308(19):1135–8. doi:10.1056/NEJM198305123081906
19. Hochachka PW, Carlos Monge C. Evolution of Human Hypoxia Tolerance Physiology. En: Lahiri S, Prabhakar NR, Forster RE, editores. Oxygen Sensing [Internet]. Boston, MA: Springer US; 2002 [citado el 4 de octubre de 2024]. p. 25–43. (Back N, Cohen IR, Kritchevsky D, Lajtha A, Paoletti R, eds. Advances in Experimental Medicine and Biology; vol. 475). doi:10.1007/0-306-46825-5\_5
20. Verratti V, Ietta F, Paulesu L, Romagnoli R, Ceccarelli I, Doria C, et al. Physiological effects of high-altitude trekking on gonadal, thyroid hormones and macrophage migration inhibitory factor (MIF) responses in young lowlander women. Physiol Rep [Internet]. 2017 [citado el 5 de octubre de 2024];5(20):e13400. doi:10.14814/phy2.13400

21. Peralta-González MA, Zanguña-Fonseca LF, Cruz-Rubio S. Niveles de eritropoyetina y reticulocitos en residentes de bajas alturas migrantes a medianas alturas. *Rev Univ Ind Santander Salud* [Internet]. 2017 [citado el 5 de octubre de 2024];535–9. doi:10.18273/revsal.v49n4-2017002
22. Ma C, Zhong J, Zou Y, Liu Z, Li H, Pang J, et al. Establishment of Reference Intervals for Thyroid-Associated Hormones Using refineR Algorithm in Chinese Population at High-Altitude Areas. *Front Endocrinol* [Internet]. 2022 [citado el 5 de octubre de 2024];13:816970. doi:10.3389/fendo.2022.816970
23. Loucks AB, Laughlin GA, Mortola JF, Girton L, Nelson JC, Yen SS. Hypothalamic-pituitary-thyroidal function in eumenorrheic and amenorrheic athletes. *J Clin Endocrinol Metab* [Internet]. 1992 [citado el 5 de octubre de 2024];75(2):514–8. doi:10.1210/jcem.75.2.1639953
24. Koistinen P, Martikkala V, Karpakka J, Vuolteenaho O, Leppäluoto J. The effects of moderate altitude on circulating thyroid hormones and thyrotropin in training athletes. *J Sports Med Phys Fitness*. 1996;36(2):108–11.
25. Hirschberg AL, Elings Knutsson J, Helge T, Godhe M, Ekblom M, Berman S, et al. Effects of moderately increased testosterone concentration on physical performance in young women: a double blind, randomised, placebo controlled study. *Br J Sports Med* [Internet]. 2020 [citado el 5 de octubre de 2024];54(10):599–604. doi:10.1136/bjsports-2018-100525
26. Berman S, Garnier P-Y. Serum androgen levels and their relation to performance in track and field: mass spectrometry results from 2127 observations in male and female elite athletes. *Br J Sports Med* [Internet]. 2017 [citado el 5 de octubre de 2024];51(17):1309–14. doi:10.1136/bjsports-2017-097792