Medicina U.P.B.
Revista de la Escuela de Ciencias de la Salud de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia / ISSN: 2357-6308 (En línea)

ARTÍCULO ORIGINAL

Cronobiología del rendimiento aeróbico y de potencia en hipoxia

Fecha de recepción:
27 de diciembre de 2025.
Fecha de aprobación:
7 de julio de 2026.

Chronobiology of aerobic and power performance in hypoxia

Cronobiologia do Desempenho Aeróbico e da Potência em Hipóxia

Iván-Leonardo Duque Vera[1], Isabella María Urrutia Illera[2], Víctor Hugo Arboleda Campo[3,4], Andrés Felipe Villaquirán Hurtado[2], José Hernán Parra Sánchez[5].

RESUMEN

Objetivo: comparar los valores de V̇O2max y potencia de pedaleo entre nativos andinos y no nativos aclimatados bajo condiciones de hipoxia hipobárica y establecer la influencia cronobiológica.

Métodos: estudio transversal que incluyó a 42 varones adultos sanos (24 nativos andinos y 18 no nativos aclimatados), quienes vivían a 2800 m sobre el nivel del mar y practican ejercicio 3 veces por semana. El V̇O2max, como la potencia máxima de pedaleo, se midió en cicloergómetro mañana y noche, y se compararon los valores promedio entre los grupos, para lo cual se utilizó una prueba t de Student para muestras independientes y t pareada para comparar los valores promedio de la misma variable a diferente hora en cada grupo de participantes.

Resultados: el V̇O2max fue significativamente mayor en los nativos andinos comparados con los no nativos aclimatados cuando los valores comparados fueron los medidos a las 7 a. m. y p. m. Por el contrario, la potencia máxima de pedaleo no mostró diferencias significativas cuando se midió en estos mismos tiempos. Además, no se evidenció fluctuación con la hora del día en el V̇O2max, la potencia máxima de pedaleo en los hombres nativos andinos y los no nativos aclimatados.

Conclusiones: los resultados sugieren que la hipoxia hipobárica disminuye de manera significativa la capacidad aeróbica de los no nativos aclimatados en comparación con los nativos andinos; lo anterior, cuando esta capacidad se mide tanto en la mañana como en la tarde. Sin embargo, no hay influencia de la hora del día en esta variable.

Palabras clave: Hipoxia; Disciplina de cronobiología; Consumo de oxígeno; Ejercicio físico; Adaptación biológica.

ABSTRACT

Objective: To compare VO2max and pedaling power values between Andean natives and acclimatized non-natives under hypobaric hypoxic conditions, and to determine the chronobiological influence.

Methods: A cross-sectional study was conducted, including 42 healthy adult males (24 Andean natives and 18 acclimatized non-natives) living at 2800 m above sea level and exercising 3 times per week. VO2max and maximum pedaling power were measured on a cycle ergometer in the morning and evening. To compare the average values between the groups, a Student's t-test for independent samples and a paired t-test were used to compare the average values of the same variable at different times in each group of participants.

Results: VO2max was significantly higher in Andean natives compared to acclimatized non-natives when the values were measured at 7:00 am and 8:00 pm. Conversely, maximum pedaling power showed no significant differences when measured at the same times. Furthermore, no fluctuation with the time of day was observed in VO2max or maximum pedaling power in native Andean men and acclimatized non-native men.

Forma de citar este artículo:
Duque IL, Urrutia IM, Arboleda VH, Villaquirán AF, Parra JH. Cronobiología del rendimiento aeróbico y de potencia en hipoxia. Med UPB. 2026;45(2):14-23
DOI:10.18566/medupb.v45n2.a03

1. Universidad de Caldas, Manizales, Colombia. 5
2. Grupo de Movimiento Corporal Humano y Calidad de Vida, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia.
3. Grupo de investigación Movimiento y Salud, Universidad CES, Medellín, Colombia.
4. Grupo de Investigación Susana Ciencia Investigación y Desarrollo "SUCID", Corazón y Aorta, Popayán, Colombia.
5. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.

Dirección de correspondencia:
Víctor Hugo Arboleda Campo.
Correo electrónico:
arboleda.victor@uces.edu.co

Conclusion: The results suggest that hypobaric hypoxia significantly reduces the aerobic capacity of acclimatized non-natives compared to Andean natives, whether measured in the morning or the afternoon. However, the time of day has no influence on this variable.
Keywords: Hypoxia; Chronobiology Discipline; Oxygen Consumption; Exercise; Biological Adaptation.

RESUMO

Objetivo: comparar os valores de VO2máx e potência de pedalada entre nativos andinos e não nativos aclimatados em condições hipóxicas hipobáricas e estabelecer a influência cronobiológica.

Métodos: foi realizado um estudo transversal com 42 homens adultos saudáveis (24 nativos andinos e 18 não nativos aclimatados) residentes a 2800 m de altitude, que praticavam exercícios físicos 3 vezes por semana. O VO2máx e a potência máxima de pedalada foram medidos em cicloergômetro pela manhã e à noite, e os valores médios foram comparados entre os grupos utilizando o teste t de Student para amostras independentes e o teste t pareado para comparar os valores médios da mesma variável em diferentes horários em cada grupo de participantes.

Resultados: O VO2máx foi significativamente maior nos nativos andinos em comparação com os não nativos aclimatados quando medido às 7h e às 17h. Por outro lado, a potência máxima de pedalada não apresentou diferenças significativas quando medida nos mesmos horários. Além disso, não foi observada flutuação do VO2máx ou da potência máxima de pedalada em homens nativos andinos e não nativos aclimatados ao longo do dia.

Conclusões: os resultados sugerem que a hipóxia hipobárica diminui significativamente a capacidade aeróbica de não nativos aclimatados em comparação com nativos andinos, quando essa capacidade é medida tanto pela manhã quanto à tarde. No entanto, o horário do dia não influencia essa variável.
Palavras-chave: hipóxia; Cronobiologia; Consumo de oxigênio; Exercício físico; Adaptação biológica.

INTRODUCCIÓN

La hipoxia hipobárica (HH) provocada por la altitud es un desafío fisiológico e inevitable, hostil y constante que afecta el rendimiento físico de todo individuo[1]. La hipoxia derivada de la exposición aguda a la disminución de la presión barométrica a alta altura tiene consecuencias importantes sobre múltiples funciones celulares y cardiorrespiratorias, en particular aquellas responsables del suministro aerobio de energía[2]. En consecuencia, esto afecta los ajustes metabólicos y la homeostasis.

La adaptación a la alta altura en los humanos es el resultado de la modificación evolutiva en las poblaciones que han vivido en la altitud durante milenios. Se han informado mecanismos adaptativos para responder al desafío de la HH en residentes que han permanecido en estos lugares durante toda la vida. Este es el caso de nativos tibetanos, etíopes y andinos[3]. Los resultados de los estudios genómicos muestran signos genéticos de selección positiva en regiones específicas en estas poblaciones[4]. Además, los nativos de alta altitud (NAA) exhiben rasgos únicos de transporte de oxígeno en comparación con los recién llegados aclimatados. Estos ajustes fisiológicos ocurrieron como una estrategia para enfrentar el desafío de la alta montaña, lo que redundó en un mejor desempeño físico de los NAA en ambientes de HH. Por otro lado, a medida que se prolonga la exposición a la hipoxia, como ocurre en los residentes no nativos de alta altitud (RNNAA), se produce una aclimatación a grandes alturas. Para garantizar una adecuada biodisponibilidad del oxígeno, esta aclimatación comprende una respuesta ventilatoria hipóxica, un aumento del gasto cardíaco y de la diuresis, con mejor capacidad de transporte de oxígeno y del flujo sanguíneo cerebral. Además, el factor 1 inducible por hipoxia, es considerado como uno de transcripción que se puede dar en el entorno celular[5].

La capacidad aeróbica es una condición física individual, importante para realizar las actividades de la vida diaria, por lo que el consumo máximo de oxígeno ($\dot{V}O_{2max}$) se considera el patrón de referencia[6]. En general, el $\dot{V}O_{2max}$ varía entre sujetos según la edad, el género, el peso corporal, la genética y nivel de entrenamiento físico[7]. Así mismo, es considerado para evaluar la respuesta y adaptación a la altitud. En los RNNAA, la disminución en el $\dot{V}O_{2max}$ durante la exposición aguda y prolongada a la altura se ha atribuido a la disminución de la dis-

ponibilidad de O_2 en los tejidos como resultado de las condiciones hipobáricas[8].

En los aclimatados, a pesar del aumento en el contenido de oxihemoglobina, se observa una disminución lineal en el $\dot{V}O_{2max}$ y del rendimiento a medida que aumenta la altitud[9]. Por otro lado, en RNNAA se han reportado valores elevados de $\dot{V}O_{2max}$[10]. Igualmente, existe un mayor rendimiento en el ejercicio físico vigoroso en tibetanos y nativos andinos (NA)[8]. En NA, las adaptaciones relacionadas, entre otras, con la genética, la función ventilatoria, el contenido de hemoglobina y el metabolismo aeróbico[11] han sido descritas como responsables del incremento del rendimiento físico.

El ritmo circadiano se refiere a los cambios conductuales, fisiológicos y moleculares con una duración de ciclo de aproximadamente 24 horas[10]. Esto afecta la mayoría de las funciones, tanto en reposo como durante el ejercicio, con picos máximos en diferentes momentos del día[12]VO2peak was measured on two groups of Peruvian Quechua subjects (18-35 years. Las fluctuaciones dependientes de la hora del día (HDD) en el ejercicio podrían tener variados efectos en fuerza como resistencia[13]; sin embargo, la fuerza, la potencia y la resistencia han mostrado mayor rendimiento al anochecer[14], lo cual influyen en el rendimiento físico[15].

A pesar de los estudios, los datos no son concluyentes[16]. Por tanto, se ha encontrado que la HDD no se expresa de la misma manera en ejercicios de fuerza de alta intensidad[17]. Asimismo, se considera que la HDD en el rendimiento físico de larga duración es ambiguo en comparación con el entrenamiento de fuerza de alto esfuerzo[18]. La evidencia demuestra un mayor rendimiento aeróbico y de resistencia por la tarde y temprano en la noche[19], estos efectos parecen ser moderados y no son consistentes entre los estudios; esto puede ser explicado por la potencia en el análisis estadístico de los estudios[20]. Por último, la hipoxia ha resultado ser una variable implicada en el comportamiento circadiano de múltiples funciones, lo que afecta la expresión de genes implicados en el cronometraje[21].

Finalmente, la hipoxia ha sido reconocida como un modulador del sistema circadiano mediante la interacción entre el factor inducible por hipoxia (HIF-1α) y las proteínas reloj CLOCK y BMAL1, las cuales comparten mecanismos de regulación transcripcional. Esta interacción puede modificar la expresión de genes circadianos, alterar la sincronización de los ritmos biológicos y afectar procesos fisiológicos relacionados con el metabolismo energético, la utilización de oxígeno y el rendimiento físico. En consecuencia, la exposición a hipoxia podría modificar la magnitud de las variaciones circadianas antes descritas para la capacidad aeróbica y el desempeño muscular, lo que proporciona un fundamento biológico para estudiar en conjunto los efectos de la altura y de la hora del día sobre el rendimiento físico[22,23].

Por consiguiente, se podría esperar que la hipoxia interfiera con el patrón circadiano normal de la temperatura corporal y, posiblemente, con muchos otros ciclos diarios que dependen de este parámetro. Por lo que el comprender los efectos de la duración de la exposición a grandes alturas es importante para estudiar los mecanismos de aclimatación y adaptación a grandes altitudes. El objetivo de este estudio fue comparar los valores máximos de $\dot{V}O_2$ y potencia de pedaleo entre NA y RNNAA bajo hipoxia a gran altura y establecer el efecto de la HDD en estas variables.

METODOLOGÍA

Diseño

Estudio empírico-analítico con metodología cuantitativa. Se realizó un estudio observacional transversal analítico, a partir de fuentes primarias[24]. La información se recopiló entre abril y mayo de 2024, mediante un equipo de investigadores estandarizados.

Población

El estudio se ubicó a 2811 metros en Totoró (cordillera de los Andes, departamento del Cauca, Colombia).

Criterios de inclusión

Hombres indígenas guambianos, nacidos y crecidos en este lugar entre 18 a 33 años NA (n =24) y RNNAA (n=18) de 18 a 36 años que se habían mudado a la zona aproximadamente 5,3 ± 3,3 años antes del estudio. Los participantes fueron campesinos con ocupación principal en tareas agrícolas, nacidos a nivel del mar o en territorios de baja altitud del departamento del Cauca, estaban familiarizados con el uso de bicicleta, practicaban actividad física recreativa al menos 3 veces por semana durante el año previo al estudio, no eran deportistas competitivos y no tenían experiencia previa en pruebas cardiorrespiratorias máximas.

Criterios de exclusión

Se excluyeron participantes con antecedentes de enfermedad cardiovascular, respiratoria, metabólica o neuromuscular que pudiera afectar el rendimiento físico; fumadores activos; personas en tratamiento farmacológico al momento de la evaluación; individuos que realizaban trabajo por turnos nocturnos o presentaban

alteraciones conocidas del sueño, y quienes incumplieron las recomendaciones previas relacionadas con ejercicio físico intenso, consumo de alcohol o cafeína antes de las pruebas.

Variables

Se completó una encuesta estructurada y midieron parámetros antropométricos (peso, talla, IMC) y funcionales ($\dot{V}O_{2max}$ y potencia de pedaleo) en una bicicleta ergométrica.

Instrumentos y procedimientos

Después de ser admitidos los participantes, se les instruyó sobre su comportamiento en cada prueba (todas ellas separadas por una semana).

También, recibieron instrucciones estandarizadas sobre las condiciones previas. Se les solicitó mantener sus hábitos habituales de alimentación durante todo el estudio y evitar modificaciones en su dieta entre ambas sesiones de evaluación.

Como medida de estandarización, se indicó consumir solo una comida ligera aproximadamente dos horas antes de cada prueba y abstenerse de ingerir bebidas alcohólicas, cafeína u otras sustancias estimulantes durante las 24 horas previas. Asimismo, no se permitió la realización de ejercicio físico vigoroso en las 48 horas anteriores a cada evaluación. Estas recomendaciones fueron las mismas para todos los participantes.

Los participantes debían presentarse a las 7 a. m. y 7 p. m. Se aleatorizó el orden de realización de las pruebas físicas en el horario dispuesto, mediante una secuencia simple elaborada con anterioridad, de manera que cada participante realizó ambas pruebas en diferente horario con un intervalo de una semana, lo cual minimizó posibles efectos de aprendizaje o fatiga. Estos tiempos de las mediciones del estudio fueron seleccionados porque en la literatura han sido reportados como las fases de rendimiento físico máximo y mínimo[25].

La prueba implicó un esfuerzo creciente hasta el agotamiento, realizado en bicicleta ergométrica (Monark 818E®, Monark Inc, Estocolmo, Suecia). Se determinó la altura del asiento y manubrio de modo individual y se utilizó para las dos pruebas. La velocidad al pedalear se mantuvo a 60 revoluciones por minuto durante todo el esfuerzo. La potencia de pedaleo se incrementó cada 2 minutos; se inició con 50 Watts (W) y se incrementó en 25 W cada 2 minutos en las etapas posteriores. Los vatios máximos aplicados se dividieron por el peso corporal para establecer la PMP. Las sesiones de prueba se llevaron a cabo tomando algunos participantes a la vez de cada grupo.

El lugar no tuvo control del clima, se realizó en el mismo lugar y bajo condiciones ambientales similares para todos los participantes. Aunque el laboratorio no disponía de control artificial de temperatura y humedad, las pruebas se efectuaron durante el mismo periodo del estudio, registrándose una temperatura ambiente promedio de 16 °C y una humedad relativa aproximada del 67 %, con el propósito de reducir la variabilidad ambiental entre las mediciones.

Los participantes permanecieron sentados en silencio en una habitación durante 10 min. Se midió la temperatura corporal con un termómetro digital Vicks Speed Read (Marlborough, MA USA) colocado sublingualmente. Se tomó el peso corporal y estatura de acuerdo con las recomendaciones de la Sociedad Internacional para el Avance de la cineantropometría[26]. Después de 10 minutos de reposo, se midió la frecuencia cardíaca, la presión arterial, la ventilación pulmonar, la temperatura corporal y el $\dot{V}O_{2max}$. La frecuencia cardíaca máxima se determinó restando la edad de 220. La intensidad del esfuerzo, se obtuvo con el lactato sérico inmediatamente al final del ejercicio. Se recogieron muestras de lactato en sangre por punción digital utilizando lancetas con resorte. Se utilizaron tiras reactivas y un analizador de lactato (Accutrend® Plus System. Roche Diagnostics GmbH, Mannheim, Alemania). Las muestras fueron de dos dedos diferentes en cada momento y se promediaron los dos valores. Asimismo, se utilizó la escala de Borg modificada[27] para evaluar el esfuerzo máximo percibido.

Tamaño de la muestra

El tamaño de muestra se calculó para un diseño de medidas emparejadas, para las que se consideró la detección de una diferencia mínima clínicamente relevante de 4 ml/kg/min en el consumo de oxígeno. Se asumió una desviación estándar de las diferencias de 7 ml/kg/min, con un nivel de confianza del 95 % y una potencia estadística del 80 %. Se usó la fórmula de Fleiss para muestras correlacionadas y se obtuvo un tamaño mínimo de 26 participantes, un efecto de diseño (*deff*) de 1,0. Se añadió un 15 % a este cálculo para corregir la posible pérdida de información. Se consideró la accesibilidad de la población y las posibles pérdidas, se logró incluir a 42 personas[25,26].

Consideraciones éticas

Se informó del propósito, los procedimientos y posibles riesgos; se firmó un consentimiento informado (Declaración de Helsinki)[24]. Se tuvo aprobación del Comité de Bioética de la Universidad de Caldas (Ref. CBCS-027-15), con riesgo mayor al mínimo según resolución 8430 de 1993.

Métodos estadísticos

El análisis descriptivo se presentó con frecuencias absolutas y relativas, con promedio y desviación estándar para variables continuas. Se verificó la distribución normal (Shapiro-Wilk), la varianza (prueba de Levene) de los datos. La prueba *t* de *Student* independiente se utilizó para comparar los valores promedio obtenidos a las 7 a. m. y p. m. entre los grupos. Se comparó cada grupo con una prueba *t* de *Student* pareada. Para analizar los datos mediante una prueba ANOVA de dos factores, la característica NA o RNNAA constituyó la variable denominada origen y la hora de la prueba (7 a. m. y 7 p. m.) correspondió para la hora del día. Se seleccionó un nivel de probabilidad de (p ≤0,05. Se utilizó el programa SPSS versión 18.

RESULTADOS

En total, 42 participantes masculinos (edad media 24,5 ± 5,1 años) participaron en el estudio; 57,14 % de ellos fueron NA y el restante RNNAA. Las edades medias fueron 23,4 ±4,3 y 26,2 ±5,8 años, respectivamente. Las características físicas y los parámetros hematológicos de los participantes se muestran en la Tabla 1.

El tiempo transcurrido desde el despertar tuvo una media de 1,01 ± 1,17 horas antes de la prueba de la mañana para los participantes y 1,03 ± 0,17 y 0,98 ± 0,17 para NA y RNNAA, respectivamente. No hubo una diferencia significativa en el tiempo desde el despertar entre los grupos de participantes, en a Tabla 2 se muestra los parámetros fisiológicos.

La capacidad aeróbica, en la prueba *t* independiente mostró una diferencia significativa entre los valores medios de $\dot{V}O_{2max}$ medidos a las 7 a. m. en NA y RNNAA (50,6 ±10,4 y 44,2 ±8,4 ml/kg/min, respectivamente; p < 0,05; IC: 0,2689 a 12,3950) (Figura 1).

La prueba *t* independiente, comparó los valores medios de $\dot{V}O_{2max}$ medidos a las 7 p. m., mostró una diferencia significativa entre los mismos grupos de participantes (54,2 ±10 vs 43,1 ±7,1 ml/kg/min, para NA y RNNAA respectivamente; p < 0,000; IC: 5,4598 a 16,6874) (Figura 2).

A su vez, la prueba *t* pareada no mostró diferencias entre los valores medios de $\dot{V}O_{2max}$ medidos a las 7 a. m. y las 7 p. m. tanto en NA (50,6 ±10,4 y 54,2 ±10,0; IC: -7,28 a 0,002 ml/kg/min, en cada uno; p > 0,05), como en RNNAA (44,2 ±8,4 y 43,1 ±7,1; IC: -1,94 a 4,14 ml/kg/min respectivamente, p > 0,05).

La variación de los valores de $\dot{V}O_{2max}$ entre las mediciones realizadas a los tiempos de medición, una prueba *t* pareada mostró que no hay diferencia tanto en NA como en RNNAA (p > 0,05).

El modelo lineal general (ANOVA de dos vías) ajustado explicó el 17 %, donde los factores fueron las variables origen y hora del día, se demostró que solo el origen es el factor determinante de la diferencia en el $\dot{V}O_{2max}$ (p = 0.000). La interacción origen-hora del día no fue significativa (p > 0,05) (Tabla 3).

Con respecto a la PMP, en la prueba *t* independiente no se observó una diferencia (p >0,05, IC: -0,121 a 0,752) entre NA y RNNAA en los valores medios obtenidos en ambos a las 7 a. m. (3,7 ±0,77 y 3,4 ±0,67 W/kg. Igualmente, la PMP obtenida a las 7 p. m., no logró mostrar significancia entre NA y RNNAA (3,9 ±0,71 y 3,3 ±0,64 W/kg, respectivamente; p > 0,05; IC: 0,147 a 1,012). De la misma forma, según los grupos la prueba *t* pareada no identificó diferencias entre los valores medios de PMP en los horarios del estudio, tanto en nativos (3,7 ±0,77 y 3,9 ±0,71; IC: -,373 a 1,123 ml/kg/min; p > 0,05), como en RNNAA (3,4 ± 0,57 y 3,3 ±0,64; IC: -0,188 a 0,467 ml/kg/min, respectivamente, p > 0,05).

DISCUSIÓN

Los participantes de ambos grupos eran similares en cuanto a edad y a contenido de hemoglobina y no eran atletas. Los NA eran más altos y tenían un mayor peso e índice de masa corporal. El valor medio de $\dot{V}O_{2max}$, tanto en NA como en RNNAA, se ubicó en el percentil 80, según las tablas de referencia por sexo y edad[27]. El principal hallazgo del estudio estuvo en que el $\dot{V}O_{2max}$ fue significativamente más bajo en RNNAA comparado con NA cuando se midió en a. m. y p. m. En cualquier caso, las diferencias antropométricas de peso, talla e IMC entre NA y RNNAA no afectaron la interpretación de los valores de $\dot{V}O_{2max}$ cuando se expresaron en ml/kg/min. En cambio, el $\dot{V}O_{2max}$ y la PMP medidos en NA y RNNAA fluctuaron con HDD sin significancia estadística.

El presente estudio también es consistente con investigaciones realizadas en poblaciones andinas latinoamericanas. En la población quechua residente en los Andes peruanos se ha demostrado que los nativos presentan una mayor capacidad aeróbica, en comparación con individuos no adaptados a la altura, lo cual es atribuido a los mecanismos de adaptación durante el desarrollo y a las variantes genéticas relacionadas con el transporte y la utilización de oxígeno, sobre todo en el gen *EGLN1*[12,13]. Asimismo, una revisión reciente que

comparó poblaciones andinas, tibetanas y etíopes concluyó que, aunque existen diferencias en las estrategias adaptativas entre regiones geográficas, los habitantes andinos conservan ventajas fisiológicas que favorecen el rendimiento aeróbico en condiciones de hipoxia crónica[28]. Estos antecedentes respaldan que los mayores valores de VO_2max observados en los nativos andinos de nuestro estudio representan una respuesta fisiológica consistente con la evidencia disponible para poblaciones latinoamericanas de gran altitud.

Estos patrones respaldan que la aptitud cardiorrespiratoria evaluada mediante el VO_2max refleja tanto la exposición prolongada al ambiente hipobárico como adaptaciones fisiológicas y genéticas específicas que no se alcanzan completamente con la aclimatación de corta duración, en particular, aquellas relacionadas con el transporte, entrega y utilización de oxígeno durante el ejercicio, las cuales han sido ampliamente descritas en poblaciones nativas de gran altitud[11,23,29,30]. En contraste, la potencia máxima de pedaleo no presentó diferencias significativas entre los grupos. Esta discrepancia puede explicarse porque la potencia máxima desarrollada durante una prueba incremental depende sobre todo del reclutamiento neuromuscular, la producción de fuerza y la contribución de las vías metabólicas anaeróbicas, mecanismos que presentan una menor dependencia del transporte de oxígeno que la capacidad aeróbica[31]. En conjunto, este resultado sugiere que las adaptaciones fisiológicas propias de los nativos andinos confieren una ventaja sobre el rendimiento aeróbico; mientras que la producción máxima de potencia permanece relativamente conservada entre individuos nativos y aclimatados[11–13,29].

Tabla 1. Características físicas y parámetros hematológicos de los participantes

Variable	Total (n = 42)	Nativos andinos (n = 24)	Residentes no nativos (n = 18)
Peso (kg)	65,4 ± 7,5	61,9 ± 7,0*	70 ± 5,5
Talla (cm)	169,5 ± 6,8	167,3 ± 6,8*	172,3 ± 5,7
IMC (kg/m^2)	22,7 ± 2,0	22,1 ± 1,8*	23,6 ± 1,9
Temp corp. (ºC)			
a. m.	36,4 ±,3	36,5 ±,3	36,4 ±,4
p. m.	36,5±,3	36,5 ±,3	36,4 ±,4
Hb (mg/dl)	15,4 ±0,9	15,4 ±0,9	15,9 ±1,2

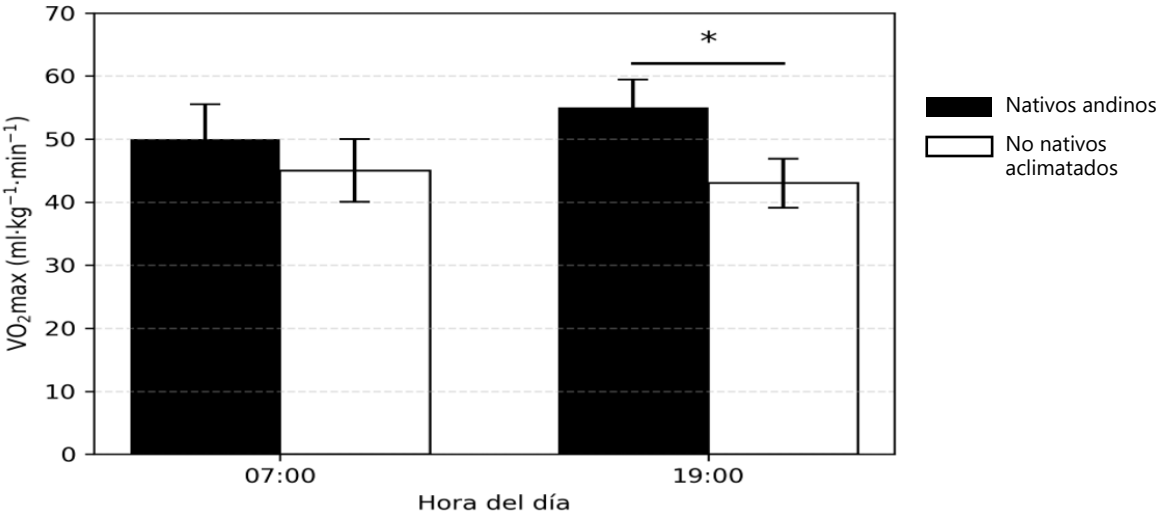
Nota: IMC: Índice de masa corporal; Hb: hemoglobina; Temp corp.: Temeperatura corporal. *p < 0,05 entre los grupos.

Tabla 2. Rendimiento máximo de parámetros fisiológicos en diferentes momentos del día en ambos grupos poblacionales

Variable	Nativos		Residentes no nativos	
	7 a. m.	7 p. m.	7 a. m.	7 p. m.
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	50,6 ±10,4*	54,2 ±10**	44,2 ±8,4	43,1 ±7,1
FC_{max} (lat/min)	178,9 ±11,1	178,9 ±9,3	173,6 ±13,2	175,2 ±7,5
% FC_{max}	89,7 ±5,5	89,6 ±4,7	90,4 ±7,1	91,3 ±5,1
$[La]_{max}$ (mM/l)	12,1 ±2,6*	11,8 ±1,9	10,8 ±2,3	10,8 ±3,1
Escala Borg	9,0 ±5,11	9,04 ±5,50	9,0 ±7,67	9 ±5,94
$\dot{V}e_{max}$ (l/min)	103,0 ±25,0	107,2 ±25,2	96,4 ±20,6	97,1 ±17,9
PMP (W/kg)	3,7 ± 0,77	3,9 ±0,71	3,4 ±0,57	3,3 ±0,65

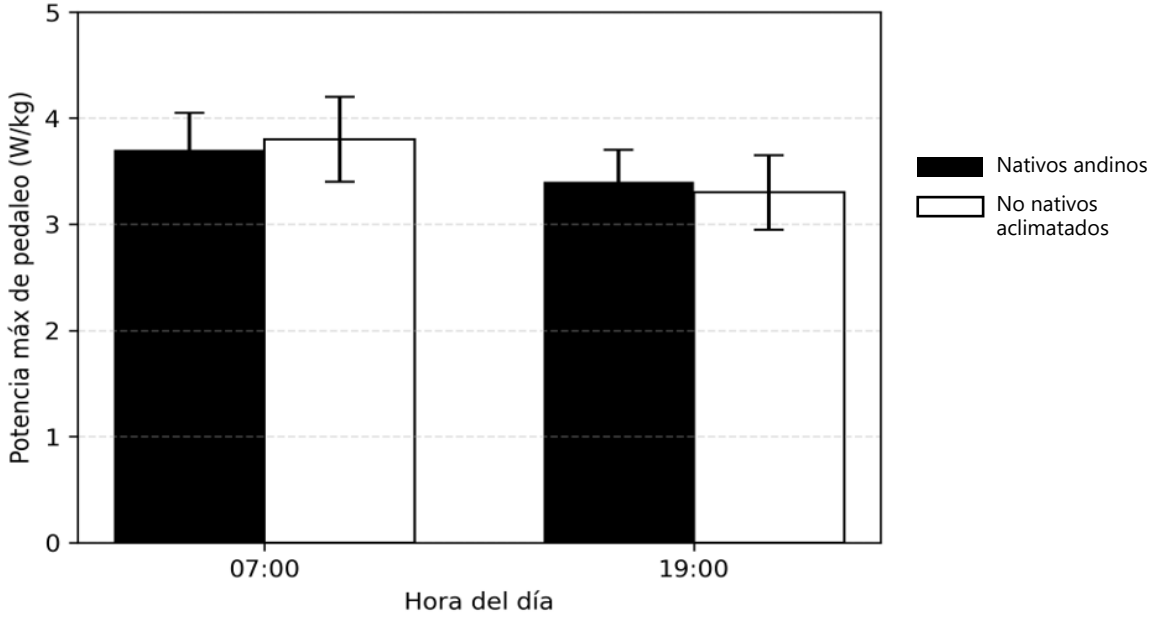
Nota: FC_{max}: frecuencia cardíaca máxima; % FCmax: porcentaje de frecuencia cardíaca máxima; $[La]_{max}$: lactatemia máxima; $\dot{V}e_{max}$: ventilación pulmonar máxima; PMP: potencia máxima de pedaleo. *p = 0,05 entre nativos y residentes no nativos. **p = 0,000 entre nativos y residentes no nativos.

Figura 1. Consumo máximo de oxígeno (V̇O2max) en nativos andinos y no nativos aclimatados medido a las 7 a. m. y las 7 p. m.



Nota: los valores representan medias ±IC 95 %. *p < 0,05 para la comparación entre grupos a las 7 p. m. (modelo lineal mixto).

Figura 2. Potencia máxima de pedaleo (W/kg) en nativos andinos y no nativos aclimatados evaluada a las 7 a. m. y 7 p. m.



Nota: Los valores representan medias ± error estándar (EE).

Tabla 3. Modelo lineal del consumo de oxígeno máximo en diferentes horas del día en la población de estudio

Origen	Suma de Cuadrados Tipo III	gl	Media cuadrática	F	p
Modelo corregido	1728,077[a]	3	576,026	6,701	0,000
Intercepto	189904,591	1	189904,591	2209,156	0,000
Origen	1558,046	1	1558,046	18,125	0,000
Hora del día	33,223	1	33,223	0,86	0,536
Origen * hora del día	115,629	1	115,629	1,345	0,250
Error	6877,001	80	85,963		
Total	207515,480	84			
Total corregido	8605,078	83			

Nota: R^2 = 0.201 (R^2 ajustado= 0.171). Variable dependiente: $\dot{V}O2max$

Para el ritmo circadiano, la evidencia científica sobre la variación diurna de la capacidad cardiovascular aún es escasa y no existe un consenso. Entre las múltiples funciones fisiológicas influenciadas por la HDD, el $\dot{V}O_{2max}$ tiene una variación diurna significativa y una amplitud débil (1-3,8 %), con mayor capacidad de rendimiento físico al final del día[30]. Mientras que estudios previos encontraron que el $\dot{V}O_{2max}$ es mayor en la mañana[18]. En nuestro estudio, no hubo diferencias significativas entre las mediciones de $\dot{V}O_{2max}$ y de pedaleo en la mañana y tarde para los NA y RNNAA. Esto puede reflejar la falta de consenso encontrada en la revisión de la literatura. Sin embargo, una razón adicional para este hallazgo podría ser que los estudios diseñados para explicar la variación circadiana del $\dot{V}O_{2max}$ se han realizado utilizando protocolos de ejercicio basados en laboratorio. Serían necesarios experimentos adicionales basados en un protocolo de ejercicio consensuado para concluir que la HDD está causando los efectos observados. Entre los reportes de la existencia de ritmo circadiano para el $\dot{V}O_{2max,}$ se ha argumentado que la amplitud de dicho ritmo es mayor en sujetos bien entrenados[30,31]; lo cual es similar a lo encontrado en el valor medio de $\dot{V}O_{2max}$ alcanzado por ambos grupos lo que los categoriza como bien acondicionados[27]. Es diferente que este valor de $\dot{V}O_{2max}$ sea suficiente para lograr una amplitud significativa en la expresión de este parámetro.

Una limitación de este estudio es que no se establecieron diferencias interindividuales en la ritmicidad circadiana de los participantes. Estudios futuros deberían tener en cuenta la preferencia del participante por las actividades diurnas o nocturnas. Es relevante comprar los sexos para hacer extrapolación de los resultados.

En síntesis, este estudio mostró que los nativos andinos presentan una mayor capacidad aeróbica, evidenciada por valores superiores de VO_2max en comparación con residentes no nativos aclimatados; mientras que la potencia máxima de pedaleo no difirió entre los grupos. La adaptación crónica a la hipoxia hipobárica favorece sobre todo a los mecanismos fisiológicos relacionados con el transporte, la entrega y la utilización de oxígeno, sin traducirse necesariamente en una mayor capacidad para generar potencia máxima durante el ejercicio.

La ausencia de diferencias significativas entre las pruebas realizadas en la mañana y en la tarde indica que, bajo las condiciones de hipoxia hipobárica estudiadas, el momento del día no ejerce una influencia relevante sobre el VO_2max ni sobre la potencia máxima de pedaleo. Estos resultados aportan evidencia para la evaluación fisiológica y la planificación del entrenamiento en poblaciones que residen o se aclimatan a la altura, pues sugieren que la capacidad aeróbica constituye un indicador más sensible de adaptación a la hipoxia que la potencia máxima de pedaleo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los participaron del estudio.

CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses..

REFERENCIAS

1. Allsopp GL, Britto FA, Wright CR, Deldicque L. The effects of normobaric hypoxia on the acute physiological responses to resistance training: A narrative review. J Strength Cond Res. 2024;38(11):2001-2011. Enlace o doi
2. Siebenmann C, Robach P, Lundby C. Regulation of blood volume in lowlanders exposed to high altitude. J Appl Physiol. 2017;123(4):957-966.
3. Kentiba E, George M, Mondal S, Vanan DM. Effects of altitude on chronotype orientations in relation to cardiorespiratory and hematological quantities of college students in Ethiopia. Plos One. 2019;14(7):e0219836.
4. Julian CG, Moore LG. Human genetic adaptation to high altitude: evidence from the Andes. Genes. 2019;10(2):2.
5. Chawla S, Saxena S. Physiology of high-altitude acclimatization. Resonance. 2014;19(6):538-548.
6. Kleinloog JPD, van Laar SPGA, Schoffelen PFM, Plasqui G. Validity and reproducibility of VO2 max testing in a respiration chamber. Scand J Med Sci Sports. 2021;31(6):1259-1267.
7. Deng L, Liu Y, Chen B. Impact of altitude training on athletes' aerobic capacity: a systematic review and meta-analysis. Life. 2025;15(2).
8. Sutton JR, Reeves JT, Wagner PD. Operation Everest II: oxygen transport during exercise at extreme simulated altitude. J Appl Physiol. 1988;64(4):1309-1321.
9. Hagberg JM, Moore GE, Ferrell RE. Specific genetic markers of endurance performance and VO2max. Exerc Sport Sci Rev. 2001;29(1):15-19.
10. Brisswalter J, Bieuzen F, Giacomoni M, Tricot V, Falgairette G. Morning-to-evening differences in oxygen uptake kinetics in short-duration cycling exercise. Chronobiol Int. 2007;24(3):495-506.
11. Brutsaert T. Why are high altitude natives so strong at high altitude? Nature vs. nurture: Genetic factors vs. growth and development. In: Roach RC, Hackett PH, Wagner PD, eds. Hypoxia: Translation in Progress. Springer US; 2016:101-112.
12. Kiyamu M, Rivera-Chira M, Brutsaert TD. Aerobic capacity of Peruvian Quechua: a test of the developmental adaptation hypothesis. Am J Phys Anthropol. 2015;156(3):363-373.
13. Avellanas Chavala ML. A journey between high altitude hypoxia and critical patient hypoxia: What can it teach us about compression and the management of critical disease? Med Intensiva. 2018;42(6):380-390.
14. Serin Y, Acar Tek N. Effect of circadian rhythm on metabolic processes and the regulation of energy balance. Ann Nutr Metab. 2019;74(4):322-330.
15. Brutsaert TD, Kiyamu M, Elias Revollendo G. Association of EGLN1 gene with high aerobic capacity of Peruvian Quechua at high altitude. Proc Natl Acad Sci. 2019;116(48):24006-24011.
16. Simonson TS, Yang Y, Huff CD. Genetic evidence for high-altitude adaptation in Tibet. Science. 2010;329(5987):72-75.
17. Thun E, Bjorvatn B, Flo E, Harris A, Pallesen S. Sleep, circadian rhythms, and athletic performance. Sleep Med Rev. 2015;23:1-9.
18. Chtourou H, Souissi N. The effect of training at a specific time of day: a review. J Strength Cond Res. 2012;26(7):1984-2005.
19. Facer-Childs E, Brandstaetter R. The impact of circadian phenotype and time since awakening on diurnal performance in athletes. Curr Biol CB. 2015;25(4):518-522.
20. Fernandes AL, Lopes-Silva JP, Bertuzzi R. Effect of time of day on performance, hormonal and metabolic response during a 1000-M cycling time trial. Plos One. 2014;9(10):e109954.
21. Williams TB, Badariotti JI, Corbett J. The effects of sleep deprivation, acute hypoxia, and exercise on cognitive performance: A multi-experiment combined stressors study. Physiol Behav. 2024;274:114409.
22. Peek CB, Levine DC, Cedernaes J. Circadian clock interaction with HIF1α mediates oxygenic metabolism and anaerobic glycolysis in skeletal muscle. Cell Metab. 2017;25(1):86-92.
23. Adamovich Y, Dandavate V, Asher G. Circadian clocks' interactions with oxygen sensing and signalling. Acta Physiol. 2022;234(2):e13770.
24. Hernández R, Fernández C, Baptista P, Méndez S, Mendoza C. Metodología de la investigación. McGraw-Hill Education; 2014.
25. Fletcher G. Epidemiología clínica. 6Ed ed. Wlokers Klumer; 2020.
26. Webb KL, Joyner MJ, Wiggins CC, Secomb TW, Roy TK. The dependence of maximum oxygen uptake and utilization ($\dot{V}O_2max$) on hemoglobin-oxygen affinity and altitude. Physiol Rep. 2023;11(17):e15806.
27. Kaminsky LA, Imboden MT, Arena R, Myers J. Reference standards for cardiorespiratory fitness measured with cardiopulmonary exercise testing using cycle ergometry: data from the Fitness Registry and the Importance of Exercise National Database (FRIEND) Registry. Mayo Clin Proc. 2017;92(2):228-233.

28. Getu AA, Ilardo M, Tremblay JC, Carr JMJR, Faoro V, Ainslie PN. Human adaptation to high-altitude: A contemporary comparison of the oxygen cascade in Andean, Tibetan and Ethiopian highlanders. Exp Physiol. Published online September 24, 2025.
29. Pugh LG. Physiological and medical aspects of the Himalayan scientific and mountaineering expedition, 1960-61. Br Med J. 1962;2(5305):621-627.
30. Atkinson G, Todd C, Reilly T, Waterhouse J. Diurnal variation in cycling performance: influence of warm-up. J Sports Sci. 2005;23(3):321-329.
31. Knaier R, Qian J, Roth R, *et al.* Diurnal variation in maximum endurance and maximum strength performance: a systematic review and meta-analysis. Med Sci Sports Exerc. 2022;54(1):169-180.