

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
DOCTORADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD



CASA ABIERTA AL TIEMPO

“NEURO-ETOLOGÍA DEL SUEÑO DEL MONO ARAÑA (*Ateles geoffroyi*):
APORTACIONES AL ENTENDIMIENTO DEL MECANISMO NEURO-MUSCULAR
ESPECIALIZADO PARA LA POSTURA CORPORAL PARA EL SUEÑO ARBÓREO EN LOS
PRIMATES NO-HUMANOS”

T E S I S

Que para obtener el grado de

Doctor en Ciencias Biológicas y de la Salud

P R E S E N T A

Manuel Alejandro Cruz Aguilar

DIRECTOR

Dr. Javier Velázquez Moctezuma

ASESORAS

Dra. Anabel Jiménez Anguiano

Dra. Ana María Santillán Doherty

MÉXICO, D.F.

18 de Febrero del 2015

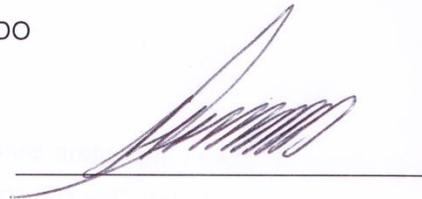
El Doctorado en Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma Metropolitana pertenece al Padrón de Posgrados de Excelencia del CONACyT y además cuenta con apoyo del mismo Consejo, con el convenio PFP-20-93

El jurado designado por la División de Ciencias Biológicas y de la Salud de las Unidades Iztapalapa y Xochimilco aprobó la tesis que presenta:

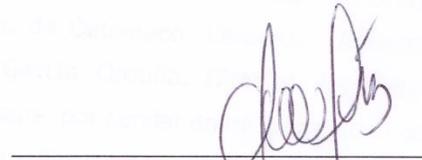
Manuel Alejandro Cruz Aguilar el día 18 de Febrero del año 2015

JURADO

Tutor: Dr. Javier Velázquez Moctezuma



Asesora: Dra. Anabel Jiménez Anguiano



Asesora: Dra. Ana María Santillán Doherty



Sinodal: Dr. Miguel Ángel Guevara Pérez



Sinodal: Dr. Jairo Muñoz Delgado





El presente estudio se desarrolló en monos araña que habitaban en la Unidad de Manejo Ambiental: “Doña Hilda Ávila de O’farril” del Patronato Pro-Universidad Veracruzana A.C. ubicado en el poblado de Catemaco, Veracruz. Agradezco de manera especial al Mtro. Francisco García Orduña; Director del Instituto de Neuroetología de la Universidad Veracruzana, por confiar en mí, por todo el apoyo y las facilidades que me otorgó para desarrollar los experimentos y mi estancia de investigación doctoral en Catemaco.

RESUMEN

Todos los monos duermen en posición vertical sobre las ramas de los árboles. Sin embargo, el mecanismo neuro-muscular que permite a los primates arborícolas no caer mientras duermen, nunca ha sido estudiado. El objetivo del presente estudio fue determinar las características electrofisiológicas y conductuales asociadas a la postura vertical durante el sueño del mono araña; ejemplar altamente representativo de los primates arborícolas. Se realizaron registros polisomnográficos (PSG) de 24 horas continuas en 6 monos que vivían en encierros al aire libre, dentro de la selva. Los electrodos se colocaron de acuerdo al sistema internacional 10-20 para EEG humano. Las posturas corporales específicas desplegadas por los monos durante el ciclo sueño-vigilia fueron correlacionado con los registros PSG. Asimismo, analizamos la distribución temporal del ciclo sueño-vigilia. Los resultados mostraron que los patrones electrofisiológicos del sueño No-MOR del mono araña mantienen similitud con los observados en otros primates, incluyendo a los seres humanos. Se observó una postura vertical semi-fetal tanto para el sueño MOR como el No-MOR. La cantidad de sueño en el periodo de oscuridad fue significativamente mayor que durante el periodo de luz, mostrando así que este animal es un primate diurno. Uno de nuestros principales hallazgos fue la ausencia de atonía muscular durante el sueño MOR, lo cual sugiere que los primates de vida arbórea han desarrollado un mecanismo neuromuscular especializado para dormir en posición vertical.

Palabras clave: Monos del Nuevo Mundo, PSG, atonía muscular, sueño MOR.

ABSTRACT

All monkeys sleep upright on the branches of trees. However, the neuro-muscular mechanism that allows arboreal primates not fall during sleep, never been studied. The aim of this study was to determine the electrophysiological and behavioral characteristics associated with upright posture during sleep in spider monkey; highly representative kind of arboreal primates. Continuous 24-hr polysomnographic (PSG) recordings were carried out in 6 captive monkeys living in outdoor rainforest enclosures. Electrode placement was done according to the human international 10–20 system. Specific behaviors displayed by monkeys during the sleep-wake cycles were correlated with the PSG recordings. The nycthemeral distribution of the sleep-wake cycle was also calculated. The results show that electrophysiological N-REM sleep patterns in spider monkeys are similar to those observed in other primates, including human beings. Furthermore, a vertical semi-fetal posture was observed during N-REM and REM sleep phases. The amount of nocturnal sleep was significantly higher than that of the diurnal period, showing that the spider monkey is a diurnal primate. An outstanding finding was the absence of muscular atonia during the spider monkey's REM sleep, which suggests that arboreal primates have developed a neuromuscular mechanism specialized for sleeping in a vertical posture.

Key words: new world monkey, PSG, muscular atonia, REM sleep.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	2
2.1 Bases neurofisiológicas del sueño	2
2.2 El orden de los primates.....	8
2.3 El estudio del sueño en los primates no-humanos.....	20
2.4 Aspectos biológicos y conductuales del mono araña.....	28
3. JUSTIFICACIÓN.....	34
4. HIPÓTESIS.....	35
5. OBJETIVOS.....	36
5.1 Objetivo general.....	36
5.2 Objetivos específicos.....	36
6. MÉTODOLÓGÍA.....	36
6.1 Declaración de manejo ético de los monos.....	36
6.2 Ubicación.....	37
6.3 Animales.....	38
6.4. Jaula para registro PSG.....	40
6.5 Procedimiento para registro PSG.....	42
6.6 Registros PSG.....	46

6.7 Análisis.....	47
7.0 RESULTADOS.....	50
7.1 Periodo de habituación.....	50
7.2 Patrones electrofisiológicos de los estados de vigilancia.....	52
7.3 Posturas para dormir.....	54
7.4 Distribución temporal del ciclo sueño-vigilia.....	54
8. DISCUSIÓN.....	58
9. CONCLUSIONES.....	67
10. REFERENCIAS.....	68
ANEXO. PUBLICACIÓN.....	82

Figura 1. Encierro Central.....	39
Figura 2. Jaula para el registro PSG.....	41
Figura 3. Método y posturas del sueño.....	43
Figura 4. Resultados del periodo de habituación.....	51
Figura 5. Trazos PSG representativos del mono araña.....	53
Figura 6. Hipnograma representativo del ciclo sueño-vigilia del mono araña.....	57
Tabla 1. Distribución temporal del ciclo sueño vigilia del mono araña.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS

EEG	Electroencefalograma
EOG	Electro-oculograma
EMG	Electromiograma
PSG	Polisomnograma
PGO	Ponto-geniculo-occipital
PPT	Tegmento-pendunculo-pontino
LDT	Tegmento latero-dorsal
LC	Locus Coeruleos
NRD	Núcleo reticular-dorsal
MOR	Sueño con Movimientos Oculares Rápidos
No-MOR	Sueño sin Movimientos Oculares Rápidos
DE	Desviación Estándar
ES	Error Estándar
EFFIC	Eficiencia del sueño
HIS	Histamina
TTS	Tiempo total de sueño

SLA	Latencia de cada fase de sueño
TT	Porcentaje del tiempo total que ocupa cada fase del sueño
MT	Movimiento
W	Vigilia

1. INTRODUCCIÓN

Una característica conductual del sueño en los primates más evolucionados es la postura horizontal para dormir. Todos los grandes simios, incluyendo a los seres humanos, duermen en posición horizontal. Lo anterior obedece a la pérdida gradual del tono muscular que caracteriza al sueño, principalmente al sueño MOR. Sin embargo, si observamos hacia atrás en la línea evolutiva de los primates, encontraremos que la postura horizontal no siempre ha caracterizado el sueño de estos mamíferos. Hace aproximadamente 60 millones de años, los primates dormían en las copas de los árboles en posición vertical y hace apenas unos 6 millones de años los primates comenzaron a dormir en posición horizontal, recargando la cabeza sobre el suelo. La postura vertical para dormir que se ha observado en los primates arborícolas sugiere que el sueño, en especial el sueño MOR, podría presentarse sin atonía muscular, de manera contraria a como se ha observado en todos los primates antes estudiados. Con el objetivo de conocer algunas características electrofisiológicas y conductuales del sueño que aporten nueva información sobre el mecanismo neuromuscular que permite a los monos arborícolas no caer mientras duermen, en el presente estudio caracterizamos los patrones electrofisiológicos, las posturas corporales para el sueño y la distribución temporal del ciclo sueño-vigilia en monos araña utilizando polisomnografía no invasiva, con semi-restricción de movimiento, en encierros al aire libre dentro de la selva mexicana.

2. ANTECEDENTES

2.1 Bases neurofisiológicas del sueño.

De acuerdo con la American Academy of Sleep Medicine (Iber et al., 2007), actualmente en los humanos y en los mamíferos en general, se conocen cuatro fases de sueño. Cada una de estas fases se caracteriza por patrones electroencefalográficos (EEG), electro-oculográficos (EOG) y electromiográficos (EMG) específicos. Un estudio polisomnográfico (PSG) incluye estas tres variables y puede realizarse de manera invasiva; como en el caso de la mayor parte de estudios de sueño en animales, o de manera no-invasiva, como es el caso más común en los seres humanos. La fase 1 se caracteriza electroencefalográficamente por la presencia de ritmo theta (ondas de 4 a 7 Hz.), el cual es comúnmente acompañado por brotes de ritmo alfa (ondas de 8 a 13 Hz). Durante la noche, su duración promedio fluctúa alrededor de un minuto. Por otro lado, durante la fase 2 se observa ritmo theta predominante en la región central. Asimismo, se observan ondas agudas con un componente negativo seguido de un componente positivo que duran hasta 0.5 segundos, esta actividad EEG es conocida como complejos K. Durante la fase 2 predominan los husos de sueño; periodos de actividad rápida fusiforme con duración de 1 a 2 segundos y con frecuencias en el rango de la banda sigma (12 a 14 Hz). Conforme el sueño se hace más profundo, el EEG muestra un predominio de ondas lentas de alto voltaje en la frecuencia del ritmo Delta (0.5 a 3 Hz), a lo cual se le

denomina fase 3 o sueño Delta. A la fase 1, 2 y 3 en conjunto se le conoce también como sueño No-MOR. El sueño MOR se caracteriza por la desincronización cortical, similar a la observada durante la fase 1 del sueño, movimientos oculares rápidos que se presentan en salvas y atonía muscular anti-gravitatoria (Iber et al., 2007).

Sueño No-MOR

Steriade y sus colaboradores (1987) han demostrado que durante el sueño No-MOR existe una disminución de la actividad neural de la corteza cerebral y el tálamo, principalmente. Las neuronas de los núcleos del rafe también disminuyen su frecuencia de disparo al inicio del sueño No-MOR, la cual desaparece durante el sueño MOR. El sueño No-MOR es generado en las estructuras localizadas en el cerebro anterior (McGinty & Szymusiak, 2000). Los núcleos del tracto solitario, los núcleos talámicos inespecíficos, los núcleos de la región pre-óptica hipotalámica anterior y del cerebro basal anterior, se activan a su máximo durante el sueño No-MOR (Saper et al., 2001; Siegel, 2005). Estos núcleos poseen neuronas que actúan a través de sus proyecciones inhibitorias directas e indirectas en los sistemas aminérgicos, colinérgicos y orexinérgicos. Asimismo, las neuronas GABAérgicas de la corteza y el hipocampo se activan durante el sueño No-MOR (Steriade & Hobson, 1976; Siegel, 2004). La instalación y el mantenimiento del sueño No-MOR parecen estar controlados por la activación de los núcleos del rafe *dorsalis* y *centralis*, los cuales al ser lesionados producen insomnio. La activación de los núcleos del rafe

dorsalis y *centralis* inhibe el efecto del despertar del sistema reticular permitiendo al tálamo medial inducir los husos de sueño y la sincronización cortical que se observa durante el sueño No-MOR (Jouvet, 1988). Se ha localizado un proceso hipnogénico dentro del cerebro basal anterior en las proximidades del núcleo del tracto solitario, en donde la estimulación eléctrica produce sincronización del EEG asociado con el sueño No-MOR (Magni et al., 1961).

Durante el sueño No-MOR, las neuronas de la sustancia innominada y del globo pálido también aumentan su frecuencia de disparo. Por otro lado, Nauta (1946) mostró que las lesiones de la región anterior del hipotálamo producen insomnio, en tanto que la estimulación eléctrica sobre el hipotálamo lateral, el núcleo anterior-ventral del tálamo y el área preóptica, producen sincronización cortical y conducta de sueño (Steriade et al., 1987). Las áreas preóptica medial, la banda diagonal de Broca, el área preóptica lateral magnocelular y la sustancia innominada sub-pálida constituyen una región que contiene vías y elementos en donde se integran procesos hormonales, metabólicos y conductuales. Estas áreas que ejercen su control sobre el mantenimiento y consolidación del sueño No-MOR, al ser lesionadas producen insomnio, pérdida del No-MOR profundo, disminución de la frecuencia de aparición del sueño y aumenta la duración de la vigilia.

Sueño MOR

Se ha propuesto que el sueño MOR es el resultado de la activación de sustratos neuronales localizados en el tallo cerebral (Jouvet, 1962). En la preparación del cerebro aislado; se mantiene la atonía muscular, los movimientos oculares rápidos, las ondas PGO y las sacudidas musculares. Al realizar el transecto a nivel de la protuberancia, se pierden los componentes fásicos y tónicos del sueño MOR (Jouvet, 1988). El sueño MOR se caracteriza por la desincronización de la actividad cortical y la aparición del ritmo theta hipocámpico (Faradaji et al., 1979). En 1980, Sakai y colaboradores propusieron que algunas estructuras del tallo cerebral están vinculadas con eventos fásicos y tónicos del sueño MOR. También se ha sugerido que los potenciales PGO; se originan en el área X del tegmento pontino dorso lateral, así como en las neuronas del tegmento pedúnculo pontino (PPT) y el tegmento latero dorsal (LDT) de la formación reticular pontina, ya que se ha demostrado que la lesión de dichas neuronas abole el sueño MOR (McCarley et al., 1978; Jones, 1991). Los potenciales PGO se propagan desde la región pontina al cuerpo geniculado lateral y a la corteza occipital, donde se registran con facilidad (Sakai, 1980; Jones, 1991).

La regulación del sueño MOR implica la activación de los mecanismos colinérgicos/colinoceptivos de varias regiones de la formación reticular pontina. Dentro de estas se incluyen el área reticular tegmental dorsal, las áreas reticulares laterales, porciones de la médula espinal y de la formación reticular mesencefálica

(McCarley, 1990). La desincronización cortical implica un alto grado de actividad de las neuronas centrales y de los sistemas motores; sin embargo el sueño MOR presenta paradójicamente atonía muscular acoplada a una gran actividad neuronal (Steriade & McCarley, 1990). Se ha sugerido que esta atonía de los músculos anti-gravitatorios, es causada por una hiper-polarización de las moto-neuronas de la médula espinal (Morales & Chase, 1978) así como por la inhibición de la actividad tálamo-cortical (Llinas y D pare, 1991). Las lesiones provocadas sobre el *locus coeruleus* medial y regiones adyacentes de la formación reticular pontina, anulan la atonía muscular (Morrison, 1983), dañando el origen o curso de las neuronas que contribuyen a la vía tegmento-reticular descrita por Sakai y sus colaboradores en 1979, como un mediador de la atonía presente durante el sueño MOR. Durante esta fase de sueño, las frecuencias de disparo de las neuronas colinérgicas del tallo cerebral (PPT, LDT) así como la actividad de las neuronas tálamo-corticales, se encuentran muy elevada. Los núcleos del rafé; a través de las células "REM-off" envían proyecciones inhibitorias a los núcleos PPT y LDT impidiendo que el organismo entre a la fase del sueño MOR, sin embargo, cuando los núcleos del rafe dejan de disparar, se pierde la inhibición y esto permite que se activen los núcleos PPT y LDT dando origen así al sueño MOR (Shiromani et al., 1992). Los sistemas colinérgicos del tallo cerebral producen dos efectos principales sobre el tálamo: a) una excitación directa de las células tálamo-corticales y b) una desinhibición de las neuronas tálamo-corticales, producida por la inhibición de neuronas GABAérgicas retículo-talámicas y se sugiere que estos sistemas inducen la activación cortical durante el sueño MOR (Curró Dossi et al., 1991).

Para entender cómo se regula el sueño es necesario considerar las interacciones recíprocas entre los distintos sistemas de vigilia y los núcleos promotores del sueño. Una serie de grupos neuronales monoaminérgicos (sistemas de vigilia) están localizados en el locus coeruleus (NA), los núcleos de rafé (5-HT) y el núcleo tuberomamilar (HIS). Las neuronas de dichos núcleos comparten la característica de que su tasa de disparo es mayor durante la vigilia, disminuye durante el sueño No-MOR y prácticamente dejan de descargar durante el sueño MOR. La alta actividad de los núcleos monoaminérgicos durante la vigilia modula la actividad del núcleo preóptico medial y el área preóptica ventrolateral, los cuales son regiones GABAérgicas que promueven principalmente el sueño No-MOR. Por el contrario, durante el sueño No-MOR estos núcleos descargan rápidamente y, dado que su naturaleza es GABAérgica, inhiben a los grupos monoaminérgicos. Saper y colaboradores (2010) denominaron a esta interacción recíproca como interruptor *flip-flop*, ya que es un circuito de retroalimentación que genera dos posibles patrones de descarga. Este interruptor puede ayudar a producir transiciones entre la vigilia y el sueño No-MOR e incluso se ha propuesto que es estabilizado por las neuronas del hipotálamo lateral. (orexinas), las cuales pueden excitar a los sistemas promotores de vigilia y así asegurar la prevalencia de la vigilia.

2.2 El orden de los primates

Los primates son un tipo de mamífero adaptado a la vida en el bosque tropical. Los primates conjugan la presencia de un esqueleto básicamente primitivo, especialmente en la dentición, junto a otras características propias muy evolucionadas. Estas características están relacionadas con dos aspectos que han marcado la historia evolutiva del grupo: La vida en los árboles y la organización social. En la actualidad, se conocen cerca de 175 especies de primates distribuidas por las zonas tropicales de América, Asia y África. En general, los primates son vegetarianos, frugívoros y folívoros, aunque sus dietas suelen ser variadas, incluyendo invertebrados y a veces, mamíferos. Filogenéticamente, el orden de los primates se divide en tres subórdenes: *Prosimii*, *Tarsioidea* y *Anthropoidea* (Cartmill & Kay, 1978; Kay et al., 1997; Kay et al., 2004).

Suborden Prosimii

El Suborden de los *Prosimios* (antecesores de los simios) o *Estrepsirrinos*, es la primera ramificación del orden de los primates. Son los primates de características más primitivas. Se distribuyen principalmente en las islas marginales de África y el sureste Asiático; en islas como Madagascar, Borneo, Java, entre otras (Cartmill & Smith, 2009). Se alimentan sobre todo de frutas, flores, semillas e insectos que atrapan durante la noche. Suelen vivir entre 15 y 20 años. La característica más

notable que distingue a los *Prosimios* es la forma de la nariz y la forma del labio superior; además de otras más complejas, tales como la estructura de los vasos que irrigan del oído medio, o el tipo de placenta. Los prosimios presentan el modelo primitivo y común a muchos placentados, en el que los orificios nasales se encuentran rodeados de una superficie desnuda y húmeda (como es el caso de los caninos, por ejemplo) llamada rinario; además, su labio superior está fusionado a las encías. Tienen garras y hocicos largos con una nariz húmeda (*philtrum*). Poseen un mayor uso del sentido del olfato y mayor orientación lateral de los ojos que el resto de los primates. Incluso sus mandíbulas inferiores no están unidas y los incisivos inferiores proyectados hacia adelante formando un peine dental. Presentan ojos muy grandes y brillantes, con un disco reflectante en el fondo del ojo (*tapetum lucidum*) que mejora la visión nocturna. Son arborícolas, trepadores, saltadores, insectívoros y solitarios. Tienen la menor proporción cerebral de todos los primates. El orden de los prosimios se divide en 3 Infraórdenes, atendiendo a cuestiones geográficas: Lemuriformes en Madagascar, Lorisiformes en Asia y África (excepto Madagascar) y Tarsiformes en Asia exclusivamente. Esta clasificación geográfica está sustentada por comparaciones cromosómicas y datos moleculares (Purvis, 1995).

Estos primates llevan una vida arbórea, su hábitat por excelencia es el bosque tropical, y aunque anteriormente se encontraban repartidos por todo el mundo, hoy día apenas se circunscriben a la isla de Madagascar y algunas zonas de África y el sureste asiático. Aunque su clasificación taxonómica está sujeta a constantes

cambios y controversias, entre los prosimios se distinguen 7 grandes familias, que engloban a unas 60 especies distintas (Cartmill & Smith, 2009).

a) Los gálagos (*galagonidae*): Primates muy activos y ágiles. Son capaces de cazar insectos al vuelo gracias a su desarrollado sentido del oído. Viven en los árboles y tienden a reunirse en pequeños grupos familiares de unos 6 individuos.

b) Los loris (*loridae*): Estos primates se mueven con cierta lentitud entre el follaje, aunque pueden ser rápidos si se sienten amenazados. Son de cola pequeña o inexistente y pueden agarrarse a las ramas con gran seguridad y durante mucho tiempo gracias a su pulgar opuesto y la flexibilidad que han desarrollado en tobillos y muñecas.

c) La familia de los daubentonia (*daubentoniidae*) que está formada por una sola especie, el aye-aye, un primate natural de Madagascar.

d) Los queirogaleidos o lemures pigmeos (*cheirogaleidae*): Primates endémicos de Madagascar y reciben este nombre por ser muy pequeños. Durante el día duermen en los árboles y por la noche salen a buscar alimento.

e) Los lémures (*megaladapidae* y *lemuridae*) son todos originarios de Madagascar y las Islas Comores. Son de morro húmedo y afilado y pasan la mayor parte del tiempo en los árboles aunque sus colas no son prensiles.

f) Los indris o lemures sedosos (indriidae): Incluyen las especies *avahíes*, *indris* y *sifakas*, viven en Madagascar y se caracterizan por sus largos y suaves pelajes.

Suborden Tarsioidea

Los tarseros son primates muy pequeños y se les llama así porque tienen el tarso, en las patas muy desarrollado, lo que les permite saltar con gran facilidad entre las ramas. Poseen una cola larguísima. Son naturales de las selvas tropicales y es difícil observarlos en la naturaleza. Son primates de hábitos nocturnos con ojos enormes, siendo en proporción, los más grandes de todos los primates. No pueden mover los ojos, siempre miran hacia adelante pero compensan esta limitación al poder girar la cabeza casi 360 grados. Los primates en este grupo son diminutos, el más grande no sobrepasa los 16 centímetros de longitud en el cuerpo y la cabeza. Todos ellos son naturales de las islas al sureste de Asia; desde las Filipinas hasta Sumatra. Su forma primordial de locomoción es trepar verticalmente los troncos de los árboles y saltar de rama en rama.

Suborden Antropoidea

Se divide en tres superfamilias: La *Ceboidea*; compuesta por los monos del Nuevo Mundo; la superfamilia *Cercopithecoidea*; formada por los monos del Viejo Mundo y la superfamilia *Hominoidea* (Marmelada, 2007).

Monos del Nuevo Mundo

Los monos del Nuevo Mundo (platirrinos) se dividen en dos familias, los *Callitricidae*; que incluye a los titíes y los tamarinos, y los *Cebida*; que incluyen a los monos araña y a los monos aulladores. El hábitat de los monos del Nuevo Mundo son las zonas tropicales y subtropicales de América del Sur y América Central. Los Monos del Nuevo Mundo son primates con tamaños que varían entre de 13 y 14 cm, con un peso de 119 g; en el titi pigmeo, hasta el mono araña muriqui, que mide entre 46 y 80 cm, con peso de 9,5 a 15 kg. Los monos del Nuevo mundo presentan colas largas en relación a la masa corporal y frecuentemente son prensiles, así como hocicos achatados, con las narinas en posición lateral. Se alimentan principalmente de frutas, que complementan con hojas, insectos y animales pequeños. Los monos del Nuevo Mundo están muy bien adaptados a la vida arborícola; poseen extremidades largas, manos delicadas, y cola apta para balancearse o agarrarse con facilidad de las ramas de los árboles. La almohadilla de la cola posee una sensibilidad táctil especial,

con surcos táctiles idénticos a los de los dedos de los humanos y una amplia representación en la corteza cerebral. Los monos del Nuevo Mundo se balancean libremente entre las ramas y pueden dar saltos en los que avanzan hasta cinco metros, mientras caen de una altura de quince metros. Muchas especies muestran organizaciones sociales territoriales, e incluso se presenta asociaciones de los grupos de dos especies diferentes; como el mono ardilla y el capuchino, que en el caso de los titís llegan hasta la defensa conjunta de un territorio común. En algunas especies ocurre el establecimiento de parejas monógamas de por vida, compartiendo las tareas de cuidado de las crías. (Cartmill & Kay, 1978; Kay et al., 1997; Kay et al., 2004).

Habitan por lo general las áreas intertropicales húmedas, densamente arboladas. Anteriormente, su área de dispersión abarcaba desde el límite sur de la región chaqueña y la selva paranaense (aproximadamente la latitud de la ciudad de Buenos Aires) hasta las cercanías del istmo de Tehuantepec y la falla del río Balsas en el sur de México. Los monos del Nuevo Mundo son las cinco familias de primates (*Callitrichidae*, *Cebidae*, *Aotidae*, *Pitheciidae* y *Atelidae*), que se encuentran en América Central y del Sur. El nombre científico de los monos del Nuevo Mundo, Platyrrhini, significa "nariz plana". Los monos del Nuevo Mundo carecen de visión tricromática. La visión del color en primates del Nuevo Mundo se basa en un único gen, en el cromosoma X para producir pigmentos que absorben la luz de longitud de onda media y larga, lo que contrasta con la luz de longitud de onda corta. Como resultado, los machos poseen un solo gen pigmento y son dicromáticos. Sin

embargo, las hembras pueden poseer dos alelos con diferentes sensibilidades y por lo tanto tener visión tricromática. A diferencia de otros primates más evolucionados, sus pulgares no son oponibles.

Las especies más pequeñas de monos del Nuevo Mundo presentan el cerebro con pocos surcos y cisuras, pero éstas se desarrollan en las especies de mayor tamaño, como es el caso de los atelinos, representados por el mono araña en México, en las cuales se aprecian similitudes en la cito-arquitectura de la corteza cerebral de otros primates más evolucionados. La voz estrepitosa de los monos aulladores; *Alouatta*, que tienen sacos laríngeos especiales, se utiliza para la afirmación de los derechos territoriales del clan. Este, contrariamente a las familias de la mayoría de los monos, incluye varios machos adultos, así como hembras jóvenes. La cooperación es asegurada por un lenguaje de por lo menos nueve sonidos distintos con “significados” definidos. Los monos araña; *Ateles*, tienen una organización en cierto modo semejante para su lenguaje. Se sabe poco de la historia evolutiva de los monos del Nuevo Mundo; se conocen fósiles sólo desde el Mioceno de Sudamérica, *Homunculus*. Constituye un misterio cómo llegaron a Sudamérica desde África, en un momento en que ambos continentes estaban ya separados por el Océano Atlántico (aunque menos extenso que en la actualidad). Dado el aislamiento y lo compacto del grupo que conforma la especie, se puede considerar que estos primates han evolucionado de manera independiente desde su origen a partir de los tarsioideos del Eoceno.

Monos del Viejo Mundo

Los monos del Viejo Mundo (catarrinos) existen en las regiones tropicales y subtropicales de Asia y África, aunque el mono macaco vive en Japón. Los monos del Viejo Mundo no tienen colas prensiles, pero tienen callosidades isquiáticas (almohadillas para sentarse) alrededor de la cola y la parte inferior, que son gruesas y callosas, diseñadas para sostener al mono mientras se sienta para alimentarse, dormir y descansar. Pueden distinguirse dos grandes grupos dentro de los monos del Viejo Mundo: La Superfamilia Cercopitecoidea y la Superfamilia Hominoidea. Los cercopitecoideos conservan la cola (con la única excepción de la mona de berbería: *Macaca sylvanus*). Otro carácter específico de los cercopitecoideos lo encontramos en la morfología de sus molares, cuyas cúspides están pareadas. Además, presentan caras más prominentes, y su locomoción es básicamente cuadrúpeda. Los cercopitecoideos se dividen en dos familias: Cercopithecidae y Colobidae.

Los primeros son omnívoros y africanos, sus cuatro extremidades son prácticamente de la misma longitud, las colas son más cortas y las caras más prominentes. En este grupo se encuentran, entre otros, las doce especies de macacos, los geladas, las dos especies de mandriles, y las cuatro de papiones (también llamados babuinos). Los Colobidae son filófagos y mayoritariamente asiáticos (con la excepción de los colobos, que son africanos), de hábitos más arborícolas y estructura corporal más

estilizadas. Además de los colobos, dentro de este grupo puede destacarse a los langures, que viven en los contrafuertes del Himalaya.

Hominoideos

Los especímenes vivos de esta superfamilia se dividen en tres familias: *Hylobatidae*, a la que pertenecen los gibones y los siamangs; *Pongidae*, en la que se incluyen los orangutanes, gorilas y chimpancés que son los grandes simios antropomorfos actualmente existentes, y *Hominidae* que está formada por numerosos géneros; de los que se han extinguido todos menos uno, el nuestro (*Homo*), que cuenta, en la actualidad, con una única especie, el *Homo sapiens sapiens*. Todos los primates no-humanos de la superfamilia hominoidea, presentan hocico retraído y una serie de adaptaciones esqueléticas a un insólito tipo de locomoción arborícola: la braquiación, la cual consiste en desplazarse por las ramas, colgados de los brazos y balanceando el cuerpo como un péndulo. Para ello, los hominoideos poseen el tórax aplanado del pecho a la espalda, en lugar de estar comprimido lateralmente como en el resto de los primates y en general en los mamíferos cuadrúpedos. Como consecuencia, los omóplatos se sitúan en la espalda, en lugar de a los lados del cuerpo. El ensanchamiento lateral del tórax también hace que la clavícula sea más larga. Todas estas modificaciones permiten una gran capacidad de movimientos del brazo por encima del nivel de los hombros, que unida a la de extender completamente los brazos y la movilidad de la muñeca hacen posible la braquiación.

Por otro lado, las manos se alargan mientras se reduce el primer dedo (el pulgar), para formar un auténtico gancho del que suspenderse. Esta modificación de la mano hace difícil a los hominoideos juntar las puntas de los dedos índice y pulgar. Los hominoideos poseen el tronco acortado en la región lumbar, con reducción del número de vértebras, lo que permite arquearlo tanto como a los demás primates, pero le confiere una estructura más sólida y facilita mantener el tronco erguido. También como consecuencia de la braquiación los brazos están más desarrollados que las piernas. La proporción entre la longitud de los brazos y la de las piernas varía en los antropomorfos entre 147 % en el siamang (una especie de gibón) y el 102 % en el bonobo (o chimpancé pigmeo). Por otro lado, las manos se alargan mientras se reduce el primer dedo (el pulgar), para formar un auténtico gancho del que suspenderse. Esta modificación de la mano hace difícil a los antropomorfos juntar las puntas de los dedos índice y pulgar.

Por supuesto que la adaptación posterior de nuestros antepasados a la marcha bípeda hizo cambiar algunas de las características que presentan los antropomorfos. En particular la pelvis y las piernas se han modificado drásticamente, la proporción entre los miembros en los humanos modernos es sólo del 72 %, y el dedo gordo del pie ya no es oponible, y está alineado con el resto de los dedos. Por otro lado, en las manos se ha alargado el dedo pulgar y se ha acortado el resto de la mano, recuperándose así la habilidad para manipular objetos pequeños que los demás hominoideos han perdido en parte.

Los gibones (géneros *Hylobates* y *Symphalangus*, respectivamente), son los hominoideos más pequeños (pesan menos de 15 kg), viven en el extremo sureste de Asia y son el grupo más diversificado con al menos, cinco especies. Viven en parejas que permanecen juntas durante toda la vida, participando por igual ambos sexos en el cuidado de las crías y en la defensa del territorio. No existen diferencias apreciables de tamaño entre los machos y las hembras. Son los homínidos más especializados en la braquiación, hasta el punto de que la mayor parte de su vida transcurre en las ramas y rara vez bajan al suelo.

También del sureste asiático, los orangutanes (*Pongo pygmaeus*) presentan las diferencias más notables de tamaño entre los sexos de todos los hominoideos: los machos pesan el doble que las hembras (alrededor de 80 kg y 40 kg, respectivamente). Los machos viven solos en un territorio que defienden frente a otros machos. Las hembras también son territoriales y conviven con sus crías no adultas. Los territorios de varias hembras se comparten con los de un macho, pero solo se encuentran para la reproducción. Los gorilas (*Gorilla gorilla*) son los hominoideos más grandes. Los machos pueden llegar a los 150 kg, mientras que las hembras no sobrepasan los 100 kg. Los gorilas viven en grupos formados por un macho adulto y varias hembras con sus crías. Dado su tamaño corporal, la mayor parte de su vida transcurre en el suelo, en donde se desplazan de manera cuadrúpeda apoyando en el piso las plantas de los pies y las segundas falanges de las manos. Son exclusivamente africanos. Se conocen dos especies de chimpancé, el chimpancé común (*Pan troglodites*) y el chimpancé enano o bonobo (*Pan*

paniscus). Ambos viven en el África occidental, estando separadas sus áreas de distribución por el curso del río Congo. Los chimpancés viven en grupos numerosos formados por varios machos adultos emparentados junto con varias hembras y sus crías. Los chimpancés son promiscuos y hay poca diferencia de tamaño entre los sexos (alrededor de 45 kg los machos y unos 35 kg las hembras). Los chimpancés suben a los árboles para acceder a los frutos, que son la base de su alimentación, y para pasar la noche. Como en el caso de los orangutanes y gorilas, los machos de los chimpancés no colaboran en el cuidado y alimentación de las crías. (Cartmill & Smith, 1978).

2.3 El estudio del sueño en los primates no-humanos

En la actualidad se han estudiado aspectos relacionados con la ecología, etología y la fisiología del sueño en una amplia gama de primates no-humanos.

Etología y Ecología

La metodología utilizada en los registros conductuales de los monos contempla la observación directa de campo y observaciones de laboratorio con circuito cerrado de televisión (Benca et al., 2000; Anderson, 1998). Dicha metodología ha permitido estudiar las conductas nocturnas de los primates, logrando además diferenciar periodos de sueño y vigilia, aunque con poca precisión, ya que la PSG es hasta la fecha, la técnica más precisa que existe para distinguir los estadios fisiológicos y conductuales que constituyen cada una de las distintas fases de sueño (Daley et al., 2006).

Las primeras observaciones sistemáticas en las que se analizaron los hábitos de descanso nocturno de los primates no-humanos, fueron realizadas en 1951, en el *Colobus*, el *Cercopithecus* y el *Papio* dentro de su hábitat natural (Buxton, 1951). Desde entonces se han desarrollado estudios científicos que han permitido obtener datos relevantes acerca del sueño de los primates. Algunas de las observaciones sobre el comportamiento nocturno de los primates no-humanos están centradas en

las relaciones sociales que tienen lugar durante la noche así como la termorregulación generada por el contacto físico entre los monos (Muñoz-Delgado et al., 1995). Sin embargo, las posturas corporales de sueño y los mecanismos neuromusculares que permiten a los monos no caer de los árboles mientras duermen, nunca ha sido estudiado.

En cuanto a la ecología relacionada al sueño de los primates, se han documentado las características físicas de los sitios elegidos para dormir y la ubicación de los árboles dentro de la selva. Se ha observado que los primates al elegir los sitios para dormir toman en cuenta el confort, la higiene, la cercanía con la comida y el agua. Estudios realizados en distintas especies de primates han mostrado que los monos tienen preferencia por dormir en las ramas de los árboles que en el piso, ya que ofrecen seguridad ante los depredadores (Anderson, 1998; Daley et al., 2006; Liu & Zhao, 2004).

Esta característica también se ha observado en los grandes simios, como el chimpancé (Coolidge & Wynn, 2006), lo cual sugiere que los primeros homínidos dormían también en las ramas de los árboles. Asimismo, se ha determinado que la construcción de camas para dormir es una característica que proviene de los grandes simios. El orangután, el bonobo y el chimpancé (el cual construye una cama nueva todos los días en un sitio distinto), comúnmente construyen camas en los

árboles, mientras que los gorilas lo hacen sobre la tierra (Fruth & Hohmann, 1996; Groves & Sabater, 1985)

Fisiología

Como se mencionó anteriormente, la PSG es la técnica más precisa que existe para evaluar el inicio, desarrollo, mantenimiento y término del sueño. En los humanos esta técnica requiere de las señales EEG, electromiográficas (EMG) y la actividad electrooculográfica (EOG) para su interpretación, por lo que en los monos se han utilizado estas mismas señales para la valoración de los estadios de sueño. El registro de la actividad EEG del sueño en los monos habitualmente se realiza con electrodos colocados de manera epidural, y a profundidad en áreas corticales y sub-corticales del cerebro.

Habitualmente las especies de primates que se han utilizado en este tipo de estudios son monos del Viejo Mundo; *Macaca mulatta* y el *M. nemestrina*, principalmente (Daley et al., 2006, Yao et al., 2013). Todos los procedimientos quirúrgicos se realizan bajo condiciones asépticas y de anestesia profunda, utilizando para ello Isoflurano o Ketamina. Comúnmente los animales reciben antibióticos durante el periodo pre y post operatorio, además experimentalmente se controlan las condiciones de luz/oscuridad, temperatura y alimentación. Hasta hace poco, la mayor parte de los registros PSG en los monos se habían realizado en condiciones de restricción de movimiento. En este tipo de estudios, los animales son habituados a la

silla de restricción de movimiento, en la cual se espera registrar el ciclo completo de sueño/vigilia por lo que el sujeto es habituado a permanecer en ella hasta por un lapso de 24 horas continuas (Benca et al., 2000). Sin embargo actualmente, gracias a los avances tecnológicos, se están implementando técnicas para registro PSG con mínima restricción de movimiento, lo cual permite obtener datos más fidedignos de las características fisiológicas y conductuales naturales del sueño (Daley et al., 2006; Hsieh et al., 2008).

Las regiones corticales que se utilizan para valorar los estadios de sueño y vigilia durante los registros PSG son las siguientes: Región occipital; en la cual se observa ritmo alfa reactivo al cierre de ojos y es característico de los estadios tempranos del sueño y del sueño MOR, la región central; en la cual se pueden observar las ondas lentas del No-MOR así como los husos de sueño típicos de la Fase 2, y la región frontal; en la cual se aprecian los cambios de voltaje relacionados a las distintas fases de sueño. Asimismo, se colocan electrodos sub-cutáneos en ambos cantos oculares para el registro del EOG y de manera similar, se registra la actividad de los músculos anti-gravitatorios para evaluar la actividad EMG relacionada al tono muscular (Rechtschaffen & Kales 1968; Weitzman et al., 1965).

Las fases o estadios del sueño de los monos, han sido evaluadas a partir de los criterios internacionales para sueño en humanos de todas las categorías de edad (Daley et al., 2006; Rechtschaffen & Kales 1968, Cruz-Aguilar et al., 2009). Dicho

criterio distingue en general dos estadios del sueño: el sueño MOR y el sueño No-MOR, el cual es subdividido a su vez en tres fases: fase 1, fase 2 y fase 3 o sueño Delta. La fase 1 se caracteriza por un enlentecimiento del EEG con ondas de baja frecuencia y de mayor amplitud con respecto a la vigilia. Además se observa ritmo alfa esporádico, el cual es el límite EEG entre la vigilia y el sueño. El ritmo alfa es característico de los estadios tempranos del sueño y se pueden observar brotes de este ritmo durante el sueño MOR. Durante la fase 2 del sueño No-MOR, se pueden observar ondas agudas en la zona central del cráneo, conocidas como puntas del vertex. Además se observan husos de sueño, los cuales son ritmos de amplitud creciente que van de 12 a 14 cps. (ciclos por segundo). El sueño Delta está conformado por frecuencias que van de 1 a 3 cps., las cuales gradualmente superan el 50 % de la época (20 min. continuos de registro EEG).

El sueño MOR, el cual se encuentra estrechamente relacionado con las ensoñaciones (Aserinsky & Kleitman, 1953), se caracteriza por la pérdida del tono de los músculos anti-gravitatorios (Chase & Morales, 1990) y desincronización cortical de bajo voltaje en el EEG; similar a la observada en los estadios de somnolencia. Además, durante esta fase, se pueden observar movimientos oculares rápidos (MORs). En el humano se ha demostrado que estos movimientos son originados por los potenciales ponto-genículo-occipitales (PGOs), los cuales son potenciales monofásicos de alto voltaje que se generan en la región pontina del tallo cerebral y se propagan hacia los sistemas oculomotor, visual, auditivo y límbico para provocar los MORs y probablemente contribuya a generar los fenómenos visuales y auditivos,

así como los fenómenos mnésicos, emocionales y vegetativos que acompañan a las ensoñaciones (Mouret, et al., 1963).

En los babuinos y en el mono ardilla se ha demostrado la existencia de potenciales electroencefalográficos equivalentes a los potenciales PGO (Balzamo, 1980), lo cual fundamenta la existencia de actividad onírica en los primates. Incluso, en un estudio realizado en el chimpancé donde se determinaron las diferencias entre los periodos de sueño MOR de la primera y última parte de la noche, se postuló que los sueños más vívidos de esta especie podrían ocurrir durante los últimos episodios de sueño MOR de la noche, ya que, como en el humano, estos episodios son más prolongados, se observa una aumento de la frecuencia de los MOR's y un EEG similar al observado durante la vigilia (Freemon et al., 1970).

Como los humanos, los primates tienen un periodo nocturno de sueño consolidado. En el *M. mulatta* se ha descrito que durante la noche, la Fase 1 ocupa el 10 %, la Fase 2 el 50 %, 20 % de sueño Delta y 15 % de sueño MOR (Daley et al., 2006). Sin embargo se ha observado que algunas especies de monos, como el *M. arctoides* no duerme toda la noche, siendo de carácter social las conductas nocturnas que se observan. A pesar de que es poco lo que se conoce del sueño en monos infantiles, en el chimpancé se ha reportado una disminución del sueño MOR a partir de los 3 meses de edad, con decremento de los periodos de vigilia durante la noche (Mizuno et al., 2006). Estudios realizados en el *M. nemestrina* infante se determinó que el sueño MOR ocupa el 12 % del tiempo total del sueño (Reite et al., 1976).

El sueño MOR de los primates arborícolas es de interés para el entendimiento de la evolución del sistema nervioso central en los primates ya que, de acuerdo con los reportes previos de la postura corporal para el sueño, planteamos la hipótesis de que no existe atonía muscular durante el sueño MOR de los primates arborícolas. Estudios previos han demostrado que todos los primates arborícolas duermen en posición vertical sobre las ramas de los árboles. Sin embargo, el mecanismo neuromuscular que permite a los monos no caer de los árboles mientras duermen, no se conoce. Estudios previos de PSG tanto en monos del Nuevo Mundo (Adams & Barratt, 1974; Breton et al., 1986; Wexler & Moore-Ede, 1984, 1985, 1986) como en monos del Viejo Mundo (Daley et al., 2006, Hsieh et al., 2008) han reportado posición vertical para el sueño MOR, pero no han reportado sueño MOR sin atonía muscular. En los estudios realizados en monos del Viejo Mundo, esto puede deberse a que han obtenido el registro de la actividad EMG de los músculos del cuello del mono y no del mentón. Posiblemente, los músculos del cuello no están involucrados en el mantenimiento de la posición horizontal durante el sueño MOR de los monos.

Existe evidencia de que los monos más grandes, incluyendo la mayoría de los monos del Viejo Mundo duermen en cuclillas o sentados, con las manos y los pies juntos entre las piernas que se encuentran flexionadas (Anderson, 1984). Washburn (1957) propone que en los monos del Viejo Mundo, las callosidades isquiáticas, sobre la que se concentra el peso corporal durante el reposo, son una adaptación para dormir en

las ramas. Las callosidades isquiáticas y las plantas de los pies ayudarían a conservar la estabilidad, mientras que la cola, que no es prensil, podría proporcionar equilibrio. Sin embargo esto no ha sido demostrado. Por otro lado, son escasos los datos electrofisiológicos previos en monos del Nuevo Mundo que se correlacionan con las posturas del sueño. El estudio del sueño de los primates de naturaleza arbórea y cola prensil; como es el mono araña, puede proporcionar nuevos datos que permitan entender la transición del sueño arbóreo al sueño sobre la tierra de los antropoides. Asimismo, el estudio del sueño de los monos del Nuevo Mundo; en caso concreto, el estudio científico del sueño del mono araña, puede aportar conocimientos nuevos acerca de la evolución del sistema nervioso central y las posturas del sueño en los primates, ya que su prominente cola prensil, su estilo de vida completamente arbóreo y su posición filogenética dentro del orden de los primates, hace a esta especie de primate, un ejemplar ideal para estudiar el mecanismo neuromuscular que permite a los monos de vida arbórea no caer de las ramas mientras duermen.

2.4 Aspectos biológicos y conductuales del mono araña

Anatomía

El mono araña, tienen largos y delgados brazos y una cola prensil. Posee una cabeza pequeña y redonda, y un cuerpo relativamente grande con respecto al resto de los monos del Nuevo Mundo (Rosenberger et al., 2008). El color general es negro en el dorso y blanco amarillento en el vientre; algunos ejemplares presentan un tono pardo dorado en los costados (Eisenberg, 1983). Mide en promedio entre 382 a 635 mm de la cabeza a la base de la cola, la longitud de la cola es de aproximadamente 508 a 890 mm (Nowak, 1999). Es considerada una de las especies más grandes de monos del Nuevo Mundo (Kinzey, 1997). El peso corporal de hembra adulta es de 6 a 8.9 kg y macho adulto de 7.4 a 9 kg, la masa cerebral en el adulto pesa 110.9 gr (Forbes, 1985). Otra característica anatómica, “la deficiencia” del dedo pulgar, es lo que denomina al género *Ateles*, pues significa imperfecto. Su esqueleto es ágil completamente diseñado para suspenderse y lanzar el peso del cuerpo (Rosenberger et al., 2008). La braquiación es el tipo de locomoción especializada propia de la especie.

Neurofisiología

Aunque son escasos los trabajos relacionados a este tema, los pocos que existen aportan información de interés para el presente estudio. De acuerdo con Hatschek (1908) y Wang & Kappers (1924) el mono araña posee el mayor desarrollo del neopallium de todos los primates con cola que existen. Las circunvoluciones de la corteza cerebral son muy similares a las observadas en los seres humanos y el chimpancé, principalmente de la corteza occipital. En los monos Rhesus la corteza occipital no tiene el surco. En el mono araña, por el contrario, el surco es profundo, numeroso y mantiene correspondencia con el del humano. De acuerdo con Schultz (1926) el tamaño de la cavidad craneal es más grande en proporción que el que se observa en otros monos. Asimismo se demostró que el peso del cerebro es mayor que el de otros monos antes estudiados.

De acuerdo con Fultron & Barenne (1933) la representación cortical de la cola del mono araña se encuentra ampliamente extendida en la región central, por encima de un surco profundo sin nombre que no existe en el resto de los monos. Utilizando estimulación eléctrica directamente en la corteza cerebral, estos autores encontraron que la representación de la cola ocupa la parte superior de la circunvolución pre-central. Estos autores también sugieren que los movimientos de la cola en los monos del Nuevo Mundo, son más dependientes de la integración cortical que los movimientos de los brazos o de las piernas. Sus resultados demuestran además, que el sistema cortico-espinal controla las extremidades ancestrales en los antropoides.

De acuerdo con estos hallazgos, podríamos suponer que los registros EEG que utilicen las derivaciones C3 y C4 del sistema internacional 10-20 EEG, corresponderían, como en el caso del humano, a las derivaciones adyacentes a la corteza motora en el mono araña.

Por otro lado Chico-Ponce de León y sus colaboradores (2009), a través de un estudio de Resonancia Magnética Funcional, observaron que los cerebros del mono araña y el humano tienen estructuras similares. Con respecto a la forma, las estructuras más parecidas fueron encontradas en el sistema límbico, sin embargo la curvatura cervical, la amígdala, el hipocampo, la comisura anterior y el colículo fueron más grandes proporcionalmente en el mono araña que en el humano.

Distribución geográfica del mono araña

El género *Ateles* presenta una de las distribuciones geográficas más amplias de todos los primates Neotropicales, pues comienza desde la Región Costera del Estado de Veracruz y Península de Yucatán en México, hasta el norte de Bolivia y de la costa pacífica de Ecuador, hasta las regiones del noreste de Sudamérica en Guyana y Surinam (Kellogg & Goldman, 1944; Rowe, 1996). Estudios acerca de la variación molecular, análisis anatómicos del esqueleto y variación cromosómica demuestran que existen entre tres o cuatro especies de *Ateles* (Froehlich et al., 1991; Collins & Dubach, 2001; Nieves et al, 2005). Estas son: *A. geoffroyi*, *A. belzebuth*, *A. paniscus* y *A. hybridus*, cuya clasificación taxonómica se describe en la Tabla 1. En

México se reconocen dos subespecies de *A. geoffroyi* : *A. g. vellerosus* y *A. g. yucatanensis* (Kellogg & Goldman, 1944). La distribución en México de *Ateles geoffroyi vellerosus* abarca los estados de Veracruz (Volcán de San Martín, Sierra de Santa Marta y Uxpanapa), Tabasco (Pantanos de Centla), Oaxaca (Los Chimalapas), y Chiapas (El Ocote, Sierra Madre de Chiapas, Humedales de la Costa del Pacífico y la Región Lacandona (Serio-Silva et al., 2006). El mono araña ha restringido las preferencias de su hábitat, a los estratos superiores del dosel, de la selva húmeda debajo de los 800 metros de elevación (Hernández–Camacho & Cooper; 1976; Klein & Klein, 1997; Roosmalen, 1985; Konstant, et al., 1985); sin embargo se han reportado especímenes a una altitud de hasta 1200 metros en México (Kellogg & Goldman, 1944).

Taxonomía Reino Animal

Filo:	Chordata
Clase:	Mamalia
Orden:	Primates
Infraorden:	Platyrrhini
Superfamilia:	Ceboidea
Familia:	Cebidae
Subfamilia:	Atelidae
Género:	Ateles
Especie:	<i>Ateles geoffroyi</i> , <i>Ateles belzebuth</i> , <i>Ateles paniscus</i> , <i>Ateles hybridus</i>

Sistema social

El mono araña presenta un sistema social denominado fisión – fusión, con la salida de las hembras de su grupo de origen al alcanzar la madurez sexual (Shimooka et al., 2008; Vick, 2008). Habiendo dos niveles de organización vinculada a su dieta y el forrajeo, el grupo o unidad no fragmentada principalmente para dormir y el subgrupo o unidad fragmentada para viajar y comer (Chapman et al., 1995; Shimooka, 2003; Di Fiore et al., 2008). El tamaño de las tropas varía de 4 a 35 individuos (Forbes, 1985)

Ciclo sueño-vigilia

El mono araña es considerada una especie con ciclo circadiano diurno, ya que es un mamífero que se encuentra activo durante el periodo de luz (Muñoz – Delgado, 2004). Dentro de las actividades que realizan los monos araña en libertad se pueden señalar: Descanso (54 %), viajar (27.6%), alimentación (10.8 %), interacciones sociales (6.9 %), vocalización (0.14 %) (Forbes, 1985).

Conservación de la especie

En cuanto a la conservación de esta especie de primate, de acuerdo con la NOM – 059 – 2010, se le considera en peligro de extinción (SEMARNAT, 2010); de igual manera la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y Recursos Naturales (IUCN) lo cataloga como en peligro crítico con la siguiente clasificación A4c, especificando que se encuentra en este status por la pérdida de su hábitat y en menor medida por el tráfico de individuos para ser utilizados como mascotas (IUCN, 2009). La Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres la protege dentro del Apéndice I, el cual prohíbe el comercio internacional de especímenes de esta especie, salvo en casos excepcionales; por ejemplo investigación. Para realizar estudios de electrofisiología del sueño en esta especie, resulta entonces fundamental trabajar con un registro PSG no invasivo, que permita mantener integras las condiciones de salud y bienestar de los monos antes, durante y después de los estudios.

3. JUSTIFICACIÓN

Los estudios PSG previos en monos han sido realizados solo en condiciones de laboratorio y su mayoría en restricción de movimiento. Estos estudios han utilizado; en su mayoría, técnicas invasivas, lo cual influye de manera negativa sobre la expresión natural del sueño. No existen estudios PSG previos en primates no-humanos realizados dentro del entorno natural de los animales, y que además se hayan centrado en analizar las posturas del sueño, la distribución temporal del ciclo sueño–vigilia, y el tono muscular asociado a las posturas para dormir. Lo anterior es de interés para la neurobiología del sueño, ya que no se conoce el mecanismo neuromuscular que permite a los primates arborícolas no caer de las ramas mientras duermen. Es de interés estudiar las variaciones del tono muscular de los monos del Nuevo Mundo, ya que podrían ayudar a explicar por qué estos primates no caen de las ramas mientras duermen, sobre todo durante el sueño MOR. El estudio del sueño de los primates de naturaleza arbórea; como es el caso del mono araña, puede proporcionar nuevos datos que permitan entender la evolución del sistema nervioso central y las posturas del sueño en los primates.

4. HIPÓTESIS

1. El mono araña presentará un patrón de sueño nocturno al ser estudiado en semi-libertad de movimiento en condiciones de cautiverio dentro de la selva.
2. La postura para el sueño No-MOR y MOR del mono araña será vertical, semi-fetal, al ser estudiado en semi-libertad de movimiento en condiciones de cautiverio dentro de la selva.
3. No se observará atonía muscular durante el sueño MOR del mono araña al ser estudiado en semi-libertad de movimiento en condiciones de cautiverio dentro de la selva.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo General

Determinar las características PSG y conductuales del sueño del mono araña.

5.2 Objetivos específicos

1. Conocer la distribución temporal del ciclo sueño-vigilia del mono araña.
2. Determinar las posturas específicas para cada fase de sueño.
3. Definir las características del tono muscular durante el sueño.

6. METODOLOGÍA

6.1 *Declaración de Manejo Ético de los Monos*

Los experimentos se llevaron a cabo en 6 ejemplares de monos araña mantenidos en la Unidad de Manejo Ambiental (UMA) "Doña Hilda Ávila de O'farril" del Patronato Pro-Universidad Veracruzana A.C. Este estudio fue aprobado por la Secretaría Mexicana del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT; número de autorización: SGPARN.03.VS.3644/11). La investigación se desarrolló de acuerdo con los principios para el manejo ético de los primates no-humanos de la Sociedad Americana de Primatólogos. El estudio también fue aprobado por el Comité de Ética e Investigación de la Instituto Nacional de Psiquiatría "Ramón de la Fuente Muñiz" (adscripción laboral de Manuel Alejandro Cruz Aguilar; número de autorización:

NC123340.2), de acuerdo con los lineamientos de Cuidado de Animales de experimentación de los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos de Norteamérica.

6.2 Ubicación

La UMA se encuentra dentro de la selva mexicana, en el municipio de Catemaco, perteneciente al estado de Veracruz. La zona se compone de 220 hectáreas de bosque de hoja perenne alta, media y baja. Asimismo, se compone de vegetación secundaria, como es la *recta olmeca*, *acahual*, *palo mulato* y pastizales. El clima local es cálido y húmedo, con lluvias durante todo el año. Tiene una temperatura media anual de 23.4 °C, con un máximo de 34.9 °C y una mínima de 17.1 °C. (Ibarra-Manríquez et al., 1997). El presente estudio se llevó a cabo en el verano (junio) del año 2012.

6.3 Animales

Estudiamos a 6 monos araña jóvenes-adultos de un peso promedio de 7 kg. Estos monos pertenecían a una colonia de nueve monos araña machos que habitaban en un gran encierro al aire libre, ubicado dentro de la selva Mexicana. A este encierro le denominamos como “encierro central”. Esta gran jaula medía 78.74 pulgadas de alto, por 472.44 pulgadas de largo y 236.22 pulgadas de ancho. (Figura 1). El techo de la jaula estaba construido de lámina, el piso era de tierra y las “paredes” del encierro estaban construidas de malla ciclónica de acero inoxidable. El encierro central estaba conformado por 12 jaulas, cada una de ellas medía 78.74 pulgadas de alto, por 78.74 pulgadas y 97.11 pulgadas de ancho. Cada uno de los 9 monos que componían la colonia, incluyendo los seis que estudiamos, vivían individualmente en cada una de estas 12 jaulas. Este tipo de encierro permite a los monos estar expuestos a algunos factores ambientales naturales que regulan importantemente la expresión natural del sueño; tal es el caso de la humedad, la temperatura, la lluvia, los sonidos naturales del entorno, la exposición a la luz natural del día y la noche, la interacción visual y vocal con el resto de los monos de la colonia, interacción con insectos, roedores, arácnidos y otros animales que pertenecen al ecosistema natural de los animales. (Guilbet et al., 2003; Sri Kantha & Suzuki, 2006). Los monos tuvieron libre acceso a comida y agua durante el estudio.



Figura 1. Encierro central. Esta gran jaula se encuentra ubicada en Catemaco, Veracruz. UMA "Doña Hilda Ávila de O'farril" del Patronato Pro-Universidad Veracruzana A.C./ Instituto de Neuro-etología de la Universidad Veracruzana.

6.4 Jaula para registro PSG

Diseñada especialmente para el estudio, la jaula PSG medía 78.74 pulgadas de alto, x 39.37 pulgadas de largo x 39.37 pulgadas de ancho (Figura 2). Esta jaula se construyó dentro de una de las 12 jaulas del encierro central. La jaula tenía una rejilla horizontal movable para ajustar su altura. Esta característica permite la restricción del movimiento de los monos durante el período de recuperación de la anestesia, ya que sus movimientos eran torpes y trataban, aún bajo los efectos de la anestesia, de subir a la cima de la jaula, pudiéndose lastimar en el intento. Este procedimiento evita cualquier lesión en el mono. Una vez recuperado de la anestesia, la altura de la jaula PSG se ajustó permitiendo un mayor rango de movimiento, hasta lograr el libre movimiento por completo. Dentro de la jaula, fueron colocadas troncos transversalmente, donde los animales podían descansar y dormir en su posición natural durante el experimento.



Figura 2: Jaula para el registro PSG. Esta jaula se construyó en el interior de una de las 12 jaulas que conforman el encierro central. En esta condición, los monos tienen contacto visual y vocal con el resto de la colonia de monos araña durante el estudio.

6.5 Procedimiento para el registro PSG

Anestesia

Para extraer a cada uno de los monos de la jaula en la que habitaban, los motivamos con algunas frutas para que el animal sacara la mano a través de la malla ciclónica del encierro, y aprovechamos esa oportunidad para sostener con firmeza el brazo y entonces aplicar el anestésico de manera intramuscular. Los animales fueron sedados con Zoletil 50 (2.4 mg/kg). La dosis empleada mantuvo a los animales sedados durante aproximadamente 45 minutos, tiempo suficiente para colocar los electrodos. En algunos casos, fue necesaria la sedación durante un período más largo, para ello la dosis adicional fue de 1.2 mg/kg.

Sujeción del mono

Después de retirar al animal de la jaula en que habita, el mono fue colocado en posición vertical sobre las piernas de uno de los investigadores dentro de la jaula en donde construimos la jaula PSG. Con una mano el investigador sujeta la parte posterior del mono y con la otra mano sostiene la cabeza del mono (Figura 3a). Los electrodos se colocan bajo anestesia.



Figura 3: Método y posturas de sueño. a) anestesia, b, c) la colocación de electrodos, d) protección de la trenza, e) protección de electrodos, f, g) ajuste de la gorra, h) recuperación del mono, activo y comiendo, i) libertad de movimiento, j) postura del sueño No-MOR k) postura del sueño MOR, y l) remoción de los electrodos.

Colocación de los electrodos

La colocación de los electrodos se realizó de acuerdo con el sistema internacional 10-20 para EEG humano (Jasper, 1958). Este sistema describe un método reconocido internacionalmente para ubicar la posición de los electrodos que se van a colocar sobre el cuero cabelludo. El sistema se basa en la relación entre la ubicación de un electrodo y la zona subyacente de la corteza cerebral. El número '10' y '20' se refieren al hecho de que las distancias entre electrodos adyacentes son del 10 % o 20 % del cráneo, según las derivaciones que se quieran registrar. Cada sitio tiene una letra para identificar el lóbulo y un número para identificar el hemisferio. Los números pares se refieren a las derivaciones del hemisferio derecho, mientras que los nones se refieren a las derivaciones del hemisferio izquierdo. En el presente estudio colocamos electrodos superficiales en las derivaciones O1-O2, C4-GND del sistema 10-20. Limpiamos cada sitio con una solución de alcohol al 70 %, y los electrodos se fijaron con colodión sobre el cuero cabelludo (Figura 3; b, c). El EOG se registró a partir de un electrodo colocado en el canto exterior de un ojo, y la actividad EMG fue adquirida con un electrodo colocado sobre el musculo *mentalis*, derivación convencional para evaluar las variaciones del tono muscular en los primates (Rettschaffen & Kales, 1968).

Protección del montaje PSG

Para proteger el montaje PSG, se utilizó la técnica de cable atado o “trenza”, similar a la utilizada en los estudios electrofisiológicos desarrollados en gatos y ratas. Por ello, todos los cables se unieron como una trenza por encima de la cabeza del mono y fueron aislados con cinta adhesiva de plástico; esto evita que el animal al morder o tirar de los cables, dañe el montaje PSG (Figura. 3 d). Para proteger los electrodos, fue necesario diseñar un gorro de algodón-lycra (Figura. 3 e,f). Se utilizó una medida estándar basada en la medida promedio de la cabeza de un mono araña joven-adulto. La gorra se ajustó en el momento de la colocación cosiéndola con aguja e hilo a través de la parte posterior y de la base. Se colocaron dos gorras en cada mono para dar una mayor resistencia al montaje PSG. Es necesario coser la trenza a las dos gorras, para que al tirar el mono de la trenza, la fuerza esté contenida por las gorras y no directamente en los electrodos, que fácilmente, al jalar el animal, se desprenderían. Posteriormente, utilizando unas tijeras se hicieron los orificios para los ojos, la boca y la nariz (Figura. 3 g).

Período de habituación

Inmediatamente después de la colocación de los electrodos, el mono se introdujo en la jaula para el estudio PSG (09:00 a.m. aproximadamente), y el período de habituación dio inicio, el cual incluía el tiempo de recuperación de la anestesia (aproximadamente 1 h.). Los animales se habituaron a las molestias del montaje PSG y la restricción de la jaula durante 22 horas continuas, desde el momento en que se colocó al mono en la jaula, hasta el día que se extrajo de ella. Fue necesario limpiar la jaula y ayudar al mono a convivir con el montaje PSG de forma continua para lograr una habituación satisfactoria (Figura 3 h, i).

6.6 Registro PSG

Los registros PSG se realizaron inmediatamente después de las 22 h. del período de habituación. Los registro PSG análogos obtenidos en gráficas de papel y tinta, fueron adquiridos durante 24 horas continuas bajo el ciclo de luz/oscuridad natural, el cual comprendió de las 07 a.m. a las 07 a.m. del día siguiente. Los registros se llevaron a cabo utilizando un polígrafo GRASS, Modelo 7-D (Facultad de Psicología, Laboratorio de Neurociencias, UNAM) a una velocidad de 12 milímetros / segundo.

Se utilizó un filtro pasa-bandas para adquirir el EEG de 1-25 Hz, un filtro EOG de 10-30 Hz y un filtro para registrar las señales EMG de 10 a 100 Hz.

Remoción de los electrodos

Al término del registro PSG, los animales fueron liberados y ubicados nuevamente en la jaula que habitan. Utilizando la rejilla horizontal movable, el animal fue restringido a su máximo de movimiento y anestesiado con 1.2 mg / kg. de Zoletil 50. El animal fue extraído entonces de la jaula y las gorras se cortan con tijeras, los electrodos fueron removidos por medio de algodón empapado en acetona (Figura 3 I). El mono fue entonces devuelto, físicamente integro, a la jaula en donde comúnmente habita.

6.7 Análisis

Período de habituación

La efectividad del periodo de habituación se evaluó a partir del análisis de la frecuencia de aparición de dos conductas específicas: el número de veces que los monos jalaban los cables y el número de veces que intentaron quitarse las gorras durante las 22 h del periodo de habituación. Se obtuvieron los valores promedio y la

desviación estándar (DE) de cada conducta y se utilizó la prueba t de Student para comparar el número de intentos de ambas conductas entre las 3 primeras horas y las 3 últimas del periodo de habituación y así corroborar la eficacia de dicho periodo.

Patrones electrofisiológicos de los estados de vigilancia

Las diferentes fases del sueño se evaluaron visualmente en épocas continuas de 12 segundos, utilizando los criterios Internacionales de Rechtschaffen y Kales (1968) para la evaluación visual de registros PSG en primates.

Posturas para dormir

Asimismo, se realizó la descripción cualitativa de los registros PSG de forma concomitante con las posturas naturales del sueño adoptadas por los monos. Se tomaron al azar distintas fases de sueño tanto del periodo de luz y oscuridad, y se registró la posición observada.

Distribución temporal del ciclo sueño –vigilia

Se analizó la distribución temporal de las fases de sueño-vigilia a través de las 24 h. del ciclo de luz-oscuridad. Se analizaron por separado ambas fases del ciclo

nictemeral. Para ello, se obtuvieron los siguientes estadísticos en el periodo de luz y en el periodo de oscuridad por separado: La eficiencia del sueño (EFFIC: porcentaje total de sueño del periodo de luz y del periodo de oscuridad), el tiempo total de sueño (TTS), la latencia del sueño (SLA), y el porcentaje de tiempo total que ocupa cada fase del sueño y la vigilia (TT). Se calculó la duración promedio del ciclo del sueño (calculado a partir de la cantidad acumulada de tiempo de sueño desde el inicio del episodio de un periodo de sueño MOR al comienzo del siguiente), y la duración promedio de sueño MOR. Para conocer las diferencias ente el periodo de luz y oscuridad de los estadísticos mencionados, se utilizó la prueba t de Student. Las diferencias se consideraron significativas con una $p \leq 0.05$.

7. RESULTADOS

7.1 *Período de habituación*

Los ejemplares de monos araña estudiados mostraron una habituación adecuada para realizar posteriormente los registros PSG, ya que el número de veces que los animales intentaron quitarse las gorras, disminuyó significativamente entre las 3 primeras horas (media: $36.50 \pm \text{DE: } 12,69$ números intentos) y las últimas 3 horas (media: $3 \pm \text{DE: } 2$, número de intentos) del periodo de habituación ($t=6.38$, $p<0,001$). Del mismo modo, la prueba t de Student mostró diferencias significativas entre las primeras 3 horas. (media: $38.66 \pm \text{DE } 17.97$ números intentos) y las 3 últimas horas. (media: $1.16 \pm 1.32 \text{ DE}$; número de intentos) del periodo de habituación, para en el número de veces que intentaron los monos tirar de los cables ($t=5.09$, $p<0.001$). Ambas conductas mostraron una tendencia a la extinción al final del período mencionado (Figura 4).

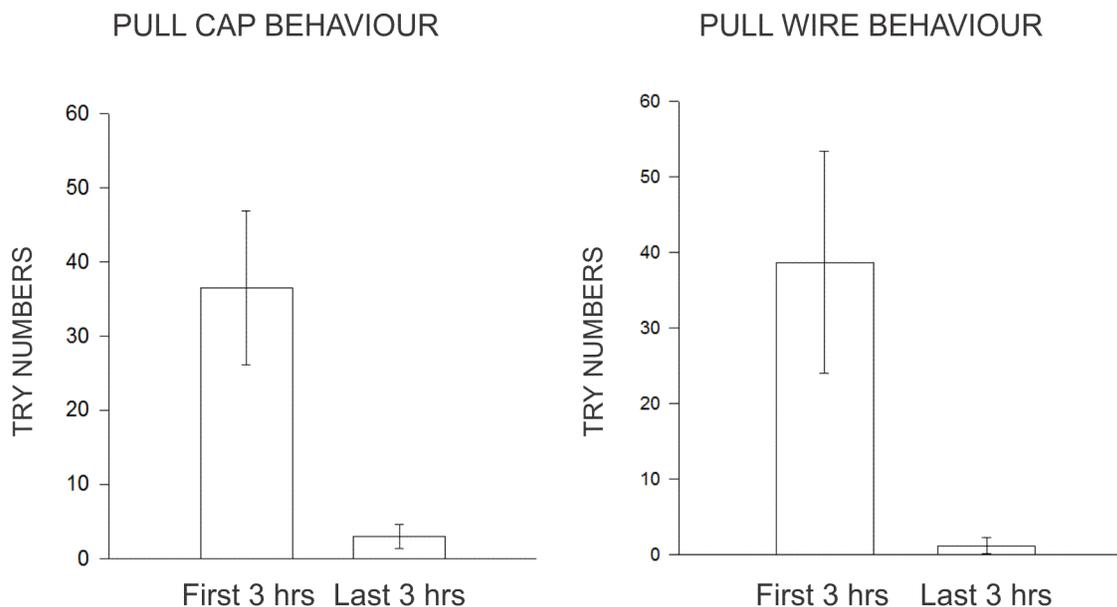


Figura 4: Número de veces que los monos jalaban los cables y el número de veces que intentaron quitarse las gorras durante todo el período de habituación (n=6). El eje Y representa el número de intentos en cada conducta; el eje X muestra la primera y las últimas tres horas de habituación. Se observó que hay diferencias estadísticamente significativas en la frecuencia de ambos comportamientos a través del tiempo, con una clara tendencia a la extinción al final del período de habituación. Las diferencias se consideraron significativas con una $p \leq 0.05$.

7.2 Patrones electrofisiológicos de los estados de vigilancia

Los ejemplares estudiados mostraron diferentes estados de la vigilancia durante todo el ciclo de luz-oscuridad. La vigilia se caracterizó por la actividad rápida EEG de bajo voltaje, concomitantemente con gran amplitud de la actividad EMG y una gran cantidad de movimientos oculares. Durante la somnolencia, es decir, la transición de la vigilia al sueño, se observó un predominio del ritmo alfa en la región occipital. La fase 1 se acompañó de cambios claros en el EEG, pasando gradualmente de la actividad de baja amplitud de frecuencias rápidas, a una actividad de gran amplitud y ondas lentas con un predominio de las ondas theta. Durante la fase 2 del sueño No-MOR, en la derivación central, se observaron husos de sueño, así como puntas del vertex y complejos K. Esta fase de sueño fue comúnmente seguida por el sueño Delta, caracterizado por las ondas lentas de gran amplitud (1-3 Hz) que ocuparon más del 20 % de la época. La actividad EMG disminuyó progresivamente a lo largo del sueño No-MOR, mientras que el EEG disminuyó y aumentó su amplitud. La actividad EEG durante el sueño es siempre simétrica en ambos hemisferios cerebrales. El sueño No-MOR siempre fue seguido por el sueño MOR, el cual fue caracterizado por la desincronización cortical, y los movimientos oculares rápidos. Sin embargo, a diferencia de la mayor parte de los mamíferos estudiados, el análisis

visual mostró que el sueño MOR no se acompañó de atonía muscular. La amplitud de la señal EMG mínima se observó durante el sueño Delta (Figura 5).

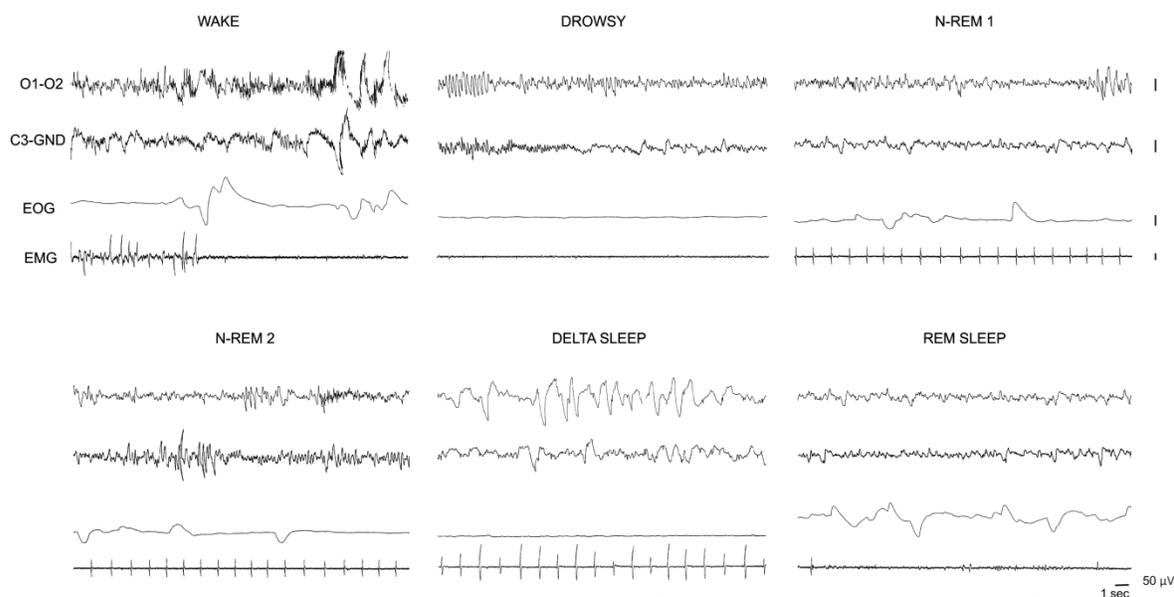


Figura 5: Trazos PSG representativos de cada una de las fases de sueño y vigilia observados durante el estudio. Se muestran épocas de 12 segundos de registro PSG, con 2 canales de EEG (O1-O2, C3-GND), un canal para el registro del EOG y un canal de EMG del músculo *mentalis*. Durante el estado de somnolencia; característico del cese de la vigilia e inicio del sueño, se observa ritmo alfa en la región occipital. La fase 1 del sueño No-MOR, muestra frecuencias de bajo voltaje con un predominio de las ondas theta. Durante la fase 2, se observan complejos K y husos de sueño. Durante el sueño Delta, se pueden observar ondas lentas de gran amplitud y baja frecuencia. Durante el sueño MOR se observa desincronización cortical y movimientos oculares rápidos. Sin embargo, el EEG del sueño MOR no está acompañado de atonía muscular.

7.3 Posturas para dormir

Durante todas las fases del sueño, cada uno de los monos estudiados adoptó una postura semi-fetal vertical sobre el tronco, siempre en la parte superior de la jaula, abrazando sus piernas con la cola alrededor de su cuerpo. En algunas ocasiones, durante el periodo de luz, los monos arrollaban la cola mientras dormían en algún tronco o en la malla de la jaula (Figura 3 j, k). Asimismo, en algunas ocasiones observamos que durante el día (Fase 1, fase 2), los monos dormían en una posición supina sobre el suelo. Durante el sueño MOR, observamos que la cabeza desciende ligeramente de manera frontal.

7.4 Distribución temporal del ciclo sueño -vigilia

El análisis estadístico reveló que existen diferencias significativas entre los períodos de luz y oscuridad del ciclo sueño-vigilia del mono araña (Tabla 1). Se observó que los valores promedio de la eficiencia y del tiempo total de sueño son mayores durante el periodo de oscuridad (EFFIC: media: $54.80 \pm DE: 10.21$ %; TTS: media: $394.47 \pm DE: 73.10$ min.) en comparación con los del período de luz (EFFIC: media: $9.61 \pm DE: 8.10$ % ; TTS: media: $69.28 \pm DE: 58.45$ min). Asimismo, observamos que el porcentaje del tiempo que pasan los monos en vigilia durante el período de luz (TT: media: $90.38 \pm DE: 8.10$ %) es mayor al observado en el periodo de oscuridad

(TT: media: $45.19 \pm \text{DE: } 10.21 \%$). La fase 1 y 2 del sueño No-MOR se observaron durante todo el ciclo de sueño-vigilia, pero el porcentaje de ambas fases fue más altos en la noche (fase 1, TT: media: $6.85 \pm \text{DE: } 2.26 \%$; fase 2, TT: media $36.57 \pm \text{DE: } 10.33 \%$) que durante el día (fase 1, TT: media: $3.33 \pm \text{DE: } 2.07 \%$; fase 2, TT: media: $6.27 \pm \text{DE: } 6.54 \%$). El sueño Delta y el sueño MOR se observaron solo después del atardecer. El sueño Delta ocupa el 4.24% ($\pm \text{DE: } 2.80$) del tiempo total del período de oscuridad, mientras que el sueño MOR el 7.13% ($\pm \text{DE: } 2.19$). La duración promedio del ciclo del sueño fue de $68,06 \text{ min}$ ($\pm \text{DE: } 33.47$). La duración promedio de sueño MOR fue de 6.88 min ($\pm \text{DE: } 1.71$). La Figura 6 muestra un hipnograma típico del mono araña, en el cual se observan las características del ciclo sueño-vigilia arriba descritas. Cabe señalar que durante nuestros estudios, observamos que los factores climáticos, tales como las corrientes de aire, la lluvia y la nubosidad, interfieren con la continuidad del sueño nocturno, al igual que la presencia de algunos roedores, arañas, y la serpiente venenosa *Bothropsasper* o “nauyaca”.

Tabla 1: Distribución temporal del ciclo sueño vigilia del monos araña (n=6). Valores promedio (MED) y desviación estándar (SD) de las variables de cada grupo. Eficiencia del sueño (EFFIC), tiempo total de sueño (TTS), latencia del sueño (SLA), porcentaje del tiempo total que ocupa cada fase del sueño (TT). Las diferencias se consideraron significativas con una $p \leq 0.05$. (*).

	LIGHT		DARKNESS		t	P
	MED	SD	MED	SD		
EFFIC (%)	9.61	8.10	54.80*	10.21	-8.48	0.001
TT SLEEP(min)	69.28	58.45	394.47*	73.10	-8.51	0.001
LATENCY(min)						
1	154.04	194.30	95.32	67.42		
2	150.10	190.75	104.81	69.24		
DELTA	NO	NO	198.03	70.62		
REM	NO	NO	229.72	69.10		
% (TT)						
W	90.38*	8.10	45.19	10.21	8.48	0.001
1	3.33	2.07	6.85*	2.26	-2.80	0.019
2	6.27	6.54	36.57*	10.33	-6.06	0.001
DELTA	NO	NO	4.24	2.80		
REM	NO	NO	7.13	2.19		
MEAN REM INTERV(min)			68.06	33.47		

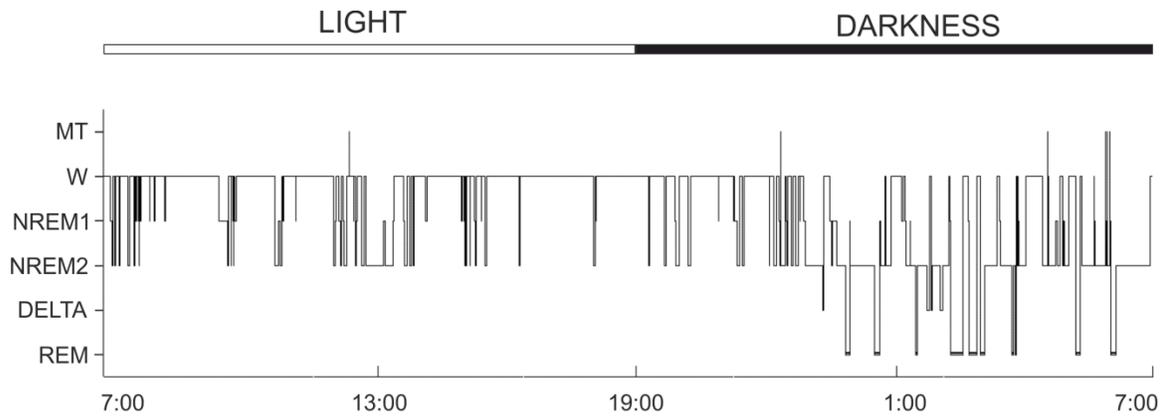


Figura 6: Hipnograma representativo de la distribución temporal del ciclo sueño-vigilia del mono araña. El Hipnograma muestra 24 horas de registro PSG, el cual inició a las 7:00 am, y terminó a las 7:00 am del día siguiente. La posición de cada línea horizontal en la hipnograma, corresponde a la etapa del sueño representado en el eje Y. MT: movimiento, W: vigilia, fase 1, fase 2, sueño Delta y sueño MOR.

8. DISCUSIÓN

Observaciones cualitativas acerca del Método

Este es el primer estudio electrofisiológico y conductual del sueño en monos del Nuevo Mundo, que viven en encierros al aire libre dentro de la selva tropical utilizando un método PSG semi-restrictivo, no invasivo. Los registros PSG analógicos que obtuvimos fueron de alta calidad durante todo el estudio, permitiendo que cada estado de vigilancia fuera fácilmente identificable. A diferencia de un estudio PSG en condiciones de laboratorio, los animales estuvieron expuestos a factores del medio ambiente natural que regulan la expresión del sueño. La técnica PSG con libertad de movimiento utilizada en el presente estudio permitió a los monos desarrollar todas sus funciones fisiológicas básicas de manera natural. La locomoción normal y comportamiento posicional-suspensivo observado en todos los animales, refleja la habituación óptima a las condiciones del estudio. Por otro lado la presencia de ritmo alfa, el cual ha sido asociado con la conciencia tranquila y relajada, es prominente en los animales con movimientos oculares sacádicos, gran corteza visual, y visión binocular frontal, y ocurre en los seres humanos en ausencia de estímulos sensoriales (Basar et al., 2001). La presencia de ritmo alfa en la corteza visual de los monos durante la transición del sueño a la vigilia, refleja la habituación de los monos a los métodos utilizados en presente estudio. Estamos convencidos de que las

técnicas PSG aplicadas en los monos aquí estudiados, podrían utilizarse para desarrollar estudios del sueño en otras especies de monos del Nuevo Mundo.

Patrones electrofisiológicos del sueño

Con respecto a nuestra hipótesis referente a la similitud entre los patrones de PSG de monos araña y otros primates arborícolas, nuestros resultados sugieren que sólo el sueño No-MOR es similar al de otros primates arborícolas antes estudiados, ya que, tal como lo habíamos hipotetizado, durante el sueño MOR no se observó atonía muscular. El sueño MOR sin atonía muscular en primates, no había sido reportado, este es el primer estudio científico que lo demuestra. El mecanismo neuro-muscular responsable de la atonía muscular típica de los mamíferos se encuentra muy bien documentado. Como se ha descrito anteriormente por diferentes autores (Baghdoyan et al., 1993; Datta et al, 1991, 1992.; Datta & Siwek, 1997; Hernández-Peón et al., 1962; Jouvet, 1962), los sistemas colinérgicos del tallo cerebral se encuentran altamente activos durante el sueño MOR. Asimismo, el prosencéfalo basal hipotalámico, así como las células glutamatérgicas del *locus sub-coeruleus* aumentan su actividad durante el sueño MOR (Siegel & Rogawski, 1988). Estas células desencadenan atonía muscular durante el sueño MOR a través de sus proyecciones caudales que inducen la parálisis al inhibir a las motoneuronas.

Asimismo, se ha descrito que las neuronas del *peri-locus coeruleus alfa* y la sección medial del *locus coeruleus alfa*, que se encuentra en la región pontina y el núcleo reticular magnocelular de la médula oblongada ventromedial, son responsables de atonía muscular durante el sueño MOR mediante mecanismos colinérgicos y colinoceptivos (Chase & Morales, 1990, 2000). En los monos araña, y posiblemente en el resto de los primates arborícolas, este mecanismo neuromuscular debe ser selectivo para permitir la actividad tónica en algunos músculos que permiten la preservación de una posición vertical. Aunque se ha demostrado que el control de la atonía muscular se encuentra en el tallo cerebral, existe evidencia de que la corteza motora participa en la regulación del tono muscular elevado que se observa en el sueño MOR de algunas patologías que comprometen alteraciones del tono muscular durante el sueño (Schober, 2004) . El sueño MOR sin atonía también se ha descrito en otras especies de mamíferos (Berger & Walker, 1972), así como en casi todas las especies de aves (Ayala-Guerrero et al., 2003; Roth et al., 2006).

Posturas para dormir

Con respecto a la hipótesis que planteamos sobre la adopción de una posición semi-fetal vertical para dormir, se observó que, al igual que otros primates arborícolas, los monos araña también adoptaron una postura semi-fetal vertical durante todas las fases de sueño, incluyendo el sueño MOR. Existe evidencia de que la postura del sueño observada en el presente estudio puede reflejar las posturas del sueño que

adoptan los monos araña silvestres y sugieren fuertemente que el entorno experimental utilizado en el presente estudio no influyó de manera significativa en las posturas corporales observadas. González-Zamora y colaboradores, (2012) mostraron que los monos araña comen y duermen en los árboles *Dialiumguianense* y *Brosimummalicastrum*, dos árboles de la selva Lacandona. Otras especies de árboles que utilizan los monos araña para dormir son el *Licania ornitorrinco*, *Terminaliaamazonia* y *Pouteria sp.* Estas especies de árboles comparten una arquitectura similar, ya que pueden alcanzar más de 40 m de altura, y estructuralmente están compuestos por troncos rectos con contrafuertes grandes bien formadas, así como grandes coronas que ofrecen abundantes ramas laterales y muy largas (Pennington y Sarukhán, 2005). Sin embargo, las delgadas ramas de estos árboles apenas podían dar apoyo para adoptar otra posición (es decir, la posición en decúbito prono o supino) que no sea la semi-fetal vertical. La posición semi-fetal vertical en el mono araña, como en el resto de los primates, refleja soluciones adaptativas a los problemas de termorregulación y estabilidad en el lugar para dormir (Anderson, 2000). Una posición prona o supina en las copas de los árboles, no asegura la óptima termorregulación, ya que se evitaría el contacto físico con otros monos, lo cual favorece la termorregulación adecuada durante la noche para los primates (Anderson, 1984; Day et al., 1968; Takahashi, 1997; Tollman, 1982). Además, el calor corporal es mejor retenido en posición semi-fetal vertical que en algún otra (Anderson, 2000).

Aunque es posible ver monos araña dormir solo en la naturaleza, a menudo duermen en subgrupos de 2 o 3 monos, manteniendo contacto brazo con brazo, lo que podría sugerir que la atonía muscular podría depender de si los monos tienen o no un compañero que les permita recargarse y darse soporte entre ellos para no caer. Sin embargo, esto es poco probable, ya que para que esto pudiera ser posible, los episodios de sueño más profundos tendrían que estar fuera de sincronía entre los miembros del grupo, para que el tono muscular de un mono ayude a apoyar a otro mono. Pensamos que en los primates arborícolas, el mecanismo neuro-muscular está regulada por la posición del cuerpo; es decir, que durante el sueño, el cerebro posiblemente detecta la posición del cuerpo a través del sistema vestibular, y el mecanismo neuromuscular realiza los ajustes necesarios para evitar la caída.

Ciclo sueño-vigilia

Con respecto a la hipótesis que planteamos sobre la consolidación del ciclo sueño-vigilia, se observó que los monos araña muestran una distribución nocturna monofásica de sueño; tal como lo habíamos predicho, ya que la eficiencia, el tiempo total y el porcentaje de la fase 1 y 2 del sueño No-MOR fueron mayores durante la noche que durante el día. Asimismo, no se observaron episodios de sueño Delta y de sueño MOR durante el día, solamente durante la noche. De acuerdo con estos resultados, el mono araña es un primate diurno.

Con respecto al alto porcentaje de vigilia observado en el período de oscuridad (45.19 %), pensamos que esto podría deberse a los factores naturales del entorno, así como a la necesidad de reajustar la posición corporal para dormir, con el fin de asegurar que no se caerá del árbol. En los primates arborícolas más pequeños se han reportado frecuentes cambios de fases de sueño y una gran cantidad de vigilia nocturna (Bert et al, 1970;. Kripke et al., 1968; Reite et al, 1965), Es interesante observar que estos períodos de vigilia han sido correlacionados con el riesgo de depredación por especie. (Bert y Pegram 1969; Capellini et al., 2008). Por otra parte, se encontró que, durante la noche, el porcentaje de la fase 2 del sueño de No-MOR es mayor (36.57 %) que en otros monos del Nuevo Mundo antes de estudio. Adams & Barrat (1974) muestran un 16.0 % en los monos capuchinos; Por otro lado, Breton y sus colegas (1986) encontraron un 20.5 % en la misma especie. La fase 2 del sueño de No-MOR es la etapa normalmente dominante en los primates más evolucionados (Adams & Barrat, 1974); por lo tanto, la cantidad de fase 2 observado en los monos araña podría estar relacionada con el notable desarrollo cortical que caracteriza a esta especie de primate del Nuevo Mundo (Fultron y Dousser, 1933).

De manera interesante, se observó que el sueño Delta se presenta principalmente durante la primera mitad de la noche, pero es de muy corta duración, y el porcentaje de la fase es sólo del 4.34 %. En el mono araña, esto podría deberse a que durante el sueño Delta se observa la mayor disminución en el tono muscular. Nuestros resultados sugieren que la duración del sueño Delta tiene un valor evolutivo, ya que

esta etapa del sueño tiene un elevado costo adaptativo, por ser la fase de sueño en la que el mono es más vulnerable a la depredación, a caer del árbol mientras duerme durante la noche en un ambiente natural. Con respecto a la cantidad de sueño MOR, el presente estudio reveló que el porcentaje de esta fase y su duración promedio, son consistentes con los hallazgos descritos en otros monos del Nuevo Mundo. Estudios previos han sugerido que la cantidad de sueño MOR es baja en las especies que presentan mayor riesgo a la depredación (Bert et al., 1970; Bert y Pegrarn, 1969). Nuestros resultados muestran que el porcentaje de sueño Delta es inferior al porcentaje de sueño MOR. Esto, en conjunto con la notable disminución en el tono muscular observada durante el sueño Delta, sugiere que el sueño de ondas lentas tiene un costo adaptativo importante en los primates arborícolas, mucho más que el sueño MOR, como se ha sugerido en el humano.

Adaptaciones para el sueño arbóreo

Si el mono araña duerme toda la noche en la misma posición semi-fetal vertical y el sueño implica una disminución del tono muscular, al punto de perderlo por completo durante el sueño MOR, ¿Por qué los monos arborícolas no se caen de las ramas mientras duermen? Nuestros resultados obtenidos en el mono araña, sugieren que los cambios frecuentes de fases de sueño, una gran cantidad de vigilia, una baja cantidad de sueño delta y la falta de atonía muscular durante el sueño MOR podrían explicar este fenómeno. En el presente trabajo mostramos, por primera vez,

evidencia de que el sueño MOR se presenta sin atonía en monos araña. Estudios previos han demostrado que los primates arborícolas duermen en posición vertical, lo que sugiere fuertemente que cuando duermen en sus entornos naturales, el sueño MOR sin atonía muscular puede ser prominente. Sin embargo, los estudios anteriores que han utilizado la PSG, tanto en monos del Nuevo Mundo (Adams & Barratt, 1974; Breton et al., 1986; Wexler & Moore-Ede, 1984, 1985, 1986) como en monos del Viejo Mundo (Daley et al., 2006, Hsieh et al., 2008) no han reportado sueño MOR sin atonía muscular, a pesar de que si han reportado posiciones verticales para el sueño MOR. En los estudios realizados en monos del Viejo Mundo, esto puede deberse a que utilizaron registros EMG del cuello y no del mentón y posiblemente, el músculo del cuello no está involucrado en el mantenimiento de la posición horizontal durante el sueño MOR de los monos. Existe evidencia que los monos del Viejo Mundo, por lo general duermen en cuclillas o sentado, con las manos y los pies juntos entre las piernas flexionadas (Anderson, 1984). Washburn (1957) propone que las callosidades isquiáticas, áreas de piel endurecida, sobre la que se concentra el peso corporal durante el reposo, son una adaptación para dormir en las ramas. Las callosidades isquiáticas y las plantas de los pies ayudan a conservar la estabilidad, mientras que la cola podría proporcionar equilibrio. Sin embargo esto no ha sido demostrado. Por otro lado, los datos electrofisiológicos previos en monos del Nuevo Mundo que se correlacionan con las posturas del sueño son escasos.

Sabemos que nuestras observaciones sobre la atonía muscular del sueño MOR no explican plenamente la capacidad de los monos araña para dormir en posición vertical. Sin embargo, nuestros resultados sugieren que el músculo *mentalis*, en esta especie de primate podría pertenecer a un grupo muscular específico que mantiene el equilibrio y la postura vertical durante el sueño MOR. La cola prensil tiene un papel fundamental durante la locomoción de los monos araña, por lo que representa un elemento fundamental de la braquiación y las posturas de suspensión en esta especie (Jungers y Stern, 1981; Rosenberger, 2008; Youlatos, 2002). Es por ello que sugerimos implementar el estudio de grupos de musculares de la cola durante el sueño.

9. CONCLUSIONES

1. Los patrones PSG del sueño No-MOR en monos araña son similares a los observados en otros primates, incluyendo a los seres humanos.
2. La postura siempre es semi-fetal vertical, tanto en el sueño No-MOR como en el sueño MOR.
3. Los continuos cambios de fases, los micro despertares, la proporción de sueño Delta y la falta de atonía muscular pueden explicar por qué los monos araña no caen de los árboles mientras duermen.

PERSPECTIVAS

La técnica PSG utilizada en el presente estudio permite obtener los espectros de potencia de la actividad EEG. Los análisis espectrales descomponen una forma de onda compleja en una suma lineal de componentes de ondas más elementales. Utilizando este método, algunos investigadores han sugerido que la banda beta EEG se encuentra relacionada con el mantenimiento de las contracciones tónicas. Las contracciones tónicas son necesarias para mantener una postura por largo tiempo, tal como la que se observa durante el sueño del mono araña. La evidencia que existe sobre la relación entre la banda beta EEG y la actividad motora, sugiere que la banda beta podría estar relacionada con el tono muscular necesario para que el sueño MOR no presente la atonía muscular en los primates de vida arbórea. Teniendo en cuenta el papel fundamental que desempeña la cola en la locomoción arbórea del mono araña, resulta de interés estudiar las variaciones del tono muscular de la cola y otros músculos posturales durante el sueño y determinar su relación con la actividad beta EEG de la corteza motora.

10. REFERENCIAS

Adams PM, Barratt ES. Nocturnal sleep in squirrel monkeys. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1974; 36:201–204.

Anderson JR. Ethology and ecology of sleep in monkeys and apes. *Advances in the Study of Behavior*, 1984; 14:165–229.

Anderson JR. Sleep, sleeping sites, and sleep-related activities: awakening to their significance. *American Journal of Primatology*, 1998; 46:63–75.

Anderson JR. Sleep-related behavioral adaptations in free-ranging anthropoid primates. *Sleep Medicine Reviews*, 2000; 4:355–373.

Aserinsky E, Kleitman N. Regularly occurring periods of eye motility and concomitant phenomena during sleep. *Science*, 1953; 118:273-4.

Ayala-Guerrero F, Mexicano G, Ramos JI. Sleep characteristics in the turkey (*Meleagris gallopavo*). *Physiology and Behavior*, 2003; 78:435–440.

Baghdoyan HA, Spotts JL, Snyder SG. Simultaneous pontine and basal forebrain microinjections of carbachol suppress REM sleep. *Journal of Neuroscience*, 1993; 13:229–242.

Balzamo E. States of wakefulness and ponto-geniculo-cortical activities (PGC) in *Papio Anubis*. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1980; 48(6):694-705.

Başar E, Başar-Eroglu C, Karakaş S, Schürmann M. Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes. *International Journal of Psychophysiology*, 2001; 39:241–248.

Benca RM, Obermeyer WH, Shelton SE, Droster J, Kalin NH. Effects of amygdala lesions on sleep in rhesus monkeys. *Brain Res*, 2000; 879: 130-8.

Berger RJ, Walker JM. Apolygraphic study of sleep in the tree shrew (*Tupaia glis*). *Brain Behavior Evolution*, 1972; 5:54–69.

Bert J, Pegram V, Rhodes JM, Balzano E, Naquet R. A comparative sleep study of two Cercopithecinae. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1970; 28: 32–40.

Bert J, Pegram V. L'electroencephalogramme du sommeil chez les Cercopithecinae: *Erythrocebus patas* et *Cerpothiecus aethiops sabaeus*. *Folia Primatologica*, 1969; 11:151–159.

Breton P, Gourmelon P, Court L. New findings on sleep stage organization in squirrel monkeys. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1986; 64:563–567.

Buxton AP. Further observations of the night-resting habits of monkeys in a small area on the edge of the Semliki Forest, Uganda. *American Journal of Animal ecology*, 1951; 20: 31-2. 12.

Capellini I, Barton RA, McNamara P, Preston BT, Nunn CL. Phylogenetic analysis of the ecology and evolution of mammalian sleep. *Evolution*, 2008; 62:1764–1776.

Cartmill M, & Kay RF. Craniodental morphology, tarsier affinities, and primate suborders. In: D. J. Chivers & K. A. Joysey (Eds.), *Recent advances in primatology* (vol 3, pp. 205 214). London: Academic Press. 1978.

Cartmill M, & Smith FH. *The human lineage*. New York: Wiley Blackwell. 2009

Chapman, C.A., Wrangham, R.W., Chapman, L.J. Ecological Constraints on Group Size: An Analysis of Spider Monkey and Chimpanzee Subgroups. *Behavior Ecology and Sociobiology*, 1995; 35: 59 – 70.

Chase MH, Morales FR. Control of motoneurons during sleep. In: Dement WC, editor. *Principles and practice of sleep medicine*. 2nd edition New York: Saunders. p. 155–168. 2000.

Chase MH, Morales FR. The atonia and myoclonia of active (REM) sleep. *Annual Review of Psychology*, 1990; 41:557– 584.

Chico-Ponce de León F, Platas-Neri D, Muñoz-Delgado J, Santillán-Doherty AM, Arenas-Rosas R, et al., Anatomía Cerebral del mono araña *Ateles geoffroyi* estudiada utilizando imágenes de resonancia magnética. Primer reporte: estudio comparativo con el cerebro humano *Homo Sapiens*. *Revista Ciencias de la Salud*, 2009; 7(1):10-27.

Collins, A.C, Dubach, J.M. Nuclear DNA Variation in Spider Monkey (*Ateles*). *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2001, 19:67-75.

Coolidge, FL. Wynn, T. The effects of the tree-to-ground sleep transition in the evolution of cognition in early *Homo*. *Before Farming: The Anthropology and Archaeology of Hunters-Gatherers*, 2006; 2:1-16.

Cruz-Aguilar MA, I. Ramírez-Salado I, Arenas-Rosas RV, Santillán- Doherty AM, Muñoz-Delgado JI. Sleep characterization of a one-month-old freely moving stump-tail macaque (*Macaca arctoides*): a pilot study. *Journal of Medical Primatology*, 2009; 38(5), 371 – 376.

Curró Dossi R, D Pare y M Steriade. Short-lasting nicotinic and long-lasting muscarinic depolarizing responses of thalamocortical neurons to stimulation of mesopontine cholinergic nuclei. *Journal of Neurophysiology*, 1991; 65: 393-406.

Daley JT, Turner RS, Freeman A, Bilwise DL, Rye DB. Prolonged assessment of sleep and daytime sleepiness in unrestrained *Macaca mulatta*. *Sleep* 2006; 29:221–231.

Datta S, Calvo JM, Quatrochi JJ, Hobson JA. Cholinergic microstimulation of the peribrachial nucleus in the cat. Immediate and prolonged increases in ponto-geniculooccipital waves. *Archives Italiennes de Biologie*, 1992; 130:263–284.

Datta S, Calvo JM, Quatrochi JJ, Hobson JA. Long-term enhancement of REM sleep following cholinergic stimulation. *Neuroreport*, 1991; 2:619–622.

Datta S, Siwek DF. Excitation of the brainstem pedunculopontine tegmentum cholinergic cells induces wakefulness and REM sleep. *Journal of Neurophysiology*, 1997; 77:2975–2988.

Day PW, Derwelis SK, Fineg J, Van riper DC. An outdoor monkey nesting box. *Laboratory Animal Care*, 1968; 18:206–209.

Di Fiore, A., Link, A., Dew, J.L. 2008. Diets of Wild Spider Monkeys. En: Campbell, C.J. *Spider Monkeys Behavior, Ecology and Evolution of the Genus Ateles. Part II Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 81 – 137. 2008.

Eisenberg, J.F. *Ateles geoffroyi* (mono araña, mono colorado, spider monkey). In *Costa Rica Natural History*. Janzen, DH. University of Chicago Press, USA. pp. 451 – 453. 1983.

Faradaji H, R. Cespuglio, J L. Valatax y M. Jouvet. Effets du Jeune sur le phenomènes Phasiques du Sommeil Paradoxal de la Souris, *Physiology and Behaviour*, 1979; 23: 539-546.

Forbes. *Primates all the World's Animals*. BBC Books. UK. pp. 198. 1985.

Freemon FR, McNew JJ, Adey WR. Sleep of unrestrained chimpanzee: Differences between first and last rapid eye movement periods. *Folia Primatológica* 1970; (13): 144-9.

Froellich, J.W., Supriantna, J., Froehlich, P.H. Morphometric Analyses of Ateles: Systematic and Biogeographic Implications. *American Journal of Primatology*, 1991; 25:1-22.

Fruth B, Hohmann G. En McGrew WC, Marchant LF, Nishida T. (Ed.) Nest building behaviour in the great apes: The great leap forward?. *Great ape societies*. Cambridge: Cambridge University Press; 1996, p. 225-39.

Fultron JF, Dusser de Barenne JG. The representation of the tail in the motor cortex of primates, with special reference to spider monkeys. *Journal of cellular and comparative physiology*, 1933; 2(8): 399-426.

Gilbert SS, Van den Heuvel CJ, Ferguson SA, Dawson D. Thermoregulation as a sleep signaling system. *Sleep Medicine Reviews*, 2004; 8:81–93.

González-Zamora A, Arroyo-Rodríguez V, Oyama K., et al. Sleeping sites and latrines of spider monkeys in continuous and fragmented rainforests: implications for seed dispersal and forest regeneration. *PLoS ONE*, 2012; 7:e46852 1–11.

Groves CP, Sabater PJ. From ape's nest to human fix-point. *Man*, 1985; 20:22-47.

Hatschek R. Beitrag zur Frage der Menschenähnlichkeit des Ateles-Gehirns. *Anatom. Anz.*,
bd. 32, 1908; S.389-394.

Hernandez – Camacho, J., Cooper, R.W. The Non – Human Primates of Colombia. En:
Thorington, W., Heltne, P.G. Neotropical Primates: Field Studies and Conservation. National
Academy of Sciences, Washington, DC, USA. pp. 35 – 69. 1976.

Hernández-Peón R, Chávez-Ibarra G, Morgane PJ, Timo-Iaria C. Cholinergic pathways for
sleep, alertness and rage in the limbic midbrain circuit. *Acta Neurológica Latinoamericana*,
1962; 8:93–96.

Hsieh KC, Robinson EL, Fuller CA. Sleep architecture in unrestrained rhesus monkeys
(*Macaca mulatta*) synchronized to 24-hour light-dark cycles. *Sleep*, 2008; 31:1239–1250.

Ibarra-Manríquez GM, Martínez-Ramos RD, Núñez-Farfán J. La Vegetación. In: González-
Soriano RD, Vogt RC (Eds.) *Historia natural de Los Tuxtlas*. México DF, México:UNAM y
Conabio. pp. 124–129. 1997.

Iber C, Ancoli-Israel S, Chesson JR, Quan S. *The AASM Manual for the Scoring of Sleep
and Associated Events: Rules, Terminology, and Technical Specification*. 2007.

IUCN (2006). 2006. IUCN Red List of Threatened Species. Online, www.iucnredlist.org.

Jasper HH. The ten–twenty electrode system of the International Federation.
Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1958; 10:367–380.

Jones BE. Paradoxical sleep and its chemical/structural substrates in the brain.
Neuroscience, 1991; 40 (3):637-656.

Jouvet M. Recherches sur les structures nerveuses et les mécanismes responsables des différentes phases du sommeil physiologique. *Archives italiennes de Biologie*, 1962; 100:125–206.

Jouvet M. The regulation of paradoxical sleep by the hypothalamo-hypophysis. *Archives Italiennes de biologie*, 1988; 126:259-274.

Jungers WL, Stern JT Jr. Preliminary electromiographical analysis of brachiation in gibbon and spider monkey. *International Journal of Primatology*, 1981; 2:19–34.

Kay R, Ross C, & Williams B. Anthropoid origins. *Science*, 1997; 275, 797 804.

Kay R, Williams B, Ross C, Takai M, & Shigeharan. . Anthropoid origins: A phylogenetic analysis. In: C. Ross & R. F. Kay (Eds.), *Anthropoid origins: New visions* (pp. 91 135). New York: Kluwer/Academic. 2004.

Kellogg R, Goldman EA. Review of the spider monkeys. *Proceedings of the United States National Museum*, 1944; 96:1–45.

Kinzey, W. *New World Primates, Ecology, Evolution and Behavior*. Linx Editions. USA. pp. 465. 1997.

Klein, L.L., Klein, D.J. Feeding Behavior of Colombian Spider Monkeys, *Ateles belzebuth*. En: Clutton – Brock, T. *Primate Ecology: Studies of Feeding and Ranging Behaviour in Lemur, Monkeys and Apes*. Academic Press, London, UK. pp. 153 – 181. 1997.

Konstant, W., Mittermeier, R.A., Nash, S.D. Spider Monkeys in Captivity and in the Wild. *Primate Conservation*, 1985; 5:82 –109.

Kripke DF, Reite ML, Pegram GF, Stephens LM, Lewis OF. Nocturnal sleep in rhesus monkeys. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1968; 24:582–586.

Liu ZH, Zhao QK. Sleeping sites of *Rhinopithecus bieti* at Mt. Fuhe, Yunnan. *Primates*, 2004; 45:241 –248.

Llinas RR y D Pare. Of dreaming and wakefulness. *Neuroscience*, 1991; 44:521-535.

Magni J, Moruzzi G, Pompeiano O. Synchronization of the EEG produced by low-frequency electrical stimulation of the region of the solitary tract. *Archives Italiennes de biologie*, 1961; 99: 33-39.

Marmelada CA 2007. Orígenes remotos del género humano (1): Hominoideos del Mioceno Inferior. Consulta online en: http://servicios.educarm.es/templates/portal/images/ficheros/etapasEducativas/secundaria/10/secciones/425/contenidos/6360/orgenes_remotos_del_gnero_humana1.PDF.

McCarley JP. Nelson y JA Hobson. Ponto-geniculo-occipital (PGO) waves, *Science*, 1978; 211: 269-272.

McCarley RW, y JA Hobson. Neuronal Excitability Modulation over sleep cycle: A Structural and mathematical model. *Science*, 1975; 189:58-60.

McCarley RW. Brainstem cholinergic systems and models of REM sleep Production. Montplaisir, J. y R. Godbout (eds), *Sleep and biological rythms: basic mechanisms and applications to psychiatry*. Oxford University Press: New York. 1990.

McGinty DJ, Szymusiak R. The sleep –wake switch: A neural alarm clock. *Nature Medicine*, 2000; 6:510-511.

Mizuno Y, Takeshita H, Matsuzawa T. Behavior of infant chimpanzees during the night in the first 4 months of life: Smiling and suckling in relation to behavioral state. *Infancy*, 2006; 9(2): 215-34.

Morales FR y MH Chase. Intracellular recording of lumbar motoneuron membrane potential during sleep and wakefulness. *Experimental Neurology*, 1978; 62: 821-827.

Morrison AR. Paradoxical sleep and alert wakefulness. Variations on a theme. M. H Chase y ED Weitzeman (eds). *Sleep disorders, basic and Clinical research*, Spectrum: New York. 1983.

Mouret JR, Jeannerod M, Jouvet M. L'activité électrique du système visual au cours de la phase paradoxale du sommeil chez le chat. *J Phisiol (Paris)*, 1963; 55: 305-6.

Muñoz-Delgado J, Corsi-Cabrera M, Canales-Espinosa D, Santillán- Doherty AM, Erkert HG. Astronomical and meteorological parameters and rest-activity rhythm in the Spider monkey (*Ateles geoffroyi*). *Physiology and Behavior*, 2004; 83:107–117.

Muñoz-Delgado J, Luna-Villegas G, Mondragón-Ceballos R, Fernández-Guardiola A. Behavioral characterization of sleep in stump-tail macaques (*Macaca arctoides*) in exterior captivity by means of high-sensitivity video recording. *American Journal of Primatology*, 1995; 36: 245-9.

Nauta W. Hypothalamic regulation of sleep in rats. An experimental study". *Journal of Neurophysiology*, 1946; 9: 285-316.

Nieves, M, Ascunce, MS, Rhan, MI, Mudry, MD. Phylogenetic Relationship Among Some *Ateles* Species: The Use of Chromosomic and Molecular Characters. *Primates*, 2005; 46:155-164.

Nowak RM. Walker's primates of the world. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Maryland. USA. 1999.

Pennington T, Sarukhán J. Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies (tercera edición). México DF: Universidad Nacional Autónoma de México y Fondo de Cultura Económica. p. 111–492. 2005.

Purvis A. A composite estimate of primate phylogeny. Philosophical transactions B, 1995; 348(1326): 405-421.

Rechtschaffen A, Kales A. A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages in human subjects. Washington: Public Health Service, U.S. Government. Printing Office. 1968.

Reite M, Stynes AJ, Vaughn L, Pauley JD, Short RA. Sleep in infant monkeys: normal values and behavioral correlates. Physiology and Behavior, 1976; 16: 245-51. Reite ML

Rhodes JM, Kavan E, Adey WR. Normal sleep patterns in Macaque monkey. Archives of Neurology, 1965; 12:133–144.

Roosmalen, MGM van. Habitat Preferences, Diet, Feeding Strategy and Social Organization of the Black Spider Monkeys (*Ateles paniscus paniscus*, Linnaeus 1758) in Surinam. Acta Amazonica, 1985; 15:1–231.

Rosenberger AL, Halenar L, Cooke SB, Hartwing WC, Morphology and Evolution of the Spider Monkey, Genus *Ateles*. En: Campbell CJ. Spider Monkeys Behavior Ecology and Evolution of the Genus *Ateles*. Part I Taxonomy, Phylogeny and Evolution. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 19 – 49. 2008.

Roth TC, Lesku JA, Amlaner CJ, Lima SL. A phylogenetic analysis of the correlates of sleep in birds. *Journal of Sleep Research*, 2006; 15:395–402.

Rowe N. *The Pictorial Guide to the Living Primates*. Pogonias Press, East Hampton, New York, USA. 1996.

Sakai K, J Sastre, D Salvert, M Touret, M Thoyama y M Jouvet. Tegmentoreticular projections with special reference to the muscular atonia during paradoxical sleep in the cat. *Brain Research*, 1979; 176:233-254.

Sakai K. Some anatomical and physiological properties of pontomesencephalic tegmental neurons with special reference to PGO waves and Postural atonia during paradoxical sleep in the cat. En Hobson, JA y MAB Brazier (eds). *The reticular formation revisited*, Raven Press. 1980.

Saper CB, Chou TC, Scammell TE. The sleep switch: hypothalamic control of sleep and wakefulness. *Trends in Neuroscience*, 2001; 24:726-731.

Saper C, Fuller P, Pedersen N, Lu J, Scammell T. Sleep state switching. *Neuron* 2010; 68: 1023-1042.

Schober T; Wenzel K; Feichtinger M et al. Restless legs syndrome: changes of induced electroencephalographic beta oscillations—an ERD/ERS study. *Sleep*, 2004; 27(1):147-50.

Schultz AH. Studies on the variability of platyrrhine monkeys. *Journal of Mammals*. 1926; 7: 286-305.

SEMARNAT. 2010. NOM – 059 - 2010 Protección Ambiental – Especies Nativas de México de Flora y Fauna Silvestres – Categorías de Riesgos y Especificaciones para su Inclusión,

Exclusión o Cambio – Lista de Especies en Riesgo. Diario Oficial de la Federación, Segunda Sección, 6 de marzo de 2002.

Serio-Silva. Los Monos Saraguatos de Tabasco un Recurso Vulnerable. Cuadernos de Biodiversidad. México. pp. 21. 2006.

Shimooka, Y, Campbell, CJ, Di Fiore, A, Felton, AM, Izawa, K, Link, A, Nishimura, A, Ramos – Fernandez, G, Wallace, RB. Demography and Group Composition of ateles. En: Campbell, CJ. Spider Monkeys Behavior, Ecology and Evolution of the Genus ateles. Part III Behavior and Reproduction. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 329 – 350. 2008.

Shimooka, Y. Seasonal Variation in Association Patterns of Wild Spider Monkeys (*ateles belzebuth belzebuth*) at La Macarena, Colombia. *Primates*, 2003; 44:83– 90.

Shiromani PJ, TS Kilduff, FE, Bloom y RW McKarley. Cholinergically induced REM sleep triggers Fos-like immunoreactivity in dorsolateral pontine regions associated with REM sleep. *Brain Research*, 1992; 580:351-357.

Siegel JM, Rogawski MA. A function for REM sleep: regulation of noradrenergic receptor sensitivity. *Brain Research*, 1988; 472:213–233.

Siegel JM. The neurotransmitters of sleep. *Journal Of Clinical Psychiatry*, 2004; 65 (16): 4-7.

Siegel JM. Clues to the functions of mammalian sleep. *Nature*, 2005; 437: 1264 -1271.

Sri Kantha S, Suzuki J. Sleep quantitation in common marmoset, cotton top tamarin and squirrel monkey by non-invasive actigraphy. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2006; 144:203–210.

Steriade M, Domich L, Oakson G. The deafferent reticular thalamic nucleus generates spindle rhythmicity. *Journal of Neuro-Physiology*, 1987; 57: 260-173.

Steriade M, Hobson JA. Neuronal activity during sleep-waking cycle. *Progress in Neurobiology*, 1976; 6:155-376.

Steriade M. y RW McCarley. *Brainstem control of wakefulness and sleep*, Plenum Press, New York. 1990.

Takahashi H. Huddling relationships in night sleeping groups among wild Japanese Macaques in Kinkazan island during winter. *Primates*; 1997; 38:57-68

Tollman SG. Thermoregulation of the social structure of *Cercopithecus aethiops*: the vervet monkey. *International Journal of Primatology*, 1982, 3:341.

Vick, LG. Immaturity in Spider Monkeys: A Risky Business. En Campbell CJ. *Spider Monkeys Behavior, Ecology and Evolution of the Genus Ateles*. Part III Behavior and Reproduction. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 288 – 328. 2008.

Wang Hwei-Wen and CUA Kappers. Some features of the parietal and temporal lobes of the human brain and their morphological significance. *The china medical Journal*, 1924, 38; 730-737.

Washburn SL. Ischial callosities as sleeping adaptations. *American Journal of Physical Anthropology*, 1957; 15:269–276.

Weitzman ED. Kripke DF. Pollack C. Dominguez J. Cyclic activity in sleep of *Macaca mulatta*. *Arch Neurol* 1965;12: 463-7

Wexler DB, Moore-Ede MC. Circadian sleep–wake cycle organization in squirrel monkeys. *American Journal of Physiology*, 1985; 248:353–362.

Wexler DB, Moore-Ede MC. Resynchronization of circadian sleep–wake and temperature cycles in the squirrel monkey following phase shifts of the environmental light–dark cycle. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 1986; 57:1144–1149.

Wexler DB, Moore-Ede MC. Effects of a muramyl dipeptide on the temperature and sleep–wake cycles of the squirrel monkey. *American Journal of Physiology*, 1984; 247:672–680.

Yao D, Lavigne GJ, Lee JC, Adachi K, Sessle BJ. Jaw-opening reflex and corticobulbar motor excitability changes during quiet sleep in non-human primates. *Sleep* 2013; 36(2):269-280.

Youlatos D. Positional behavior of black spider monkeys (*Ateles paniscus*) in French Guiana. *International Journal of Primatology*, 2002; 23:1071–1093.

RESEARCH ARTICLE

Sleep in the Spider Monkey (*Ateles geoffroyi*): A Semi-Restrictive, Non-Invasive, Polysomnographic Study

MANUEL ALEJANDRO CRUZ-AGUILAR^{1,2*}, FRUCTUOSO AYALA-GUERRERO³, ANABEL JIMÉNEZ-ANGUIANO⁴, ANA MARÍA SANTILLÁN-DOHERTY⁵, FRANCISCO GARCÍA-ORDUÑA⁶, AND JAVIER VELÁZQUEZ-MOCTEZUMA⁴
¹Doctorado en Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Distrito Federal, México
²Laboratorio de Sueño, Dirección de Investigaciones en Neurociencias, Instituto Nacional de Psiquiatría "Ramón de la Fuente Muñiz", Distrito Federal, México
³Laboratorio de Neurociencias, Facultad de Psicología, Universidad Nacional Autónoma de México, Distrito Federal, México
⁴Área de Neurociencias, Departamento Biología de la Reproducción, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Distrito Federal, México
⁵Dirección de Investigaciones en Neurociencias, Instituto Nacional de Psiquiatría "Ramón de la Fuente Muñiz", Distrito Federal, México
⁶Instituto de Neuroetología, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México

The normal sleep patterns of the spider monkey (*Ateles geoffroyi*) have not been described yet. The objective of this study was to characterize the electrophysiological patterns, sleeping postures, and sleep-wake cycle in semi-restricted spider monkeys. Continuous 24-hr polysomnographic (PSG) recordings, involving simultaneous recording of non-invasive electroencephalographic (EEG), electro-oculographic (EOG), and electromyographic (EMG) activities, were carried out in captive monkeys living in outdoor rainforest enclosures. Electrode placement was done according to the human international 10–20 system. Specific behaviors displayed by monkeys during the sleep-wake cycles were correlated with the PSG recordings. The nycthemeral distribution of the sleep-wake cycle was also calculated. The results show that electrophysiological N-REM sleep patterns in spider monkeys are similar to those observed in other primates, including human beings. Furthermore, a vertical semi-fetal posture was observed during N-REM and REM sleep phases. The amount of nocturnal sleep was significantly higher than that of the diurnal period, showing that the spider monkey is a diurnal primate. An outstanding finding was the absence of muscular atonia during the spider monkey's REM sleep, which suggests that arboreal primates have developed a neuromuscular mechanism specialized for sleeping in a vertical posture. *Am. J. Primatol.* 77:200–210, 2015. © 2014 Wiley Periodicals, Inc.

Key words: new world monkey; PSG; muscular atonia; REM

INTRODUCTION

Sleep seems to be one of the most complex integrated behaviors for which the adaptive advantage remains unknown [Maquet et al., 1997; Mignot, 2008]. Animal and human studies suggest that its functions include, among others, recovery at the cellular, network and endocrine system levels [Mignot, 2008], thermoregulation [Gilbert et al., 2004], adaptation to an ecological niche [Webb, 1974], restoration of tissular integrity [Adams, 1980], and neuronal plasticity [Krueger et al., 1995]. Nevertheless, sleep in non-human primates is rarely subject to systematic investigation [Anderson, 1998; Fruth & McGrew, 1998].

Most of the previous studies on electrophysiological and behavioral characteristics of the sleep-wake cycle have been performed in Old World monkeys [Daley et al., 2006; Hsieh et al., 2008]. Nevertheless, from the point of view of adaptive behavior and

biological complexity of primates, the sleep analysis of New World monkeys can provide significant insights into sleep evolution in primates. Non-human primates with an arboreal style life and prehensile tails, for example, can help us understand the anthropoid transition from arboreal to ground sleep through the study of their body postures.

*Correspondence to: Manuel Alejandro Cruz Aguilar, Doctorado en Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Distrito Federal, México 09340, E-mail: macrag@gmail.com

Received 3 April 2014; revised 5 July 2014; revision accepted 11 July 2014

DOI: 10.1002/ajp.22322
 Published online 17 September 2014 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).