



# Los ritmos biológicos y el aprendizaje

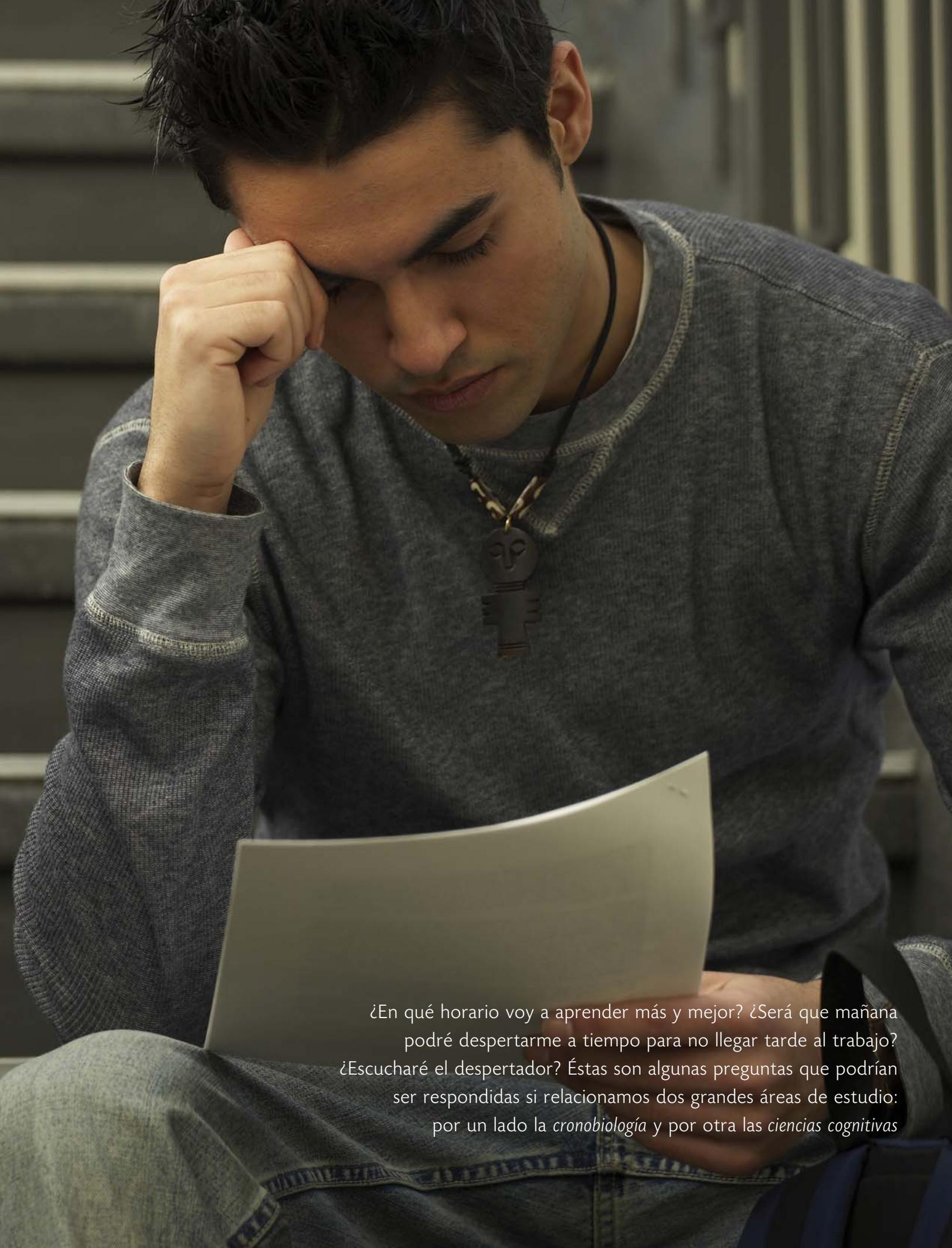
Verónica S. Valentinuzzi y John Fontenele Araujo

Podemos decir que las neuronas de nuestro reloj biológico son semejantes a las neuronas de las estructuras responsables de la memoria. Dicho de otra forma, nuestro núcleo supraquiasmático o reloj maestro tiene las características necesarias de una estructura que aprende.

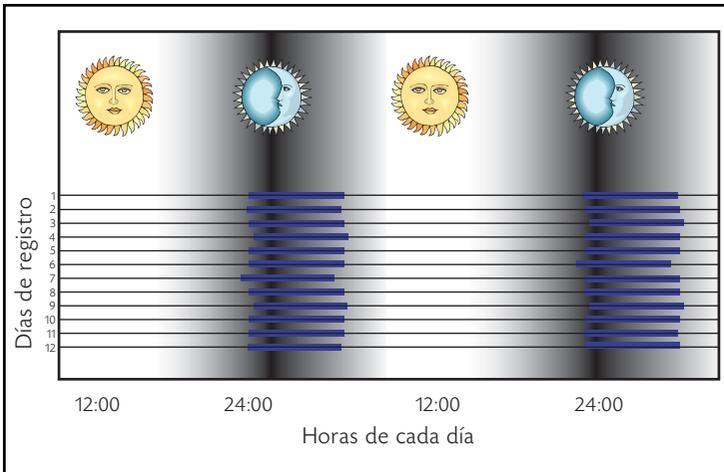
• Cuál es el mejor horario para preparar el examen de la próxima semana? ¿Debo levantarme temprano para estudiar, o es mejor hacerlo durante la tarde? ¿O debo permanecer despierto durante la noche? ¿En qué horario voy a aprender más y mejor? ¿Será que mañana podré despertarme a tiempo para no llegar tarde al trabajo? ¿Escucharé el despertador? Éstas son algunas preguntas que podrían ser respondidas si relacionamos dos grandes áreas de estudio: por un lado la *cronobiología* y por otra las *ciencias cognitivas*.

La cronobiología estudia la organización temporal de los organismos vivos, la cual es revelada a través de los diversos ritmos biológicos que se manifiestan en prácticamente todas nuestras variables fisiológicas y de conducta. Por ejemplo, el ritmo conductual más obvio es el ritmo sueño-vigilia (Figura 1). La mayoría de nosotros dormimos durante la noche y permanecemos despiertos y activos durante el día: somos organismos diurnos.

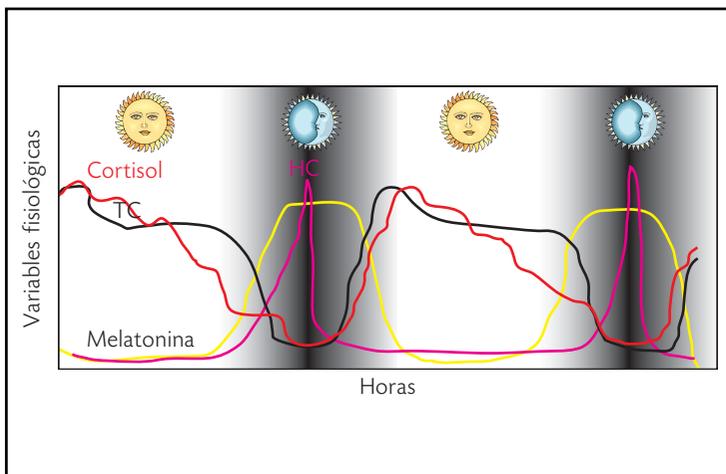
Aunados a este ritmo conductual se presentan diversos ritmos fisiológicos (Figura 2). Por ejemplo, el nivel sanguíneo de *cortisol* (una hormona relacionada con la actividad) es alto durante las primeras horas de la mañana, y disminuye gradualmente hasta llegar a un punto mínimo durante la noche. El nivel de *melatonina* (hormona relacionada con el sueño) tiene un patrón opuesto: bajo durante el día, alto durante la fase de sueño. La temperatura corporal presenta un ritmo similar al del cortisol. La hormona de crecimiento permanece en niveles mínimos



¿En qué horario voy a aprender más y mejor? ¿Será que mañana podré despertarme a tiempo para no llegar tarde al trabajo? ¿Escucharé el despertador? Éstas son algunas preguntas que podrían ser respondidas si relacionamos dos grandes áreas de estudio: por un lado la *cronobiología* y por otra las *ciencias cognitivas*



**Figura 1.** Ritmo de sueño-vigilia en un ser humano normal. Si anotamos diariamente las horas en que dormimos (barras azules) por varios días, es posible visualizar claramente este robusto ritmo biológico. Las horas se presentan horizontalmente. Verticalmente están representados 12 días de registro. En el ejemplo, este individuo se va a la cama regularmente a media noche y se despierta alrededor de las seis de la mañana.



**Figura 2.** Muchos son los ritmos de la vida; por ejemplo, aquí mostramos la variación circadiana de la temperatura corporal y niveles sanguíneos de tres hormonas (cortisol, melatonina y hormona de crecimiento) a lo largo de dos días consecutivos.

durante la mayor parte del día, pero tiene un repunte en las primeras fases de sueño. Prácticamente todas las variables fisiológicas manifiestan un ritmo biológico, que en los ejemplos dados tiene una duración de 24 horas; por ello se dice que son ritmos *circadianos* (del latín *circa*: alrededor, y *diano*: día). Esta ritmicidad es controlada y generada por “relojes biológicos”: los *núcleos supraquiasmáticos*, localizados en una estructura cerebral llamada hipotálamo.

Las ciencias cognitivas, por su parte, estudian nuestras capacidades cognitivas; por ejemplo, la capacidad de aprender y de recordar aquello que aprendimos. Podemos definir *aprendizaje* como un cambio en el comportamiento de un organismo como resultado de una experiencia previa.

Una forma de aprendizaje básica muy estudiada es el condicionamiento clásico o pavloviano (llamado así por el investigador ruso Ivan Pavlov, quien lo estudió por primera vez). Pavlov analizó cómo una experiencia podía cambiar la respuesta de salivación de los perros de la siguiente forma: se sabe que la presencia de comida (estímulo no condicionado) produce naturalmente la respuesta de salivación (respuesta no condicionada). Es *no condicionada* porque no es necesaria una experiencia previa para que la respuesta se presente. Es posible presentar un *estímulo neutro*, o sea, que normalmente no produce salivación en los perros, inmediatamente antes de la comida (el estímulo no condicionado); por ejemplo, el sonido de una campana. Este sonido sería el *estímulo condicionante*, porque puede *condicionar* la respuesta del animal.

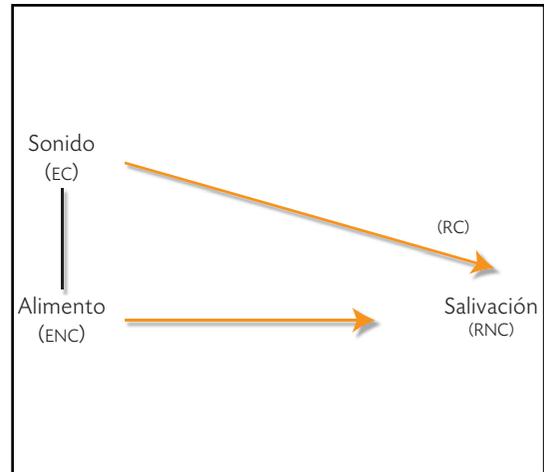
El procedimiento consiste en presentar el sonido de la campana (estímulo condicionante) asociado a la presentación de la comida (estímulo no condicionante). Después de varios apareamientos de este estilo, el animal establece una *asociación* entre el sonido y la comida, de forma que cuando se presenta sólo el sonido, éste produce la respuesta de salivación. En otras palabras, el animal *aprende* que el sonido señala la llegada de la comida y, por tanto, responde salivando ante ese sonido. Hubo un cambio de su respuesta como resultado de una experiencia.

Este tipo básico de aprendizaje ocurre constantemente, y modula o cambia radicalmente nuestros comportamientos y reacciones fisiológicas. En gene-

ral ocurre de forma totalmente inconsciente (o sea, no nos damos cuenta de que está ocurriendo). También existen otras formas de aprendizaje, mucho más complejas, que implican la activación de diversas estructuras cerebrales, ampliamente estudiadas en las ciencias cognitivas. Por ejemplo, el hipocampo es la estructura cerebral responsable de nuestra capacidad de recordar qué hicimos ayer, qué comimos anoche en la cena, a dónde fuimos durante nuestras últimas vacaciones, cómo estuve, o el casamiento de nuestra hermana; es decir, todos los eventos de nuestra vida.

Si consideramos que casi todas las variables fisiológicas y conductuales presentan una ritmicidad circadiana, parece lógico preguntarnos si también existen ritmos en procesos de aprendizaje y memoria. Existe toda un área de investigación que intenta responder esta pregunta, a través del estudio del desempeño tanto en humanos como en modelos animales, en tareas de aprendizaje a lo largo del día.

Creemos que, por ahora, la respuesta no ha podido contestarse, debido a que el desempeño en pruebas de aprendizaje depende de muchos factores, entre ellos, la especie animal estudiada, las exigencias cognitivas de la tarea, los estímulos utilizados, el tipo de respuesta exigida, las condiciones experimentales y las características individuales. En el ser humano se ha constatado que el desempeño en aprendizaje depende del ciclo sueño-vigilia (incluyendo la calidad y duración del sueño), de patrones de actividad física o intelectual, de hábitos y costumbres (como el patrón de alimentación), de patrones sociales, condiciones ambientales en las que se realizan las pruebas e, inclusive, de la época del año o del día de la semana. También se debe considerar el grado de matutinidad o vespertinidad de las personas. Éstas son características determinadas genéticamente y determinan cuál es el horario natural para despertar. Las personas matutinas son las que tienen una tendencia a irse a dormir temprano (por ejemplo, entre 21:00 y 22:00) y a despertarse temprano (entre 5:00 y 6:00). Otras personas son de tipo vespertino, es decir, tienen una fuerte tendencia a permanecer despiertos hasta tarde (por ejemplo, 2:00 o 3:00 de la mañana) y consecuentemente duermen hasta más tarde la mañana siguiente (10:00 a 11:00). Sin embargo, la mayor parte de la población es de tipo intermedio: se ajusta bien a cualquier horario. De esto podemos deducir que, en general, una persona matutina va a estu-



**Figura 3.** Esquema del apareamiento entre dos estímulos (sonido y alimento) que eventualmente determina que el animal responda al sonido como si respondiese al alimento.



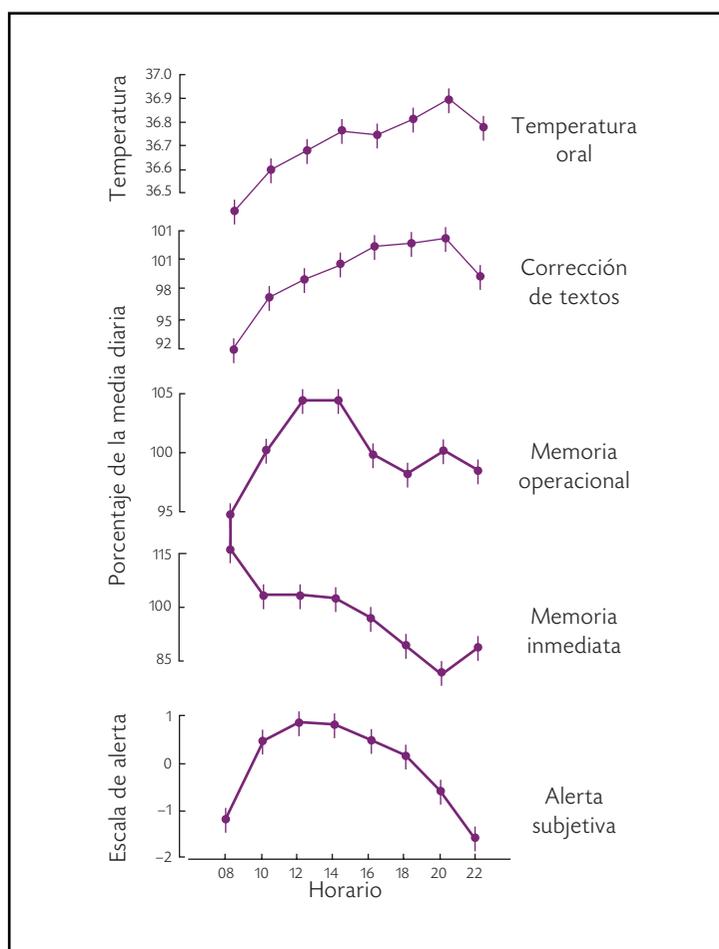
diar más eficientemente de mañana y una persona vespertina tendrá un mejor rendimiento durante el final del día. Aunque, como mencionamos, hay que tener en cuenta que ésta no es la única fuente de variación temporal en nuestra capacidad de aprender.

Un estudio clásico analizó el desempeño en tres tipos de tareas a lo largo del día, y lo correlacionó con el ritmo de la temperatura corporal y el estado de alerta subjetiva (Folkard, 1990). Se observaron marcados ritmos diurnos en la capacidad de corregir eficientemente un texto, en el desempeño de una tarea de memoria operacional (razonamiento verbal y cuentas aritméticas mentales) y una tarea que incluye memoria a corto plazo (lectura de un párrafo y respuesta inmediata a un cuestionario relacionado). Estos tres tipos de desempeño manifestaban patrones temporales diferentes entre sí durante la jornada activa de 14 horas (Figura 4).

La capacidad de corregir eficientemente un texto sigue paralelamente el ritmo de temperatura corporal: manifiesta un mínimo al comienzo de la mañana y aumenta durante el día, hasta llegar a un máximo hacia el final de la tarde. Por su parte, la memoria a corto plazo muestra una variación totalmente opuesta al ritmo de temperatura: tiene un máximo de mañana y disminuye durante el día. Por otro lado, la velocidad en la memoria operacional aumenta durante la mañana y disminuye progresivamente durante la tarde. Es de sorprender que, ninguna de estas variables está correlacionada con el estado de alerta subjetivo, que manifiesta un patrón rítmico totalmente diferente a las tres variables anteriores y se caracteriza por tener la forma de una U invertida. Este estudio sugirió que cada tipo de tarea manifiesta su propio ritmo. Otros trabajos que analizan las mismas variables en los mismos horarios, pero utilizando el protocolo de rutina constante (descrito en el artículo “Los cambios de la atención a lo largo del día” de Pablo Valdez y colaboradores, en este número) han encontrado datos diferentes (ver Figura 5).

El patrón de 24 horas de las variables de alerta subjetiva y de número de cálculos por minuto acompaña paralelamente al ciclo de temperatura corporal. Por otro lado, en la memoria a corto plazo se observa un declive durante las primeras diez horas, momento en que la temperatura sube gradualmente. Sin embargo, en el siguiente ciclo el patrón temporal de memoria a corto plazo, al igual que el patrón de estado de alerta y cálculos, sigue el mismo patrón que el ciclo de temperatura corporal. En conclusión, todas las tareas parecen seguir el mismo ritmo que la temperatura corporal.

Existe un fenómeno donde la hora del día puede afectar el desempeño cognitivo: la *estampa temporal* (Holloway y Wansley, 1973). Este fenómeno se observó inicialmente en ratas de laboratorio sometidas a una forma de aprendizaje denominada *evitación pasiva*. Esta prueba consiste en colocar las ratas en una caja experimental dividida en dos compartimentos. Uno es abierto



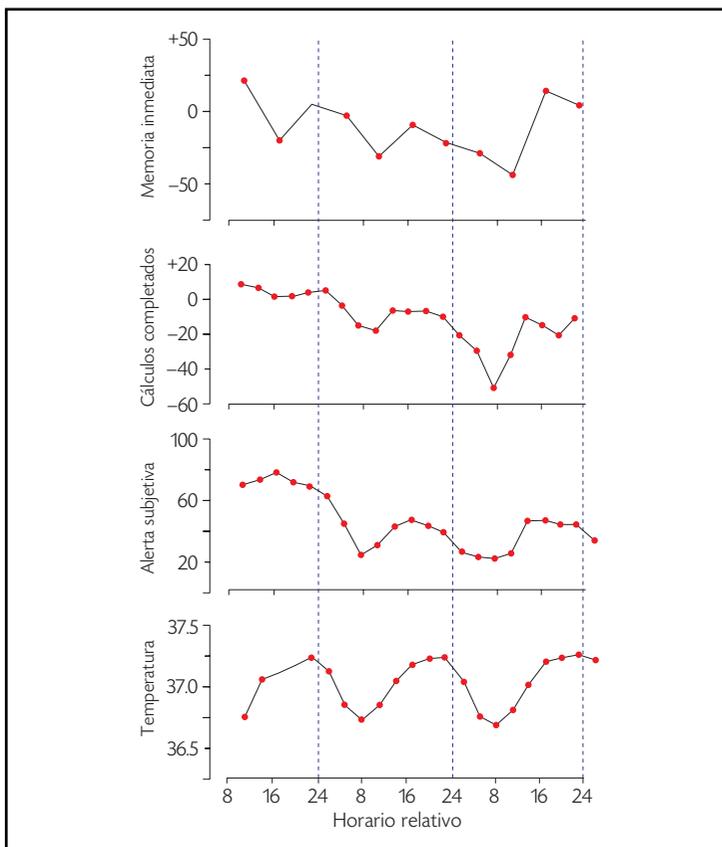
**Figura 4.** Temperatura en grados centígrados, tres tipos de desempeños cognitivos, y estado de alerta auto-evaluado, en función de las horas del día activo (Folkard, 1990).

e iluminado, y el otro es cerrado y oscuro. Las ratas, por ser animales nocturnos que normalmente viven en túneles y cuevas, tienen una tendencia innata a preferir la parte oscura y protegida de la caja. Al entrar la rata a la parte oscura de la caja recibe un choque eléctrico que provoca que huya inmediatamente a la zona iluminada. Al día siguiente, cuando se coloca nuevamente a la rata en la caja, ésta tendrá una tendencia a permanecer en la parte abierta. Lo anterior ocurre porque el animal aprende a relacionar la parte oscura con la experiencia desagradable que tuvo el día anterior.

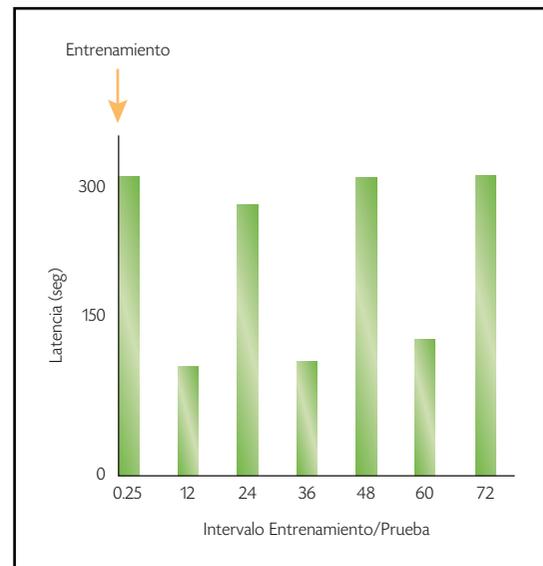
La forma de cuantificar qué tanto recuerda la rata la experiencia previa es medir la demora (latencia) para entrar a la parte oscura de la caja. ¿Cómo afecta la hora del día el desempeño en este tipo de tarea? La respuesta está en la Figura 6. Se observó que cada 24 horas el desempeño es muy bueno; las ratas no entran en la parte oscura de la caja y, por tanto, la

latencia es elevada. Pero cuando hacen la prueba a otras horas, el desempeño es malo: las ratas continúan ingresando a la zona oscura de la caja, como si no recordasen la pésima experiencia del choque. En otras palabras, sólo cuando coinciden los horarios de aprendizaje y de evocación o recuerdo en la prueba se observa un desempeño adecuado.

Este fenómeno, observado en modelos animales, parece estar presente también en el ser humano. Es conocido que se recuerda mejor una información aprendida cuando el estado mental y el contexto son semejantes. Para esto volvamos a entender mejor la Figura 2. Imaginemos que aprendimos algo durante la mañana, momento en que estamos en un estado fisiológico en que hay un nivel alto de cortisol y de temperatura, y un nivel bajo de melatonina y hormona de crecimiento. Pensemos, también, que por un motivo específico necesitamos recordar la información durante la noche, en un momento en que nuestro estado fisiológico es totalmente opuesto (niveles bajos de cortisol y temperatura, niveles altos de melatonina y



**Figura 5.** Memoria a corto plazo, cálculos completos, alerta subjetiva y temperatura corporal en centígrados. Valores medios de cinco individuos durante una rutina constante. Los datos de cada horario de colecta fueron normalizados de acuerdo a la hora habitual en que cada individuo se despertaba (al cual se le asignaba el horario de referencia 8:00 a.m.). (Según Johnson y colaboradores, 1992).



**Figura 6.** Tiempo de latencia en ratas para entrar en la parte oscura de la caja experimental durante pruebas de esquiva pasiva, en función del intervalo entrenamiento-prueba. El entrenamiento ocurrió en el tiempo cero.

## EL RELOJ BIOLÓGICO FUNCIONA COMO LAS ESTRUCTURAS CEREBRALES RELACIONADAS CON LA MEMORIA

En las estructuras cerebrales relacionadas con la memoria, como el hipocampo, ocurren una serie de fenómenos especiales. Las neuronas de estas estructuras presentan un fenómeno llamado de potenciación a largo plazo: cuando una neurona es estimulada continuamente con elevada frecuencia por un corto intervalo de tiempo, se presenta una respuesta de mayor excitabilidad, la cual es de larga duración.

Si observamos dichas neuronas horas o días después, notaremos que continúan presentando este grado de excitabilidad o potenciación. Muchos investigadores consideran este fenómeno como la base celular de la memoria. Lo interesante es que el proceso mencionado, que se relaciona con el aprendizaje, ocurre también en las neuronas del *núcleo supraquiasmático*, nuestro reloj biológico principal. Otra característica en común entre este último y el hipotálamo es la presencia de proteínas relacionadas con la agregación celular (por ejemplo, la molécula de adhesión neuronal o NCAM), que en el cerebro adulto siempre se ha relacionado con el aprendizaje. También está presente durante la fase de desarrollo, momento en que la plasticidad del sistema nervioso es altísima. Resulta sorprendente que en el núcleo supraquiasmático también existen estas sustancias, y hasta ahora se sabe que desempeñan un papel importante en el funcionamiento del reloj biológico, pues cuando se inhibe experimentalmente esta molécula, las respuestas rítmicas se alteran.

Podemos entonces decir que las neuronas del reloj biológico son semejantes a las neuronas de las estructuras responsables de la memoria. En otras palabras, el reloj biológico parece tener las características celulares necesarias de una estructura que aprende.

hormona de crecimiento). Parece obvio que es más fácil recordar cuando la condición de nuestro cuerpo se parece a la condición en que aprendimos. De alguna forma el contexto de nuestro estado fisiológico puede ofrecer claves para una mejor evocación. Podríamos sugerir que una buena estrategia de estudio sería mantener una rutina diaria de ejercicios (por ejemplo, estudiar matemáticas por la mañana y lengua española por la tarde), y que esta estrategia pudiera facilitar el desempeño en cada materia, por lo menos hasta que la información se consolide totalmente.

Hasta ahora vimos que nuestros ritmos biológicos pueden afectar nuestra capacidad cognitiva. Sin embargo, la relación entre ritmos biológicos y procesos de aprendizaje no termina ahí. Podemos también modificar nuestros ritmos por procesos de aprendizaje. Existe una extensa bibliografía que lo demuestra a través

de modelos animales. En el ser humano, a pesar de que no existen muchos datos concretos, hay fuertes evidencias de que podemos modular nuestros ritmos endógenos por medio de procesos de aprendizaje de tipo pavloviano (el condicionamiento clásico explicado en el inicio de este texto).

Las rutinas diarias contribuyen al establecimiento de nuestras rutinas circadianas. Muchas obligaciones sociales comunes como la escuela, el trabajo y los compromisos sociales en general, que imponen un horario diario, influyen sobre nuestro sistema circadiano al enviar señales temporales posiblemente a través de procesos de condicionamiento del mismo. Por ejemplo, se sabe que muchas personas pueden programarse para despertar a cierta hora, de forma que con el tiempo logran despertarse espontáneamente, inclusive unos minutos antes de que el despertador suene. De igual manera sabemos que nuestro sistema digestivo puede programarse para ir al baño a horas determinadas, o para que sintamos hambre con anticipación a la hora en que regularmente comemos.

En conclusión, los ritmos biológicos y los procesos de aprendizaje están íntimamente relacionados y, sin duda, en la medi-

da en que se conozca mejor su relación, podremos aprovechar este conocimiento para aumentar nuestra eficiencia para aprender, así como para refinar nuestras rutinas diarias según las necesidades exigidas por nuestro medio ambiente.

### Bibliografía

- Amir, S. y J. Stewart (1996), "Resetting of the circadian clock by a conditioned stimulus", en *Nature*, 379, pp. 542-545.
- Born, J., K. Hansen, L. Marshal, M. Molle y H. L. Fehn (1999), "Timing of the end of nocturnal sleep", en *Nature* 397, pp. 29-30.
- Folkard, S. (1990), "Circadian performance rhythms: some practical and theoretical implications", en *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B.*, 327, pp. 543-553.
- Golombek, D. A., H. E. Chuluyun, B. I. Kanterewicz y D. P. Cardinali (1994), "Increased pineal content coupled to restricted water availability in Pavlovian conditioning paradigm in rats", en *Journal of Neural Transmition*, 98, pp. 237-246.
- Holloway, F. A. y R. Wansley (1973), "Múltiple retention deficits at periodic intervals after active and passive avoidance", en *Behavioral Biology*, 9, pp. 1-14.
- Johnson, M. P., J. F. Duffy, D. J. Dijk, J. M. Ronda, C. M. Dyal y C. A. Czeisler (1992), "Short-term memory, alertness and performance: a reappraisal of their relationship to body temperature", en *Journal of Sleep Research*, 1, pp. 24-29.
- Karni, A., D. Tanne, B. S. Rubenstein, J. J. M. Askenasy y D. Sagi (1994), "Dependence on REM sleep of overnight improvement of a perceptual skill", en *Science*, 265, pp. 679-682.
- Koulack, D. (1997), "Recognition memory, circadian rhythms, and sleep", en *Perceptual and Motor Skills*, 85(1), pp. 99-104.

**Verónica S. Valentinuzzi** realizó un posgrado sobre análisis de la expresión rítmica de procesos cognitivos en la Universidad de Campinas, Brasil. Fue investigadora visitante en la Northwestern University, en Illinois, y cursó un posdoctorado en la Universidad de São Paulo y en el Departamento de Fisiología de la Universidad Federal de Rio Grande do Norte (UFRN). Actualmente es investigadora del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet), en el Centro de Investigación Científica y de Transferencia Tecnológica La Rioja, en Argentina, donde realiza estudios sobre la relación entre procesos de aprendizaje y ritmos biológicos.  
varoval@cb.ufrn.br

**John F. Araujo** es investigador en el área de neurociencias. Realizó estudios acerca de la relación entre la ritmicidad circadiana y el metabolismo en la Universidad de São Paulo, Brasil. Hizo un posdoctorado en la Universidad de Barcelona, España, donde investigó la disociación rítmica. Actualmente es investigador del Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) de Brasil, donde investiga sobre sueño, memoria y ritmos circadianos en el Departamento de Fisiología de la Universidad Federal de Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Brasil.  
araujo@cb.ufrn.br

