



HIDRATAÇÃO E PERFORMANCE AERÓBICA: O IMPACTO DO MEIO-AMBIENTE

Publicado: Janeiro de 2016/Autores: **Michael N. Sawka, Samuel N. Cheuvront, and Robert W. Kenefick**/Tópicos: Hidratação e Termorregulação, Treino e Performance

- Atletas que se exercitam em condições climáticas quentes têm altas taxas de suor em função da intensidade metabólica e carga de calor ambiental.
- Quando as taxas de suor estão altas, o consumo ad libitum (à vontade) de líquidos frequentemente não é suficiente para repor totalmente as perdas de suor (desidratação voluntária), e resulta em déficit cumulativo de líquido corporal.
- Um déficit de líquido corporal > 2% da massa corporal (~3% da quantidade total de água corporal, para um atleta na média) é definido como hipohidratação.
- A hipohidratação não altera a performance aeróbica no exercício em ambientes frios e frescos, e às vezes prejudica a performance aeróbica no exercício em condições climáticas amenas.
- A hipohidratação geralmente prejudica a performance aeróbica no exercício em condições ambientais quentes.
- Quando a temperatura da pele excede 27°C (81°F), a hipohidratação prejudica a performance aeróbica no exercício, com um adicional de ~1% para cada 1°C (1,8°F) de elevação da temperatura da pele.

LEITURA RECOMENDADA

Mai de 2018 SSE #180: Água Fria e Gelo na Redução da Temperatura Corporal durante Exercícios no Calor

Julho de 2018 SSE #181: O Conceito “Potência Crítica” e a Performance nos Exercícios de Alta Intensidade

Agosto de 2018 SSE #182: Estratégia de Ingestão de Líquidos para Hidratação Ideal e Performance: Planejamento de Ingestão de Líquidos vs. Ingestão na Sede

INTRODUÇÃO

Desequilíbrios de água corporal e eletrólitos são comuns quando se realiza exercícios físicos extenuantes e/ou durante a exposição ao calor ambiental extremo (Sawka et al., 2007), frio (Freund & Young, 1996) e altas altitudes (Hoyt & Honig, 1996). Em ambientes quentes, altas taxas de suor podem ser mantidas por muitas horas resultando em um desequilíbrio de água corporal e eletrólitos (Montain et al., 2006). Durante exposições ao frio e altas altitudes, os déficits de água corporal se devem parcialmente à maior produção de urina. No entanto, as taxas de suor podem também ser elevadas enquanto se realiza atividade física extenuante em altas altitudes e ambientes frios devido às altas taxas de irradiação (Gonzalez et al., 2012) e à utilização de vestimentas e equipamentos pesados (Young et al., 2000). Quando a perda de água corporal excede 2% da massa corporal, a performance aeróbica do exercício pode ser prejudicada (Sawka et al., 2007; Sawka et al., 2015).

BALANÇO HÍDRICO E ÁGUA CORPORAL

A água (água corporal total) é o principal constituinte químico do corpo humano. Para um jovem adulto do sexo masculino, em média, o total de água corporal representa 50-70% do peso corporal (Instituto de Medicina, 2005). A variabilidade do total de água corporal se deve principalmente à diferenças na composição corporal. A massa corporal magra é ~73% constituída de água e a massa corporal de gordura é ~10% de água (Instituto of Medicine, 2005). Logo, para um atleta mediano, a deficiência de água de 2% da massa corporal será ~3% de água corporal total e, ~5-10% do total de água corporal serão transformados diariamente, distribuídos por vias para perda de líquidos obrigatórias (não provenientes do exercício).

A Tabela 1 fornece as fontes diárias de perda e produção de água em populações sedentárias e ativas (Sawka et al., 2005). A água metabólica é formada pela oxidação de substratos e é dificilmente compensada pelas perdas respiratórias de água. A produção de urina geralmente se aproxima de 1-2 litros (1,05-2,11 qt.) por

dia, mas pode ser aumentada de maneira acentuada quando se consome grandes volumes de líquido. Esta grande capacidade de variação da produção de urina representa a principal via para regular o balanço concreto de água corporal e balanço de solutos, por uma grande variedade de volumes de consumo de líquidos e perdas por diversas vias (Institute of Medicine, 2005). As perdas de suor variam de forma ampla e dependem do nível de atividade física e das condições ambientais como a temperatura, a carga de calor irradiada e a alta umidade, todos sendo requisitos para a elevação significativa da transpiração (Gonzalez et al., 2009). A Figura 1 fornece uma aproximação das taxas de suor por hora, para atletas correndo em diferentes velocidades e expostos a diferentes condições ambientais (Sawka, 1992). As taxas de suor > 1 l/h (1,05 qt.) são comuns devido às altas intensidades metabólicas e/ou ao estresse pelo calor ambiental.

Fonte	Perda (ml/dia)	Produção (ml/dia)
Perda respiratória	-250 to -350	
Perda urinária	-500 to -1.000	
Perda fecal	-100 to -200	
Perda insensível	-450 to -1.900	
Produção metabólica		+250 to +350*
Total	-1.300 to -3.450	+250 to +350
Perda concreta (sedentário)	-1.050 to -3.100	
Perdas de suor em diversos esportes	-455 to -3.630	
Perda concreta (atleta)	-1.550 to -6.730	

Tabela modificada de Sawka et al. (2005). *Produção metabólica de água baseada em um gasto energético diário de 2.500-3.000 kcal. A produção adicional de água no exercício é assumida como sendo neutralizada pelas perdas respiratórias paralelas (como ilustrado acima, com o repouso).

Tabela 1 . Perdas e produção diária de água.

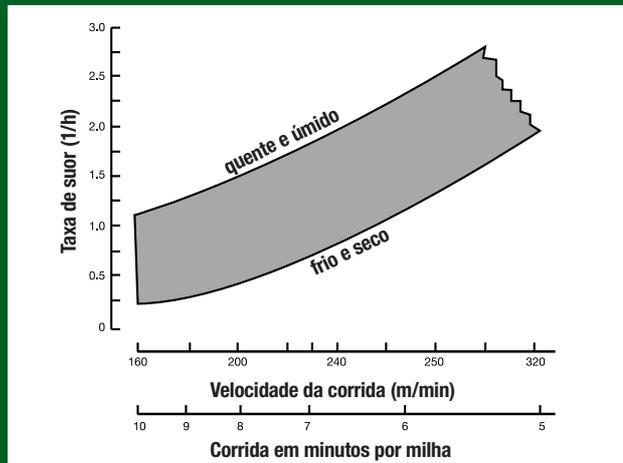


Figura 1. Aproximação das taxas de suor por hora em corredores em diferentes velocidades e condições de estresse térmico (Sawka, 1992).

O balanço de água corporal (perda=ganho) é regulado significativamente bem, em uma base diária, como resultado do acionamento do mecanismo de sede e de fome, em conjunto com o acesso ad libitum aos alimentos e bebidas para neutralizar as perdas de água (Instituto de Medicina, 2005). Isto é alcançado por uma interação complexa entre as respostas neuroendócrinas e respostas renais ao volume de água corporal e às mudanças nos eletrólitos, assim como fatores não-regulatórios sociocomportamentais. Estas respostas fisiológicas homeostáticas em conjunto garantem que pequenos graus de hidratação acima ou abaixo do normal sejam rapidamente compensados em curto prazo (Instituto de Medicina, 2005).

Durante períodos com altas taxas de suor (> 1 l/h; 1,05 qt./h), os indivíduos praticando consumo ad libitum irão frequentemente consumir líquidos abaixo do indicado (Adolph, 1947; Adolph & Dill, 1938; Bean & Eichna, 1945; Greenleaf et al., 1983; Greenleaf & Sargent, II, 1965), implicando em um déficit de água corporal (Cheuvront & Haymes, 2001; Sawka et al., 2007). A Figura 2 representa os déficits de água ocorridos em corredores com consumo de líquidos ad libitum, em diferentes ritmos em maratonas disputadas em uma grande variedade de condições ambientais, de frias a quentes (Cheuvront et al., 2007). Note que a maioria dos corredores atingiu déficits de água corporal $> 2\%$ das suas massas corporais iniciais.

DÉFICIT DE ÁGUA CORPORAL

A hipohidratação é definida como um déficit de água corporal maior que as flutuações diárias normais (Cheuvront & Kenefick, 2014). Mudanças no estado de hidratação podem ser avaliadas por uma variedade de medidas corporais; no entanto, todas elas têm sérias limitações (Cheuvront & Kenefick, 2014). Devido à baixa variabilidade em relação às medidas, a alteração na massa corporal fornece a medida mais sensível e simples para se determinar alterações acentuadas na quantidade de água corporal, em todos os tipos de desidratação (Cheuvront et al., 2013; Cheuvront & Kenefick, 2014; Instituto de Medicina, 2005; Sawka et al., 2007). Déficits de água corporal $> 2\%$ da massa corporal excedem dois desvios-padrões na variabilidade da massa corporal normal (Adolph & Dill, 1938; Cheuvront et al., 2004) e representam um limite

aproximado (baseado no volume de redução do plasma e aumento na osmolaridade do plasma) no qual ocorrem ações de regulação compensatória de líquidos (Cheuvront et al., 2013, 2014).

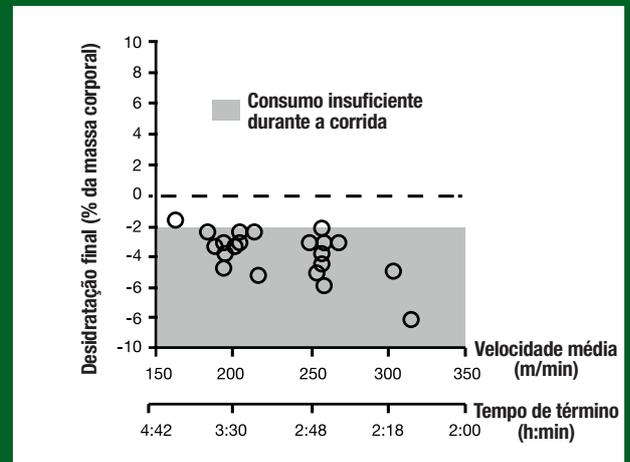


Figura 2. Gráfico da velocidade média de corrida no momento do término para 42km em comparação com a magnitude da hipohidratação pós-corrida na ingestão de líquidos ad libitum (Cheuvront et al., 2007)

A reposição de líquidos incompleta reduz a água corporal total, e como uma consequência da troca de líquidos livres, afeta cada espaço de líquido e reduz o volume sanguíneo (plasma) (Instituto de Medicina, 2005). O volume do plasma é reduzido porque ele fornece líquido para o suor, e como resultado, a osmolaridade aumenta porque o suor é hipotônico (pobre em sódio) em relação ao plasma. A hiperosmolaridade do plasma age puxando líquido intracelular para o meio extracelular, para permitir uma defesa em relação ao volume do plasma quando indivíduos se tornam hipohidratados (Mack & Nadel, 1996). A utilização de diuréticos (exemplo, furosemidas) por razões médicas aumenta a formação de urina e geralmente resulta na perda de eletrólitos e de água. A hipohidratação induzida por diuréticos normalmente resulta em uma hipovolemia iso-osmótica, com uma razão muito maior de perda de plasma em relação à perda de água intracelular que é típica da hipohidratação induzida pelo exercício ou pelo calor (Cheuvront et al., 2013). Coerentemente, estressores ambientais do frio (Young et al., 1987) e altas altitudes (Hoyt & Honig, 1996) estimulam a produção de urina e eletrólitos, induzindo desta forma uma hipovolemia iso-osmótica (Cheuvront et al., 2013).

O AMBIENTE E A PERFORMANCE AERÓBICA

Temperatura do Ambiente

Durante exercícios realizados no calor, a carga fisiológica mais significativa é manter um alto fluxo sanguíneo da pele para a dissipação de calor (Nybo et al., 2014; Sawka et al., 2011c). A temperatura da pele é elevada em proporção à temperatura e à umidade ambiental. A Figura 3A ilustra a relação geralmente linear entre a temperatura ambiental e a temperatura da pele (Adams, 1977), com um cálculo anova do intervalo de confiança de 95% para ilustrar os efeitos modificadores do fluxo de ar e do sol na relação associada. As temperaturas da pele serão elevadas em direção ao maior valor do intervalo de confiança pela alta umidade

ambiental, utilização de uniformes/vestimentas que isolam a pele e pela exposição à radiação solar. As temperaturas da pele serão reduzidas em direção ao menor valor do intervalo de confiança pela exposição ao grande fluxo de ar, que aumenta a evaporação do suor. A pele quente está associada com o maior fluxo sanguíneo na pele e adequação venosa cutânea, com aumento do estresse cardiovascular (Nybo et al., 2014; Sawka et al., 2011c). Em geral, quanto mais quente a pele, maior a resposta do fluxo sanguíneo da pele e maior a elevação da taxa cardíaca durante a prática de exercícios no calor. A elevação na taxa cardíaca age reduzindo o enchimento cardíaco e o volume sistólico, desta forma fornecendo um desafio para a manutenção da pressão sanguínea (Nybo et al., 2014; Sawka et al., 2011c). Portanto, durante a prática de exercícios no calor com altas taxas de suor, há um problema concomitante de volume do plasma reduzido pela desidratação em adição às necessidades elevadas de fluxo sanguíneo na pele. Esta perturbação dupla (volume do plasma reduzido com aumento do fluxo sanguíneo da pele) é provavelmente um mecanismo fisiológico importante (via sistema cardiovascular) que contribui para prejudicar a performance aeróbica (Cheuvront et al., 2010; Cheuvront & Kenefick, 2014; Nybo et al., 2014; et al., 2015).

De maneira geral, se aceita que o estresse térmico por si só irá prejudicar a performance aeróbica (Nybo et al., 2014), enquanto o estresse pelo frio isoladamente não impacta a performance aeróbica, a não ser que a temperatura seja baixa o suficiente para prejudicar de maneira adversa a função musculoesquelética e a condução nervosa (Sawka et al., 2011c). Os primeiros experimentos em relação aos déficits de água corporal e a capacidade de exercício foram conduzidos pelos militares e claramente concluíram que em ambientes quentes, a reposição de líquidos resultou em uma melhor manutenção da performance de resistência na marcha/militar em testes de laboratório e de campo (Adolph, 1947; Bean & Eichna, 1945; Ladell, 1955). Estudos posteriores utilizando uma variedade de protocolos de testes de resistência máximos e submáximos confirmaram, de maneira geral, as observações anteriores (Cheuvront & Kenefick, 2014). O impacto negativo da hipohidratação na performance aeróbica é provavelmente relacionado ao estresse pelo calor ambiental. Em ambientes que geram estresse pelo frio (2-10°C; 35-50°F), a hipohidratação não alterou a performance aeróbica (Cheuvront et al., 2005; Kenefick et al., 2010). Durante condições amenas (20-24°C; 68-75°F), a hipohidratação pode (Cheuvront et al., 2005; Fallowfield et al., 1996; McConell et al., 1997; Merry et al., 2010) ou não (Kenefick et al., 2010; McConell et al., 1999; Oliver et al., 2007), prejudicar a performance aeróbica. Durante condições quentes (> 25°C; > 77°F) a hipohidratação geralmente (Below et al., 1995; Castellani et al., 2010; Cheung & McLellan, 1998; Ebert et al., 2007; Kenefick et al., 2010; Sawka, 1992; et al., 1994), mas nem sempre (Cheung et al. 2015), prejudica a performance aeróbica.

A Figura 3B ilustra o impacto da hipohidratação na performance aeróbica submáxima em diversos estudos sobre hipohidratação (Castellani et al., 2010; Cheuvront et al., 2005; Kenefick et al., 2010) conduzidos em nosso laboratório (Sawka et al., 2011b). Estes estudos utilizaram procedimentos similares com relação a uma grande variedade de temperaturas da pele 20-36°C (68-97°F). O método de regressão segmentada foi utilizado para aproximar os limites estatísticos das temperaturas da pele em relação aos danos à performance, utilizando dados individuais do estudo (n=53 observações pareadas). O limite que melhor minimizou a soma residual dos quadrados foi de 27,3°C (81°F), e a pele mais quente acentuou o dano na performance em ~1,5% para cada 1°C adicional (1,8°F) na temperatura da pele. Portanto, à medida que as condições ambientais se tornam mais quentes, resultando numa elevação da vasodilatação cutânea, o impacto adverso da hipohidratação é claramente evidente (Sawka et al., 2011b).

Além da performance aeróbica submáxima, a hipohidratação também foi relatada prejudicando consistentemente a máxima intensidade da performance aeróbica. Diversos trabalhos de revisão abordam o impacto da hipohidratação no dano da máxima intensidade da performance física aeróbica (Cheuvront & Kenefick, 2014; Sawka et al., 1984).

Grande Altitude Terrestre

O esforço físico em grandes altitudes provavelmente induz taxas de suor comparáveis àquelas ao nível do mar com um certo estresse térmico (Gonzalez et al., 2013). Além disso, em uma exposição a grandes altitudes há uma redução diurética proporcional no volume

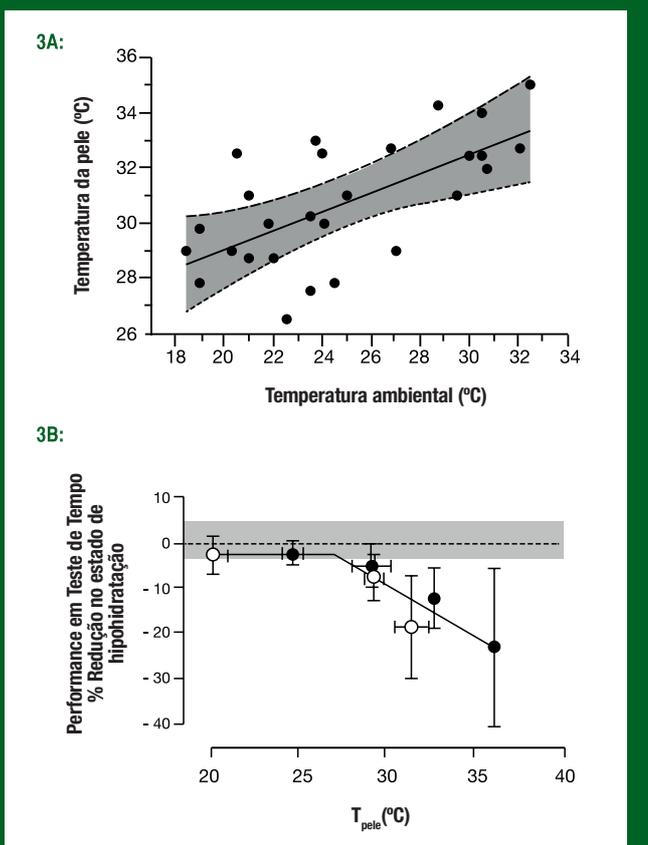


Figura 3. (Gráfico A) Relação linear aproximada entre as condições ambientais e temperatura da pele durante exercício aeróbico, com utilização mínima de vestimentas, redesenhado de Adams (1977), linhas tracejadas representam 95% do intervalo de confiança

(Gráfico B) Porcentagem da redução na performance aeróbica submáxima (partindo do estado de euidratação) em função da temperatura da pele quando no estado de hipohidratação de 4% da massa corporal, de Sawka et al. (2011b).

do plasma (Young & Sawka, 2002). Portanto, a hipohidratação em grandes altitudes pode ocorrer tanto pelas perdas de suor, como também pelas adaptações ao ambiente.

Castellani e colaboradores (2010) examinaram o impacto da hipohidratação (4% da perda de massa corporal) na performance aeróbica submáxima em altitude. Seus indivíduos realizaram testes de tempo em ambientes quentes (27°C; 80°F) quando euhidratados (hidratação normal) e hipohidratados, no nível do mar e em uma câmara hipobárica para simular grandes altitudes (3.048 m; 10.000 pés). Eles encontraram que a performance física aeróbica no estado hipohidratado no nível do mar foi prejudicada em 19% em comparação ao estado euhidratado no nível do mar. Adicionalmente, a performance aeróbica do exercício teve um declínio em 11% no estado euhidratado em grandes altitudes e 34% no estado hipohidratado em grandes altitudes. Além disso, Girard e Racinais (2014) relataram que a exposição ao calor e a hipóxia (35°C, concentração de oxigênio inspirado de 15%) resultaram em um decréscimo de 51% em uma atividade de ciclismo até a exaustão em comparação com as condições controle (amenas/nível do mar), mas também prejudicou a performance em comparação com as condições quentes/nível do mar ou amenas/grande altitude. Portanto, a altitude/hipohidratação e altitude/exposição ao calor tiveram um efeito adicional ao dano na performance.

MECANISMOS DE DIMINUIÇÃO DA PERFORMANCE AERÓBICA

A hipohidratação prejudica a performance aeróbica quando o estresse térmico está presente e este impacto adverso é acentuado com a exposição a grandes altitudes. O estresse térmico é peculiar porque ele induz um considerável estresse cardiovascular como suporte ao fluxo sanguíneo cutâneo necessário e à hipertermia (temperaturas interna e da pele elevadas). A Tabela 2 resume brevemente os mecanismos fisiológicos que prejudicam a performance aeróbica durante o estresse térmico. É importante notar que a hipohidratação exacerba todos os mecanismos fisiológicos propostos que parecem limitar o desempenho aeróbico apenas pelo estresse térmico. No entanto, está claro que o elevado estresse cardiovascular induzido pela hipohidratação é provavelmente o principal fator crítico que causa danos para a performance aeróbica. Além disso, o possível papel para o mecanismo da sede não foi claramente definido (Cheung et al., 2015).

IMPLICAÇÕES PRÁTICAS

- Quando está quente ao ar livre e você está realizando exercícios ou vestindo equipamentos pesados, assegure-se de que você está bem hidratado antes de começar a se exercitar monitorando o seu peso, sua urina e sua sede (veja SSE #97).
- Quando realizar atividade física, reponha suas perdas de suor e não desidrate mais que 2% do seu peso corporal.
- Se uma perda acentuada $\geq 2\%$ da massa corporal acontecer durante o exercício, a performance pode ser afetada negativamente.
- Independentemente do estado de hidratação, a performance física aeróbica é prejudicada em grandes altitudes em comparação com o nível do mar, enquanto efeitos negativos na performance no calor e na altitude são adicionais.

- A hipohidratação não altera a performance aeróbica no exercício em ambientes frios e frescos, e às vezes prejudica a performance aeróbica no exercício em condições amenas.
- A hipohidratação geralmente prejudica a performance aeróbica no exercício em condições ambientais quentes.
- Quando a temperatura da pele excede 27°C (81°F), a hipohidratação prejudica a performance aeróbica no exercício em um adicional de ~1% para cada 1°C (1,8°F) de elevação da temperatura da pele.

Cardiovascular

Ex: pressão e fluxo sanguíneo, entrega de oxigênio e remoção metabólica

SNC & Neurobiológicos

Ex: metabolismo cerebral, níveis de neurotransmissores, temperatura

Fatores da Musculatura Periférica

Ex: resposta à temperatura, metabólica e resposta aferente (função sensorial)

Psicológicos

Ex: conforto térmico, taxa de percepção de esforço, motivação e expectativas

Respiração

Ex: hipocapnia, alcalose, sensações da respiração

Tabela modificada de Nybo et al., 2014. SNC se refere ao Sistema Nervoso Central.

Tabela 2. (Mecanismos fisiológicos que possivelmente contribuem com danos à performance do exercício em ambientes quente.

CONCLUSÕES

A hipohidratação prejudica a performance aeróbica quando o estresse térmico está presente e este impacto adverso é acentuado com a exposição a grandes altitudes. O estresse térmico é peculiar porque ele induz um considerável estresse cardiovascular como suporte ao fluxo

NOTAS

As opiniões ou afirmações contidas aqui são visões pessoais dos autores e não devem ser considerados como ponto de vista oficial ou refletindo as visões do Exército ou do Departamento de Defesa. Aprovado para publicação pública: distribuição ilimitada.

REFERÊNCIAS

- Adams, W.C. (1977). Influence of exercise mode and selected ambient conditions on skin temperature. *Ann. New York Acad. Sci.* 301:110-127.
- Adolph, E.F. (1947). *Physiology of Man in the Desert*. New York: Intersciences Publishers, Inc.
- Adolph, E.F., and D.B. Dill (1938). Observations on water metabolism in the desert. *Am. J. Physiol.* 123:369-499.
- Bean, W.B., and L.W. Eichna (1945). Performance in relation to environmental temperature: reactions of normal young men to simulated desert environment. *Fed. Proc.* 2:144-158.
- Below, P.R., R. Mora-Rodríguez, J. González-Alonso, and E.F. Coyle (1995). Fluid and carbohydrate ingestion independently improve performance during 1h of exercise. *Med. Sci. Sports Exerc* 27:200-210.

- Castellani, J.W., S.R. Muza, S.N. Cheuvront, I.V. Sils, C.S. Fulco, R.W. Kenefick, B.A. Beidleman, and M.N. Sawka (2010). Effect of hypohydration and altitude exposure on aerobic exercise performance and acute mountain sickness. *J. Appl. Physiol* 109:1792-1800.
- Cheung, S.S., and T.M. McLellan (1998). Heat acclimation, aerobic fitness, and hydration effects on tolerance during uncompensable heat stress. *J. Appl. Physiol.* 84:1731- 1739.
- Cheung, S.S., G.W. McGarr, M.M. Mallette, P.J. Wallace, C.L. Watson, I.M. Kim. and M.J. Greenway (2015) Separate and combined effects of dehydration and thirst sensations on exercise performance in the heat. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 25(Suppl. 1) : 104-111.
- Cheuvront, S.N., and R.W. Kenefick (2014). Dehydration: physiology, assessment, and performance effects. *Compr. Physiol.* 4:257-285.
- Cheuvront, S.N., and E.M. Haymes (2001). Ad libitum fluid intakes and thermoregulatory responses of female distance runners in three environments. *J Sports Sci.* 19:845- 854.
- Cheuvront, S.N., R. Carter, III, S.J. Montain, and M.N. Sawka (2004). Daily body mass variability and stability in active men undergoing exercise-heat stress. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 14:532-540.
- Cheuvront, S.N., R. Carter, J.W. Castellani, and M.N. Sawka (2005). Hypohydration impairs endurance exercise performance in temperate but not cold air. *J. Appl. Physiol.* 99:1972-1976.
- Cheuvront, S.N., S.J. Montain, and M.N. Sawka (2007). Fluid replacement and performance during the marathon. *Sports Med.* 37:353-357.
- Cheuvront, S.N., R.W. Kenefick, S.J. Montain, and M.N. Sawka (2010). Mechanisms of aerobic performance impairment with heat stress and dehydration. *J. Appl. Physiol* 109:1989-1995.
- Cheuvront, S.N., R.W. Kenefick, N. Charkoudian, and M.N. Sawka (2013). Physiologic basis for understanding quantitative dehydration assessment. *Am. J. Clin. Nutr.* 97:455-462.
- Ebert, T.R., D.T. Martin, N. Bullock, I. Mujika, M.J. Quod, L.A. Farthing, L.M. Burke, and R.T. Withers (2007). Influence of hydration status on thermoregulation and cycling hill climbing. *Med. Sci. Sports Exerc* 39:323-329.
- Fallowfield, J.L., C. Williams, J. Booth, B.H. Choo, and S. Grownns (1996). Effect of water ingestion on endurance capacity during prolonged running. *J Sports Sci.* 14:497- 502.
- Freund, B.J., and A.J. Young (1996). Environmental influences body fluid balance during exercise: cold exposure. In: E.R. Buskirk and S.M. Puhl (eds.), *Body Fluid Balance: Exercise and Sport*, New York: CRC Press, pp. 159-181.
- Girard, O. and S. Racinais (2014). Combining heat stress and moderate hypoxia reduces cycling time to exhaustion without modifying neuromuscular fatigue characteristics. *Eur. J. Appl. Physiol* 114:1521-1532.
- Gonzalez, R.R., S.N. Cheuvront, S.J. Montain, D.A. Goodman, L.A. Blanchard, L.G. Berglund, and M.N. Sawka (2009). Expanded prediction equations of human sweat loss and water needs. *J. Appl. Physiol* 107:379-388.
- Gonzalez, R.R., S.N. Cheuvront, B.R. Ely, D.S. Moran, A. Hadid, T.L. Endrusick, and M.N. Sawka (2012). Sweat rate prediction equations for outdoor exercise with transient solar radiation. *J. Appl. Physiol* 112:1300-1310.
- Gonzalez, R.R., R.W. Kenefick, S.R. Muza, S.W. Hamilton, and M.N. Sawka (2013). Sweat rate and prediction validation during high-altitude treks on Mount Kilimanjaro. *J. Appl. Physiol* 114:436-443.
- Greenleaf, J.E., and F. Sargent, II (1965). Voluntary dehydration in man. *J. Appl. Physiol.* 20:719-724.
- Greenleaf, J.E., P.J. Brock, L.C. Keil, and J.T. Morse (1983). Drinking and water balance during exercise and heat acclimation. *J. Appl. Physiol.* 54:414-419.
- Hoyt, R.W., and A. Honig (1996). Body fluid and energy metabolism at high altitude. In: *Am. Physiol. Soc. (eds.), Handbook of Physiology: Environmental Physiology*, Bethesda, MD, pp. 1277-1289.
- Institute of Medicine (2005). *Dietary reference intakes for water, potassium, sodium, chloride, and sulfate*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- Kenefick, R.W., S.N. Cheuvront, L.J. Palombo, B.R. Ely, and M.N. Sawka (2010). Skin temperature modifies the impact of hypohydration on aerobic performance. *J. Appl. Physiol* 109:79-86.
- Ladell, W.S.S. (1955). The effects of water and salt intake upon the performance of men working in hot and humid environments. *J. Physiol.* 127:11-46.
- Mack, G.W., and E.R. Nadel (1996). Body fluid balance during heat stress in humans. In: M.J. Fregly and C.M. Blatteis (eds.), *Environmental Physiology*, New York: Oxford University Press, pp. 187-214.
- McConell, G.K., C.M. Burge, S.L. Skinner, and M. Hargreaves (1997). Influence of ingested fluid volume on physiological responses during prolonged exercise. *Acta Physiol. Scand.* 160:149-156.
- McConell, G.K., T.J. Stephens, and B.J. Canny (1999). Fluid ingestion does not influence intense 1-h exercise performance in a mild environment. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31:386-392.
- Merry, T.L., P.N. Ainslie, and J.D. Cotter (2010). Effects of aerobic fitness on hypohydration-induced physiological strain and exercise impairment. *Acta Physiol.* 198:179-190.
- Montain, S.J., S.N. Cheuvront, and M.N. Sawka (2006). Exercise associated hyponatraemia: quantitative analysis to understand the aetiology. *Br. J. Sports Med.* 40:98-105.
- Nybo, L., P. Rasmussen, and M.N. Sawka (2014). Performance in the heat-physiological factors of importance for hyperthermia-induced fatigue. *Compr. Physiol.* 4:657-689.
- Oliver, S.J., S.J. Laing, S. Wilson, J.L. Bilzon, and N. Walsh (2007). Endurance running performance after 48 h of restricted fluid and/or energy intake. *Med. Sci. Sports Exerc.* 39:316-322.
- Sawka, M.N. (1992). Physiological consequences of hydration: exercise performance and thermoregulation. *Med. Sci. Sports Exerc.* 24:657-670.
- Sawka, M.N., R.P. Francesconi, A.J. Young, and K.B. Pandolf (1984). Influence of hydration level and body fluids on exercise performance in the heat. *J. Am. Med. Assoc.* 252:1165-1169.
- Sawka, M.N., S.N. Cheuvront, and R. Carter, III (2005). Human water needs. *Nutr. Rev.* 63:S30-S39.
- Sawka, M.N., L.M. Burke, E.R. Eichner, R.J. Maughan, S.J. Montain, and N.S. Stachenfeld (2007). American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Med. Sci. Sports Exerc* 39:377-390.
- Sawka, M.N., J.W. Castellani, S.N. Cheuvront, and A.J. Young (2011a). Physiological systems and their responses to conditions of heat and cold. In: P.A. Farrell, M.J. Joyner, and V.J. Caiozzo (eds.), *ACSM's Advanced Exercise Physiology*, Baltimore: Lippincott, Williams & Wilkins, pp. 567-602.
- Sawka, M.N., S.N. Cheuvront, and R.W. Kenefick (2011b). High skin temperature and hypohydration impairs aerobic performance. *Exp. Physiol.* 97:327-332.
- Sawka, M.N., L.R. Leon, S.J. Montain, and L.A. Sanna (2011c). Integrated physiological mechanisms of exercise performance, adaptation, and maladaptation to heat stress. *Compr. Physiol.* 1:1883-1928.
- Sawka M.N., S.N. Cheuvront and R.W. Kenefick (2015). Hypohydration and human performance: Impact of environment and mechanisms. *Sports Med.* 45;(Suppl 1)551-560.
- Walsh, R.M., T.D. Noakes, J.A. Hawley, and S.C. Dennis (1994). Impaired high-intensity cycling performance time at low levels of dehydration. *Int. J. Sports Med.* 15:392- 398.
- Young, A.J., and M.N. Sawka (2002). Blood volume changes during altitude acclimatization: Implications for aerobic performance. In: J. Moravec, N. Takeda, and P.K. Singai (eds.), *Adaptation Biology and Medicine*, New Delhi: Narosa Publishing House, pp. 191-201.
- Young, A.J., S.R. Muza, M.N. Sawka, and K.B. Pandolf (1987). Human vascular fluid responses to cold stress are not altered by cold acclimation. *Undersea Biomed. Res.* 14:215-228.
- Young, A.J., C. O'Brien, M.N. Sawka, and R.R. Gonzalez (2000). Physiological problems associated with wearing NBC protective clothing during cold weather. *Aviat. Space Environ. Med.* 71:184-189.

