

# DETECÇÃO DE FÁCIES DE ALTERAÇÃO HIDROTERMAL POR GEOBOTÂNICA NA FLORESTA AMAZÔNICA, BRASIL

TEODORO ISNARD RIBEIRO DE ALMEIDA<sup>1</sup>, CAETANO JULIANI<sup>1</sup>, CARLOS ROBERTO DE SOUZA FILHO<sup>2</sup> & FÁBIO CARDINALE BRANCO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências, Rua do Lago, 562, Butantã, CEP 05508-080, São Paulo, SP, Brasil ([talmeida@usp.br](mailto:talmeida@usp.br); [cjuliani@usp.br](mailto:cjuliani@usp.br)); <sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Geociências, R. João Pandiá Calógeras, 51, CEP 13083-970, Campinas, SP, Brasil ([beto@ige.unicamp.br](mailto:beto@ige.unicamp.br))

## INTRODUÇÃO

Esta pesquisa foi desenvolvida na região de ocorrência da mineralização aurífera do tipo *high-sulfidation* descrita por Juliani *et al.* (2005) na Província Aurífera do Tapajós (PAT). De acordo com RADAMBRASIL (1976), geomorfologicamente a região pertence ao Alto Platô do Xingu-Tapajós e a cobertura vegetal predominante é a Floresta Ombrófila Tropical - uma floresta densa, caracterizada por grandes árvores com até mais de 50 metros de altura, se destacando do dossel uniforme a 25 a 35 m. A topografia condiciona variações fisionômicas importantes, inclusive com espécies autóctones dominantes, mas em todos estes sub-ambientes, em função da densa cobertura vegetal, a obtenção de informações espectrais de minerais é pouco provável. A região em estudo, assim como a maior parte da Amazônia é muito pouco habitada e quase não há acessos por terra, características estas que tornam particularmente importantes as fontes indiretas de informação geológica, como a GbSR – Geobotânica por Sensoriamento Remoto (Riaza *et al.*, 1998).

A PAT foi responsável por grande parte da produção de ouro no Brasil até a década de 80, mas as lavras foram desenvolvidas quase que exclusivamente em depósitos secundários. Com a exaustão destes depósitos iniciou-se a busca pelas mineralizações primárias, tendo sido encontradas mineralizações filonianas mesotermais orogenéticas, em zonas de cisalhamento, hospedadas em granitos, epitermais do tipo *high-* e *low-sulfidation* e relacionadas a pôrfiros (Santos *et al.*, 2001; Juliani *et al.*, 2002; 2004, 2005). Todos estes tipos de mineralizações tem associadas zonas de alteração hidrotermal, ainda mais expressivas nos três últimos tipos, o que motivou essas investigações.

A GbSR como método de prospecção mineral baseia-se em alterações no padrão ou na morfologia da vegetação sobre depósitos minerais, podendo apresentar estresses sazonais ou espaciais, alterações na assembléia vegetal e/ou em crescimento anômalo de determinadas espécies (Drury, 2001) - tais aspectos, em sua totalidade, são passíveis de detecção por sensoriamento remoto. Entretanto, as coberturas vegetais são dependentes de diversas variáveis além da geologia, principalmente a topografia e o tempo de incidência de iluminação direta. A topografia intervém nas coberturas vegetais de forma independente ao substrato rochoso, ao clima e à pedogênese, inclusive na Amazônia. Svenning (1999) e Rowan *et al.* (2000) mostram casos em que as respostas espectrais de dossel variam mais em função da direção e inclinação da vertente do que pela presença de alteração hidrotermal. Ou seja, a geometria da visada e da iluminação solar podem preponderar sobre as alterações na cobertura vegetal devidas à geologia.

É consenso haver nas florestas temperadas e sub-tropicais alterações das coberturas vegetais sobre mineralizações contendo elementos agressivos às plantas, como senescência precoce, rebrota tardia, nanismo ou gigantismo de determinadas espécies, frequente diminuição do teor de clorofila e de água celular nas folhas. As florestas equatoriais não são decíduas, inexistindo, por exemplo, o padrão sazonal de senescência e rebrota. Por outro lado, a alta biodiversidade das florestas tropicais e equatoriais permite variações na assembléia de vegetais e nas características do dossel, também com potencial de detecção em sensoriamento remoto. Assim, enquanto nas florestas de altas latitudes a geobotânica se expressa por intoxicação e estresses em um conjunto homogêneo e muito pouco numeroso de espécies, nas florestas equatoriais, as indicações geobotânicas se dão em função de diferenças florísticas. Este conceito modifica a estratégia a ser utilizada pelo sensoriamento remoto nestas florestas: o objeto de busca não é estresse mas floresta dissimilar. Entre os poucos trabalhos que citam relações de dissimilaridade de florestas em função da presença de alteração hidrotermal, pode-se citar Rowan *et al.* (2000) e Almeida *et al.* (neste volume).

A compreensão de como se expressa a biodiversidade na floresta Amazônica é aspecto essencial na discussão da aplicabilidade da geobotânica naquele bioma. De acordo com Tuomisto *et al.* (2003), há três propostas alternativas para explicar aquela rica biodiversidade: (i) as plantas seriam igualmente competitivas e a composição florística local resultado de imigrações e extinções aleatórias; (ii) a floresta seria essencialmente homogênea e uma pequena proporção de espécies seriam dominantes em amplas áreas, por serem mais competitivas; (iii) diferenças nos solos ao longo das florestas tropicais são suficientemente diferentes para gerar numerosos mosaicos de florestas floristicamente diferentes. No primeiro caso, considera-se que a similaridade florística é relacionada com o logaritmo da distância geográfica, o que indica mudanças graduais e ausência de contatos bruscos entre coberturas vegetais. No segundo, considera-se a presença de um amplo conjunto de espécies de ocorrência generalizada, com poucas espécies sendo localmente dominantes. O terceiro considera a existência de variações ambientais pronunciadas, mesmo em biomas tidos como mais homogêneos, em função de variações na topografia e solos (Tuomisto *et al.*, 1995). Neste caso, considera-se a possibilidade de mosaicos de ambientes, em que a proximidade geográfica teria pouca relação com a similaridade florística, e espera-se a presença de locais vizinhos muito dissimilares. A aplicabilidade da geobotânica

em florestas equatoriais úmidas ocorre apenas nesta terceira possibilidade, a qual vem sendo confirmada com base em dados de campo, como em Riaza *et al.* (1998), Svenning (1999) e Tuomisto *et al.* (2003).

São ainda raros os trabalhos de aplicação de GbSR no centro-leste da Amazônia, destacando-se os de Paradella (1992) e Paradella *et al.* (1994; 1998). A literatura internacional é mais prolífica, mas principalmente sobre terrenos em climas temperados, e não apresenta resultados uniformes quanto às alterações espectrais do dossel de floresta sobre rochas alteradas hidrotermalmente. Entre outros trabalhos recentes em sensoriamento remoto óptico, destacam-se os de Rowan *et al.* (2000) e Xu & Ma (2004).

Esse trabalho tem como objetivo realizar uma investigação sobre anomalias geobotânicas em áreas de floresta tropical localizada na Província Aurífera do Tapajós (PA), a partir de dados Landsat-5 TM processados segundo algoritmos destinados ao realce de respostas espectrais anômalas da vegetação.

## GEOLOGIA DAS MINERALIZAÇÕES AURÍFERAS

O estudo das mineralizações auríferas, da granitogênese e do vulcanismo na PAT tem evoluído significativamente nos últimos anos (Dall'Agnol *et al.*, 1994; Santos *et al.*; 2001; Lamarão *et al.*, 2002; Juliani *et al.*, 2002; 2004; 2005). As mineralizações de ouro são consideradas como sendo principalmente orogênicas mesotermais; epitermais e mesotermais em zonas de cisalhamento; além de tipos associados a *intrusion-related gold systems* e hospedados em metassedimentos (Klein, 2001; Santos *et al.*, 2001). Tais evidências tem sugerido baixa potencialidade para mineralizações nas rochas vulcânicas do Grupo Iriri mas, recentemente, mineralizações *high-* e *low-sulfidation* tem sido descritas em complexos de *ash-flow calderas* (Nunes, 2001; Juliani *et al.*, 2004; 2005), às quais relacionam-se mineralizações do tipo pôrfiro em granitos, ou relacionadas a sistemas pôrfiros, como no Granito Batalha (Juliani *et al.*, 2002), pertencente à suíte tardia- a pós-colisional do evento Parauari.

A mineralização de ouro *high-sulfidation* ocorre em brechas hidrotermais em crateras de vulcões anelares de complexos de *ash-flow calderas*. As zonas de alteração hidrotermal configuram um núcleo de sílica maciça, capeado por um *silica cap* com hematita, produto de forte lixiviação ácida. Este núcleo tem a forma de um cone invertido e é envolvido por uma zona alteração argílica avançada com alunita–natroalunita (disseminada, em veios e alunititos), pirofilita, andalusita, diáspero, rutilo, caolinita–dickita, woodhouseita–svanbergite, pirita, calcopirita, bornita, covelita, esfalerita, enargita–luzonita e Au, Ag e Cu nativos. Esta zona de alteração é, por sua vez, envolvida por uma zona de alteração argílica avançada com alunita ausente ou em pequenas quantidades e discretas zonas de alteração argílica, rica em caolinita. O halo de alteração hidrotermal mais externo é propilítico e, em níveis profundos, predomina alteração sericítica. O contexto geológico da mineralização Cu–Mo–(Au) *low-sulfidation* é análogo ao da *high-sulfidation*, mas a alteração principal caracteriza-se pela presença de adulária e sericita e o *silica cap* não está presente. Em profundidade, diques e *stocks* de pôrfiros riódacíticos e riolíticos responsáveis pelas alterações hidrotermais cortam as vulcânicas.

Os granitos aos quais se associam as mineralizações epitermais exibem uma alteração sódica inicial localizada, seguida por forte metassomatismo potássico, responsável por intensa cristalização de microclínio e biotita e pela cor vermelho forte das rochas. Segue-se ao metassomatismo potássico uma alteração propilítica pervasiva a fissural, com sulfetos associados, e alterações sericíticas com sulfeto, predominantemente fissurais, às quais associam-se as mineralizações de ouro e de metais base. Este padrão de alteração hidrotermal é semelhante ao verificado em depósitos do tipo pôrfiro e são análogos ao descrito no Granito Batalha, também mineralizado em ouro (Juliani *et al.*, 2002). Entretanto, apesar do Granito Batalha apresentar os tipos e o padrão da alteração hidrotermal e o conteúdo de halógenos da biotita semelhante aos observados em pôrfiros ricos em Au, a baixa  $\text{fO}_2$  da cristalização da biotita e a sua colocação mesozonal não permite a classificação de sua mineralização como do tipo pôrfiro. Assim, os dados sugerem que a mineralização do Granito Batalha correlaciona-se ao mesmo evento magmático que gerou as mineralizações epitermais (evento Parauari) nas vulcânicas do Grupo Iriri, mas sua colocação foi mais profunda do que aquela presumida para os pôrfiros típicos.

Os granitos e granófiros cálcio-alcalinos, provavelmente relacionados aos estágios tardios do arco Parauari, mostram seqüências de alteração hidrotermal pós-magmática pervasiva, semelhantes às observadas em depósitos de Cu–Au porfiro, o que permite supor que os granitos Parauari mais rasos podem estar associados à evolução dos complexos de caldeiras e à formação dos depósitos epitermais, como o Granito Palito, em estudo pela equipe.

A preservação dos sistemas epitermais pode vincular-se com a formação de bacias *pull-apart*, desenvolvidas concomitantemente ou logo após a atividade vulcânica (Juliani *et al.*, 2005) e a existência de hialoclastitos indica que, em parte, o vulcanismo desenvolveu-se em ambiente subaquático lacustre ou marinho raso o que pode, potencialmente, ter possibilitado a formação de depósitos exalativos de sulfetos de metais base, disseminados ou maciços, associados a sedimentos de ambiente mais calmo, ou em caldeiras submersas, ou a rochas vulcânicas.

Zonas de cisalhamento com alteração sericítica predominante cortam as mineralizações epitermais e as associadas aos granitos.

Assim, o contexto geral indica um alto potencial para a ocorrência de depósitos epitermais *high-* e *low-sulfidation* no Grupo Iriri e de pôrfiros de Cu–Mo–(Au) em granitos Parauari tardios mais rasos e mais oxidados e de Au nos mais reduzidos (Juliani *et al.*, 2005) na PAT.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizada a imagem do sensor TM, satélite Landsat 5, órbita 228 e ponto 64, adquirida em 30/7/1984. O método utilizado para realçar a resposta espectral dos prováveis nichos diferenciados da vegetação seguiu o modelo apresentado em Almeida & Souza Filho (2004). Trata-se de uma concentração de informação e redução de dimensionalidade, em processo com duas etapas. Na primeira, são construídos índices espetrais destinados a realçar respostas de características da vegetação, como pigmentos e água foliar. Na segunda etapa aplica-se, sobre o conjunto de índices, uma análise por principais componentes (APC), onde há hierarquização da informação. Finalmente, aplica-se uma APC sobre as bandas originais no infravermelho próximo e ondas curtas (TM4, 5 e 7) para se obter uma imagem de albedo, rica em textura.

Foram definidos 8 índices espetrais. Dois foram construídos como divisões de bandas no visível (TM2/TM1 e TM2/TM3), três no infravermelho próximo/visível (TM4/TM1; TM4/TM2; TM4/TM3) e três no infravermelho próximo/infravermelho ondas curtas (TM4/TM5; TM4/TM7 e TM4/TM5\*TM7). Os quatro primeiros compreendem informações principalmente sobre pigmentos foliares; o quinto, de clorofila e área foliar; o sexto de água foliar e os dois últimos de água e componentes bioquímicos foliares. A partir da análise das matrizes de correlação entre os índices e de covariância dos autovetores, um conjunto de principais componentes (PCs) foram selecionadas e filtradas por filtros de convolução proporcionais (Branco *et al.*, submetido). Esse filtro se utiliza de matrizes passa-baixas ponderadas, visando o realce tonal. Filtros com dimensões de 15 linhas vs 15 colunas foram utilizados nesse trabalho.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicada a APC sobre os índices, foram escolhidas as PCs 4, 7 e 8. A escolha da PC4 foi em função do índice TM2/TM1 apresentar, na matriz de covariância dos autovetores, o maior peso. Este índice aporta informação da variabilidade na composição pigmentar indicada pela resposta no visível: na banda TM1 (azul) há picos de absorção de radiação eletromagnética em clorofila e carotenóides, enquanto na banda TM2 (verde), há menor absorção destes pigmentos. A PC7 também apresenta informação destes pigmentos (maior peso de TM4/TM1), mas por processo diferente, pois os pigmentos no infravermelho próximo são transparentes, não ocorrendo qualquer absorção. A PC8 tem os maiores pesos dos índices TM4/TM2 e TM4/TM5\*TM7, e contém informações tanto da composição em pigmentos, com em água e compostos bioquímicos foliares.

Um produto integrado, consequente desse processamento, compreendeu uma composição colorida com a PC4, a PC7 e a PC8 em RGB. A filtragem por filtros proporcionais realçou as respostas tonais e a composição colorida, mantendo a textura da imagem minimamente preservada, o que auxiliou na sua interpretação – nesse caso, a topografia não é acentuada, mas o padrão de colinas e platôs baixos informa muito da geologia, inclusive na identificação de feições do vulcanismo associado às mineralizações (Fig. 1).

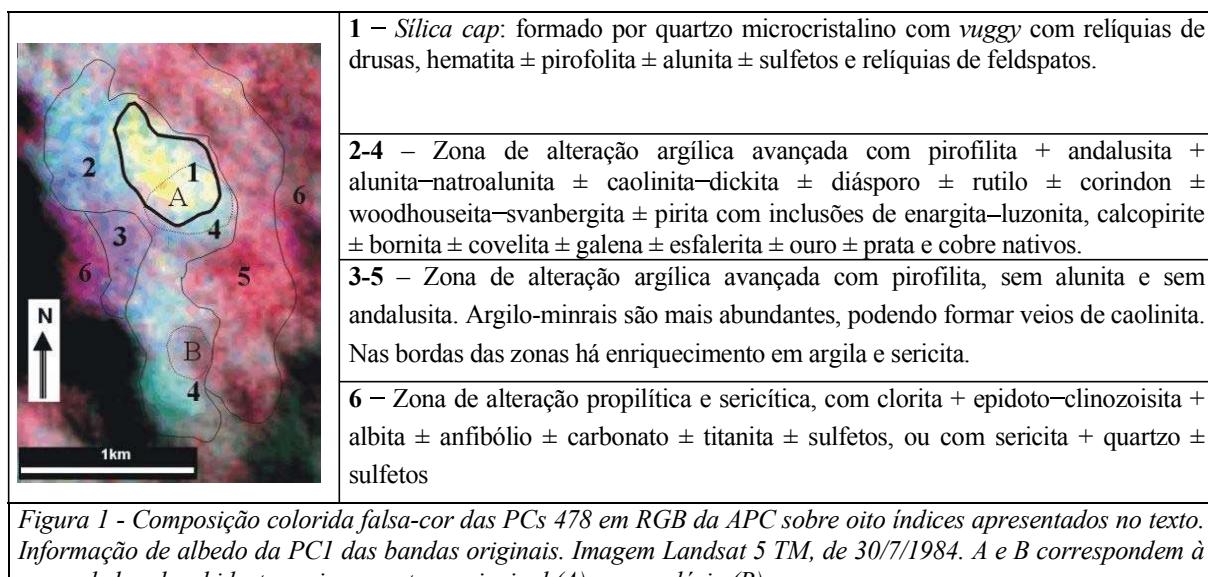


Figura 1 - Composição colorida falsa-cor das PCs 478 em RGB da APC sobre oito índices apresentados no texto. Informação de albedo da PC1 das bandas originais. Imagem Landsat 5 TM, de 30/7/1984. A e B correspondem à zonas de brechas hidrotermais na cratera principal (A) e secundária (B).

É importante observar que a topografia, na Figura 1, não se relaciona com a resposta espectral, pois o topo do platô, onde foram coletadas as amostras, é apenas ondulado. A resposta também não pode ser associada a diferentes tipos de vulcânicas, pois local ocorrem praticamente somente ignimbritos e riolitos. De fato, a análise de respostas similares na região mostra uma notável concordância com os litotipos hidrotermais e com a geomorfologia. A distribuição espacial geologicamente lógica das respostas tonais e a associação com a geologia de uma área bem conhecida já são indicativos fortes de uma efetiva associação de diferentes florestas com diferentes fácies de alteração.

Adicionalmente, outras áreas com resposta tonal similar são raras e ocorrem apenas em terrenos passíveis de estarem hidrotermalmente alterados e em associação à feições geomorfológicas de origem vulcânica.

Desta forma, a técnica adotada permitiu a identificação de anomalias geobotânicas que podem ser associadas à zonas de alteração hidrotermal, o que possibilita a sua aplicação na identificação de áreas potenciais para ocorrência de mineralizações *high-sulfidation* na PAT, em regiões onde o substrato geológico e os modelos metalogenéticos já estejam estabelecidos. Isto abre um grande potencial exploratório, por proporcionar uma redução de áreas para os levantamentos em campo, e a seleção de alvos potenciais para ocorrência de mineralizações com zonas de alteração hidrotermal expressiva que, potencialmente, podem ser também as mais ricas em metais.

## Referências

- Almeida, T.I.R. & Souza Filho, C.R., 2004. Principal component analysis applied to feature oriented band ratios of hyperspectral data: a tool for vegetation studies. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 5005–5023.
- Branco, F.C., Almeida, R.I.R., Souza Filho, C.R. (submetido, 2005) Proportional convolution filtering – a new technique for digital image enhancement. *Computers & Geosciences*.
- Dall'Agnol, R., Lafon, J.M., Macambira, M.J.B., 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian Craton: Geochronological and geochemical aspects. *Mineral. Petrol.* 50: 113–138.
- Drury, S. A. 2001. *Image Interpretation in Geology* (third edition). Nelson Thornes publisher, 290p.
- Juliani, C., Corrêa-Silva, R.H., Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Nunes, C.M.D., 2002. The Au–Granite Batalha system–Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brasil: Hydrothermal alteration and regional implications. *Precambrian Res.* 119, 225–256.
- Juliani, C., Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Corrêa-Silva, R.H., 2004. Paleoproterozoic epithermal high- and low-sulfidation and porphyry-related Au mineralizations in the Tapajós Gold Province, Brazil: exploration prospectives. *Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, Ouro Preto*. [CR-ROM].
- Juliani, C., Rye, R.O.; Nunes, C.M.D., Snee, L.W., Corrêa-Silva, R.H., Monteiro, L.V.S., Bettencourt, J.S., Neumann, R., Alcover Neto, A., 2005. Paleoproterozoic volcanic-hosted quartz–alunite epithermal deposits in the Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil. *Chemical Geology*, 215: 95–125.
- Klein, E.L.; Santos, R.A. dos; Fuzikawa, K.; Angelica, R.S., 2001. Hydrothermal fluid evolution and structural control of the Guarim gold mineralization, Tapajós Province, Amazonian Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, 36: 149–164.
- Lamarão, C.N.; Dall'Agnol, R.; Lafon, J.M.; Lima, E.F., 2002. Geology, geochemistry and Pb–Pb zircon geochronology of the paleoproterozoic magmatism of Vila Riozinho, Tapajós Gold Province, Amazonian Craton, Brazil. *Precambrian Research*, 119: 189–223.
- Nunes, C.M.D., 2001. Caracterização de um sistema epitermal high-sulfidation paleoproterozóico na Província Aurífera do Tapajós, Pará. *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Paradella, W.R., 1992. A GIS and a geobotanical investigation based on TM-Landsat and DEM for geological mapping in the tropical rain forest (Brazilian Amazon region). In: *IGARSS'92. Proceedings*, v. 1, pp. 631–633.
- Paradella, W.R., Silva, M.F.F. da, Rosa, N. de A., Kushigbor, C.A., 1994. A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of the Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil), based on digital TM data and DEM data. *International Journal of Remote Sensing*, 15(8): 1633–1648.
- Paradella, W.R., Santos, A.R. dos, Dall'Agnol, R., Pietsch, R.W., Sant'Anna, M.V., 1998. A geological investigation based on airborne (Sarex) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás Granite Area, Brazil. *Journal Canadien de Télédétection*, 24(4): 376–392.

- Riaza M.L., Martinez-Torres R., Ramon-Lluch J., Alonso P., 1998. Heras Evolution of equatorial vegetation communities mapped using Thematic Mapper images through a geographical information system (Guinea, Equatorial Africa). *International Journal of Remote Sensing* 19(1): 43–54.
- RADAMBRASIL, 1976. Folha SB.21 Tapajós: Levantamento de Recursos Naturais, DNPM, Rio de Janeiro, Vol. 9.
- Rowan, L.C., Crownley, J.K., Schimidt, R.G., Ager, C.M., Mars, J.C., 2000. Mapping hydrotermally altered rocks by analyzing hyperspectral image (AVIRIS) data of forested areas in the Southeastern United states. *Journal of Geochemical Exploration*, 68: 145–166.
- Santos, J.O.S., Groves, D.I., Hartmann, L.A., Moura, M.A., Mcnaughton, N.J., 2001. Gold deposits of the Tapajós and Alta Floresta Domains, Tapajós–Parima orogenic belt, Amazon Craton, Brazil. *Mineralium Deposita*, 36: 453–488.
- Svenning, J.C., 1999. Microhabitat specialization in a species-rich palm community in Amazonian Ecuador. *Journal of Ecology*, 87: 55–65.
- Tuomisto, H., Ruokolainen, K., Kalliola, R., Linna, A., Danjoy, W., Rodriguez, Z., 1995. Dissecting Amazonian Biodiversity. *Science*, 269: 63–66.
- Tuomisto, H., Ruokolainen, K., Aguilar, M., Sarmiento, A., 2003. Floristic patterns along a 43-km long transect in an Amazonian rain forest. *Journal of Ecology*, 91: 743–756.