

# IMPACTOS AMBIENTAIS DE CAVAS DE MINERAÇÃO: UMA REVISÃO

## ENVIRONMENTAL IMPACTS OF MINE PIT LAKES: A REVIEW

### Viníciu Fagundes Bárbara

Professor de ensino básico, técnico e tecnológico do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Goiânia (GO), Brasil.

### Maria Gizelda de Oliveira Tavares

Professora adjunta do Instituto de Química da Universidade Federal de Goiás (UFG) – Goiânia (GO), Brasil.

### Nelson Roberto Antoniosi Filho

Professor adjunto do Instituto de Química da UFG – Goiânia (GO), Brasil.

#### Endereço para correspondência:

Viníciu Fagundes Bárbara – Rua 75, 46 – Centro – CEP 74055-110 – Goiânia (GO), Brasil –  
E-mail: [viniciu.fagundes@ifg.edu.br](mailto:viniciu.fagundes@ifg.edu.br)

Recebido em: 31/08/2017

Aceito em: 10/07/2018

## RESUMO

As cavas são um problema ambiental emergente no mundo. Embora seus riscos ecológicos ainda sejam largamente desconhecidos dos pesquisadores, é sabido que podem se constituir em promissoras oportunidades de uso ou em preocupantes problemas ambientais. Este trabalho objetivou traçar um panorama dos enfoques investigativos dos principais estudos sobre lagos de mineração desenvolvidos internacionalmente (1979–2018). Para tanto, foi utilizado o conectivo “*pit lake*” na base de dados da CAPES para a seleção dos artigos analisados. Os resultados demonstraram que as informações científicas existentes sobre o tema ainda são incipientes, especialmente na América Latina, e que a maioria das pesquisas apresentam abordagem predominantemente limitada a aspectos geoquímicos. A gestão ambiental de cavas necessita ser interdisciplinar, o que a torna desafiadora. Um nicho investigativo identificado que poderá contribuir para o maior entendimento do assunto consiste no desenvolvimento de estudos embasados na combinação de aspectos químicos, ecotoxicológicos e genotoxicológicos, inexistentes até então.

**Palavras-chave:** áreas degradadas; lagos artificiais; gestão ambiental integrada.

## ABSTRACT

Pit lakes are an emerging environmental problem in the world. Although its ecological risks are still largely unknown by researchers, they can represent promising opportunities for use or worrying environmental problems. The objective of this work was to give an overview of the main research approaches on the subject of internationally developed mining lake (1979–2018). And for that, the term “*pit lake*” was used in the CAPES database to select the articles analyzed. The results showed that information related to pit lakes is incipient, especially in Latin America, and that most of the researches conducted to date have limited focus to geochemical approaches. The environmental management of these artificial spaces needs to be interdisciplinary, which makes it challenging. An area of research identified, though not yet developed and which may contribute to a better understanding of the subject, is the development of studies based on the combination of chemical, ecotoxicological and genotoxic aspects of the waters of the pit lakes, nonexistent until then.

**Keywords:** degraded areas; artificial lakes; integrated environmental management.

## INTRODUÇÃO

A indústria da mineração é conhecida por desencadear grandes impactos ambientais (IBRAM, 2013), como no caso da Barragem do Fundão (em Mariana, MG), rompida recentemente. O evento provocou a introdução de milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração no Rio Doce e no Oceano Atlântico, um cenário de degradação que levará décadas para ser revertido (LOPES, 2016).

Quando a exploração mineral é desenvolvida a céu aberto, são formadas cavas nas jazidas exauridas, normalmente preenchidas por influxos hídricos de origem subterrânea e pluvial (CÁNOVAS *et al.*, 2015; ANTUNES *et al.*, 2016). Esses lagos artificiais são um problema ambiental emergente e de intensificação recente em diversas partes do globo, notadamente em países africanos, na Austrália, nos Estados Unidos, no Canadá, no Chile, no Cazaquistão, no Irã, no México, no Peru, na Indonésia, nas Filipinas, na Papua-Nova Guiné e no Brasil. Na tentativa de compreenderem melhor os riscos que as cavas oferecem ao meio natural, apenas recentemente pesquisadores das Ciências Ambientais se atentaram para o problema (FERRARI *et al.*, 2015; MOLLEMA *et al.*, 2015; PEIFFER, 2016).

Ao longo do tempo, devido à intemperização geoquímica, as águas de cavas tendem a se alterar quimicamente, muitas vezes se tornando ácidas e enriquecidas com elementos químicos potencialmente tóxicos. Normalmente, isso ocorre devido ao processo de drenagem ácida de mina (DAM), desencadeado quando minerais sulfetados originalmente em condições de

equilíbrio são expostos às águas pluviais e ao ar, desprendendo um percolado ácido e rico em metais dissolvidos. A DAM se constitui em um dano ambiental de longo prazo comumente observado em jazidas de minerais nobres, especialmente ouro e prata (AYUSO *et al.*, 2013; DELGADO-MARTIN *et al.*, 2013). Segundo Luek *et al.* (2014), dependendo da qualidade hídrica, cavas podem se configurar em valiosos equipamentos de usos social e ambiental ou oferecer riscos aos seres vivos, como o Lago Berkeley (EUA), onde 340 gansos-da-neve (*Anser caerulescens*) morreram devido à intoxicação com metais presentes na água oriundos da mineração desativada (HBC, 1996).

Pelo fato de os lagos de mineração terem comportamento complexo, sua gestão se mostra desafiadora. Adicionalmente, os impactos advindos do pós-fechamento de minas, em especial de cavas, é um tema ainda pouco discutido no âmbito mundial devido ao fato de muitos empreendimentos não terem chegado à fase de desativação e também de a recuperação ambiental de áreas mineradas, quando realizada, ainda seguir práticas convencionais e pouco eficientes no sentido de evitar o surgimento de áreas contaminadas (HRDINKA *et al.*, 2013; SÁNCHEZ-ESPAÑA *et al.*, 2014). Portanto, este trabalho objetivou discutir os principais estudos sobre impactos ambientais de cavas a céu aberto desenvolvidos mundialmente, bem como explicitar nichos de pesquisa que poderão ser explorados pelos estudiosos das Ciências Ambientais na intenção de contribuir para o aumento da compreensão a respeito do tema.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Realizou-se um levantamento dos artigos sobre cavas publicados internacionalmente ao longo dos últimos 39 anos. Para tanto, foi utilizada a opção “Busca avançada” do Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), disponível em <http://www-periodicos-capes-gov-br.ez49.periodicos.capes.gov.br/>, que engloba dezenas de bases de dados de periódicos, incluindo Web of Science, Scopus e Elsevier. O levantamento contemplou artigos publicados entre 1º de janeiro de 1979 e 1º de julho de 2018.

Os trabalhos foram selecionados mediante o uso do conectivo “*pit lake*” no campo “Assunto”. Adicionalmente, com

o uso da opção “Expandir meus resultados”, o sistema automaticamente sugeriu a inserção de outros 19 conectivos, utilizados para ampliar o escopo da busca: “*mining*”, “*lakes*”, “*surface mining*”, “*open-pit mining*”, “*mines*”, “*environmental geology*”, “*pollution*”, “*geochemistry*”, “*surface water*”, “*water quality*”, “*metals*”, “*hydrochemistry*”, “*pH*”, “*acid mine drainage*”, “*freshwater*”, “*sediments*”, “*sulfates*”, “*iron*” e “*groundwater*”.

Os artigos identificados pelo sistema foram então submetidos a uma avaliação prévia de título, resumo e palavras-chave, visando identificar quais trabalhos realmente abordaram os impactos ambientais de cavas

de mineração a céu aberto. Uma vez selecionadas, as publicações de interesse foram lidas na íntegra, analisadas, fichadas, classificadas e agrupadas em seis categorias, com o objetivo de facilitar as discussões dos resultados obtidos — Química Ambiental (QA), Remediação Ambiental (RA), Passivo Ambiental (PA), Modelagem Ambiental (MA), Toxicidade Ambiental (TA)

e Planejamento Ambiental (PL) —, estabelecidas com base nos respectivos objetivos e aspectos metodológicos predominantes de cada estudo (BARDIN, 1977). Portanto, o trabalho consistiu em uma pesquisa exploratória descritiva, desenvolvida mediante avaliações de ordem qualitativa fundamentadas na utilização de elementos quantitativos organizados (LAKATOS, 2010).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento preliminar na base de dados da CAPES resultou em 301 ocorrências. Desse total, foram selecionados e analisados 75 artigos que realmente tinham ligação com o tema. O Quadro 1 relaciona os trabalhos triados, incluindo a ordem cronológica das publica-

ções, o país onde o estudo foi desenvolvido e a respectiva categoria de enquadramento. Na sequência, são apresentados os aspectos mais relevantes das principais pesquisas enquadradas em cada um dos grupos de análise.

**Quadro 1 – Trabalhos que embasaram a elaboração do presente artigo, incluindo as categorias de enquadramento.**

Autor/país	Área de estudo	Categoria	Autor	Área de estudo	Categoria
Davis e Ashenberg (1989)	EUA	QA	Servida <i>et al.</i> (2009)	Itália	PA
Jhanwar (1996)	Índia	PL	Robles-Arenas e Candela (2010)	Espanha	MA
Levy <i>et al.</i> (1997)	EUA	RA	Romero <i>et al.</i> (2010)	Cuba	PA
Hamblin <i>et al.</i> (1999)	EUA	MA	Schultze <i>et al.</i> (2010)	Alemanha	QA
Shevenell <i>et al.</i> (1999)	EUA	QA	Wendt-Potthoff <i>et al.</i> (2010)	Alemanha	RA
Savage <i>et al.</i> (2000)	EUA	PA	Xiao <i>et al.</i> (2010)	China	PA
Shevenell (2000)	EUA	QA	Aluma e Johnson (2011)	EUA	TA
Wisotzky e Obermann (2001)	Alemanha	RA	Czop <i>et al.</i> (2011)	Polônia	QA
Millu <i>et al.</i> (2002)	Romênia	PA	Radhakrishnan <i>et al.</i> (2011)	Austrália	RA
Çolak <i>et al.</i> (2003)	Turquia	PA	Moser e Weisse (2011)	Áustria	QA
Erg (2003)	Estônia	MA	Rocha <i>et al.</i> (2011)	Portugal	TA
Gammons <i>et al.</i> (2003)	EUA	QA	Rozon-Ramilo <i>et al.</i> (2011)	Canadá	TA
Ramstedt <i>et al.</i> (2003)	Suécia	QA	Edberg <i>et al.</i> (2012)	Suécia	QA
Brandenberger <i>et al.</i> (2004)	EUA	PA	Golestanifar e Ahangari (2012)	Irã	MA
Kohfahl e Pekdeger (2004)	Alemanha	MA	Koschorreck e Wendt-Potthoff (2012)	Alemanha	QA
Bowell e Parshley (2005)	EUA	QA	Marques <i>et al.</i> (2012)	Brasil	QA
Castendyk <i>et al.</i> (2005)	NZ	QA	Poerschmann <i>et al.</i> (2011)	Alemanha	QA

Continua...

Quadro 1 – Continuação.

Autor/país	Área de estudo	Categoria	Autor	Área de estudo	Categoria
Costa e Duarte (2005)	Portugal	RA	Rapantová <i>et al.</i> (2012)	RT	MA
Denimal <i>et al.</i> (2005)	França	QA	Santofimia <i>et al.</i> (2012)	FPI	QA
Hancock <i>et al.</i> (2005)	Austrália	MA	Ayuso <i>et al.</i> (2013)	EUA	PA
Hangen-Brodersen <i>et al.</i> (2005)	Alemanha	PL	Delgado-Martin <i>et al.</i> (2013)	Espanha	QA
Herzsprung <i>et al.</i> (2005)	Alemanha	QA	Gammons <i>et al.</i> (2013)	EUA	QA
Lottermoser <i>et al.</i> (2005)	Austrália	QA	Herlory <i>et al.</i> (2013)	França	TA
Pellicori <i>et al.</i> (2005)	EUA	QA	Hrdinka <i>et al.</i> (2013)	RT	QA
Balistreri <i>et al.</i> (2006)	EUA	MA	Skipperud <i>et al.</i> (2013)	Tajiquistão	TA
Fyson <i>et al.</i> (2006)	Alemanha	RA	Villain <i>et al.</i> (2013)	Suécia	RA
Kalin <i>et al.</i> (2006)	Canadá	RA	Xuan <i>et al.</i> (2013)	Vietnã	PA
Triantafyllidis e Skarpelis (2006)	Grécia	QA	Yucel e Baba (2013)	Turquia	QA
Antunes <i>et al.</i> (2007)	Portugal	TA	Grande <i>et al.</i> (2014)	Portugal	PL
Bozau <i>et al.</i> (2007)	Alemanha	RA	Luek <i>et al.</i> (2014)	Canadá	RA
Castendyk e Webster-Brown (2007)	NZ	MA	Sánchez-España <i>et al.</i> (2014)	Espanha	PL
Migaszewski <i>et al.</i> (2008)	Polônia	QA	Cánovas <i>et al.</i> (2015)	Espanha	QA
Panilas <i>et al.</i> (2008)	Grécia	MA	Ferrari <i>et al.</i> (2015)	Brasil	QA
Sánchez-España <i>et al.</i> (2008)	FPI	QA	Gagnaire <i>et al.</i> (2015)	França	TA
Geller <i>et al.</i> (2009)	Alemanha	RA	Mollema <i>et al.</i> (2015)	PB	QA
Monjezi <i>et al.</i> (2009)	Irã	PL	Antunes <i>et al.</i> (2016)	Portugal	RA
Neil <i>et al.</i> (2009)	Austrália	TA	Peiffer (2016)	Alemanha	MA
Ramalho <i>et al.</i> (2009)	Portugal	PL	-	-	-

EUA: Estados Unidos da América; NZ: Nova Zelândia; FPI: Faixa Piritosa Ibérica; RT: República Tcheca; PB: Países Baixos; QA: Química Ambiental; RA: Remediação Ambiental; PA: Passivo Ambiental; MA: Modelagem Ambiental; TA: Toxicidade Ambiental; PL: Planejamento Ambiental.

## Categoria química ambiental

As pesquisas enquadradas nesta categoria tiveram a geoquímica como foco principal, incluindo a qualidade hídrica, de solos, de rejeitos e de sedimentos de cavas. Estudos que relacionaram esses aspectos à estratificação química da água, à avaliação do potencial de geração de drenagem ácida de mina, à formação e à mobilidade de substâncias tóxicas e à presença de microrganismos na água também foram agrupados nela.

O levantamento demonstrou que a grande maioria das pesquisas analisadas apresentou abordagem predominante em análises geoquímicas de áreas mineradas. Em termos históricos, o primeiro estudo publicado internacionalmente envolvendo impactos ambientais de uma cava foi o de Davis e Ashenberg (1989), que avaliaram o perfil químico das águas ácidas do Lago Berkeley, nos Estados Unidos da América (EUA), uma

das maiores e mais icônicas bacias de mineração do mundo. Com 542 metros de profundidade, o lago foi paulatinamente tomado por águas subterrâneas após o encerramento das atividades de exploração de cobre. Os referidos autores analisaram a qualidade hídrica da cava e fizeram simulações para definição de processos de neutralização e diminuição da distribuição de metais na coluna líquida mediante a introdução de rejeitos alcalinos. O mesmo lago foi objeto de dois outros estudos publicados posteriormente, de Gammons *et al.* (2003) e de Pellicori *et al.* (2005). Os três grupos de autores identificaram preocupantes índices de contaminação hídrica por metais potencialmente tóxicos nas águas do referido lago.

Bowell e Parshley (2005) analisaram a composição e o grau de influência de minerais sobre a qualidade das águas da Mina Getchell, no estado de Nevada, nos Estados Unidos. Ensaios de lixiviação demonstraram que os elementos presentes na parede da rocha, por serem altamente reativos às intempéries, se constituíam em importantes fontes de acidez e metais, pois exerciam forte controle geológico sobre as águas daquele lago durante suas fases iniciais de enchimento. Por sua vez, Sánchez-España *et al.* (2008) analisaram características químicas e limnológicas das águas de pelo menos 22 lagos localizados na Faixa Piritosa Ibérica, inundados entre os anos 1960 e 1990 e não estudados com base em uma perspectiva científica até aquele momento. A pesquisa também identificou um controle significativo dos processos geoquímicos locais sobre a qualidade das águas das cavas, ácidas e ricas em metais tóxicos, levando os autores a concluir que os lagos se constituíam em fontes potenciais permanentes de drenagem de mina para os recursos naturais próximos.

Alguns estudos de caráter geoquímico foram desenvolvidos com a finalidade de avaliar se as águas acumuladas em cavas poderiam ser utilizadas para outros fins, principalmente como possíveis fontes de abastecimento. Shevenell *et al.* (1999) pesquisaram pelo menos 16 minas a céu aberto localizadas nos Estados Unidos, mediante a combinação de informações geoquímicas que objetivaram prever se as futuras condições de qualidade hídrica seriam prejudiciais ou favoráveis a outros usos. No geral, a pesquisa comprovou que as águas dos lagos apresentavam qualidade satisfatória, com pH neutro e baixas concentrações de metais, embora temporalmente pudessem ser esperadas elevações nas concentrações de elementos como ferro e

manganês nas colunas hídricas, principalmente devido às características geológicas, hidrológicas e climáticas locais, fatores dominantes da evolução da química da água. Nos Países Baixos, Mollema *et al.* (2015) buscaram identificar a origem dos processos que conduziam a elevação das concentrações de metais nos sedimentos do Lago Lange Vlieter, utilizado para acúmulo de água potável. Apesar das vantagens principalmente econômicas que justificavam a escolha da cava como alternativa de abastecimento, como sua pré-existência e a distância relativamente pequena de transporte da água, o estudo alertou para o fato de que lagos de mineração tendem a se tornar pontos de acumulação de metais, sendo necessária a realização de uma gestão segura no sentido de se garantir temporalmente a qualidade hídrica e evitar, assim, prejuízos a usos futuros.

Outros trabalhos enquadrados nesta categoria analisaram aspectos geoquímicos diversificados, como o de Schultze *et al.* (2010), que investigaram algumas das 140 minerações a céu aberto da Alemanha, exploradas desde o século XIX e preenchidas com águas subterrâneas e dos Rios Saale, Weisse Elster, Mulde e Selke. Um dos objetivos do estudo foi comprovar se a introdução de águas superficiais em cavas era uma alternativa viável para garantir a qualidade hídrica futura. Os resultados demonstraram que os processos de oxidação da pirita foram controlados com sucesso na maioria dos lagos devido à introdução de águas externas, havendo pouco risco de eutrofização, contaminação por poluentes industriais e desenvolvimento de patógenos advindos das águas fluviais.

Apenas duas pesquisas envolvendo cavas brasileiras foram identificadas no levantamento. O primeiro, desenvolvido por Marques *et al.* (2012), avaliou a influência química sazonal das águas de quatro lagos de mineração na qualidade hídrica subterrânea da bacia sedimentar da região de Sepetiba, no Rio de Janeiro, importante fonte de extração de areia para construção civil desse estado e reconhecidamente o principal passivo ambiental da região. Por sua vez, Ferrari *et al.* (2015) pesquisaram o recém-formado Lago Osamu Utsumi, localizado em Poços de Caldas, Minas Gerais, de onde era extraído urânio. O estudo consistiu na caracterização química e da comunidade zooplanctônica da cava, tendo apresentado como uma das suas principais conclusões a necessidade de realização de testes ecotoxicológicos para avaliação dos efeitos de estressores químicos sobre organismos-teste identificados.

## Categoria remediação ambiental

Foram enquadradas nesta categoria as pesquisas que avaliaram propostas de alternativas de tratamentos de rejeitos, efluentes e águas de cavas, bem como soluções de remediação e redução da geração de drenagem ácida de mina. Levy *et al.* (1997), por exemplo, pesquisaram a mina abandonada de Spenceville, na Califórnia (EUA), aterrada com toneladas de resíduos de mineração como medida de proteção do meio natural local. Efluentes de colunas filtrantes preenchidas com esse material e expostas a amostras de drenagem ácida de mina foram analisados. Uma das conclusões consistiu no alerta a respeito da importância da escolha correta dos rejeitos minerais a serem empregados em ações de recuperação, pois danos ainda maiores podem ser desencadeados na busca pela proteção ambiental. Por sua vez, Wisotzky e Obermann (2001) apresentaram cálculos geoquímicos para a determinação da concentração média da pirita advinda dos depósitos de cavas de mineração, visando ao estabelecimento de valores médios de referência para a determinação da quantidade de aditivos necessários à neutralização de descargas minerais e, conseqüentemente, à garantia da manutenção da qualidade das águas subterrâneas. Também foi considerada a adição de pedra calcária triturada e cinzas como alternativas para a diminuição dos possíveis efeitos químicos sobre a água. Os cálculos hidrogeoquímicos associados aos experimentos laboratoriais demonstraram viabilidade de diminuição dos riscos de poluição hídrica.

Costa e Duarte (2005) estudaram a viabilidade de um novo processo de biorremediação para o tratamento da drenagem ácida da mina portuguesa de São Domingos. Para tanto, biorreatores de coluna de leito fixo

## Categoria passivo ambiental

Estudos que mensuraram o grau de contaminação ambiental de complexos minerais visando ao gerenciamento de áreas contaminadas foram incluídos nesta categoria. Savage *et al.* (2000) e Çolak *et al.* (2003) pesquisaram os níveis de contaminação por arsênio em mineração dos Estados Unidos e da Turquia, respectivamente. Os primeiros analisaram o grau de comprometimento ambiental do Distrito Mineral Mother Lode mediante a análise da geoquímica do elemento, presente em altas concentrações nas águas superficiais e subterrâneas locais. Para tanto, coletaram amostras de

combinados com lactose, uma fonte de carbono complementar, foram utilizados para avaliar a eficiência de um processo simples e semicontínuo embasado no uso de esgoto, lodo anaeróbio e solo ácido advindo da área de mineração. Os resultados foram satisfatórios em relação à precipitação dos principais metais dissolvidos, à redução dos teores de sulfato e à neutralização da DAM. De forma semelhante e na busca por alternativas de remediação inovadoras, economicamente viáveis e ambientalmente aceitáveis, Fyson *et al.* (2006) desenvolveram um método de remoção de acidez das águas de lagos de mineração localizados na região de Lausitz, na Alemanha, onde há dezenas de cavas formadas devido à exploração de lignito. Experimentos laboratoriais de eutrofização controlada que objetivavam melhorar a ciclagem de elementos e os processos de geração de alcalinidade de águas e sedimentos foram desenvolvidos. Embora a adição de nutrientes tenha levado ao aumento da produção primária algal, não ocorreu a remoção da acidez, alcançada apenas na presença de sedimentos e com a adição de batatas, importantes fontes de nutrientes como carbono e fósforo. Por sua vez, Bozau *et al.* (2007) desenvolveram um trabalho de remediação biotecnológica do Lago RL111, explorado pela indústria mineral alemã entre os anos de 1923 e 1958. Os autores instalaram *in loco* uma torre preenchida com palha e *carbokalk*, um subproduto da indústria de açúcar de beterraba. Protótipos do experimento também foram montados em laboratório. Entre outros aspectos, a pesquisa demonstrou que as taxas de redução do sulfato medido em condições controladas não foram alcançadas no trabalho realizado em campo, limitando o sucesso da remediação, e que outros fatores poderiam aumentar o tempo do tratamento.

diversos ambientes minerados caracterizados por diferentes modos de interação rocha-água, influenciadores do transporte do arsênio, como afloramentos, rochas, pilhas de rejeitos e as cavas propriamente ditas. Os autores constataram influências sazonais marcantes nas concentrações de arsênio na área, fato que os levou a alertarem sobre a necessidade de consideração desses efeitos durante o planejamento do uso do solo na região. O segundo grupo de pesquisadores mensuraram o passivo ambiental formado em uma antiga mina a céu aberto de borato, onde pessoas do entorno foram

diagnosticadas com sintomas de intoxicação. O estudo consistiu na análise de amostras de solo e águas superficiais e subterrâneas advindas de uma rede amostral estrategicamente distribuída na área, tendo identificado um grave cenário de contaminação ambiental local por arsênio.

A contaminação de recursos hídricos situados a jusante da maior mina a céu aberto de cobre da Romênia, a Rosia Poieni, foi investigada por Millu *et al.* (2002). A pesquisa identificou que a DAM se mostrava ativa na área e, por intermédio do intemperismo, liberava elevadas concentrações de elementos tóxicos no meio ambiente, como alumínio, ferro, cobre, zinco, chumbo, arsênio e irídio, impacto que deverá perdurar por pelo menos 50 anos, demandando monitoramento contínuo. Na Itália, Servida *et al.* (2009) dividiram a área estudada em uma malha amostral uniforme para a caracterização química de águas e solos. Constataram concentrações de alguns metais acima dos limites legais, bem como potencial de geração de DAM em mais de 50% das amostras. Por sua vez, Romero *et al.* (2010) publicaram um trabalho desenvolvido na mina inativa de Santa Lúcia, em Cuba, cujo objetivo foi desenvolver uma estratégia de gestão eficaz para prevenir danos à vida selvagem e aos recursos naturais locais. Análises geoquímicas e mineralógicas foram desenvolvidas com enfoque na mobilida-

### **Categoria modelagem ambiental**

Os estudos enquadrados nesta categoria utilizaram modelos matemáticos de sistemas ambientais para simular e auxiliar na compreensão dos comportamentos do meio, tais como hidrodinâmica, estratificação térmica e qualidade das águas de cavas, como o desenvolvido por Erg (2003), que aplicou um modelo conceitual de fluxo hídrico subterrâneo para prever possíveis alterações químicas ocasionadas por atividades de mineração que pudessem prejudicar usos locais, principais fontes de abastecimento da população do Nordeste da Estônia. Os autores concluíram que o efeito combinado de fatores antrópicos e naturais refletiu na elevação dos teores de sulfato nas águas subterrâneas, tendência que deve perdurar durante anos após o encerramento das atividades de mineração.

Kohfahl e Pekdeger (2004) utilizaram o Programa Sapy para antever condições geoquímicas associadas à Mina Lohsa, na Alemanha. Simularam cenários de longo

de de elementos tóxicos e na possível contaminação dos corpos hídricos superficiais da região. Identificaram sinais da presença de contaminantes em águas superficiais coletadas a centenas de metros a jusante da mina, embora também tenha ficado comprovada a atenuação natural das concentrações desses elementos ao longo do corpo hídrico analisado.

Os trabalhos mais recentes identificados foram os de Ayuso *et al.* (2013) e Xuan *et al.* (2013). Os primeiros estudaram a mina de Callahan, situada no litoral dos Estados Unidos, para delinear a extensão de uma possível contaminação, uma vez que a cava existente é inundada diariamente pelas marés desde o ano de 1972, o que possibilitou a oportunidade única de avaliação dos impactos de uma mineração no ambiente estuarino. Os resultados demonstraram que a contaminação é um legado de longo prazo na região e apresenta reflexos significativos em organismos marítimos. Os demais pesquisadores publicaram a primeira pesquisa sobre avaliação de contaminação ambiental em uma área de mineração do Vietnã. Resíduos e rejeitos da mina a céu aberto do depósito de Cay Cham foram analisados com o objetivo de verificar seus respectivos potenciais de geração de drenagem ácida de mina e, conseqüentemente, de contaminação ambiental. Observaram elevadas concentrações de zinco, níquel, cobre e manganês, elementos oriundos da DAM.

prazo de qualidade da água a fim de embasar possíveis estratégias de gestão dos recursos hídricos subterrâneos locais frente aos impactos pós-mineração. Hancock *et al.* (2005) pesquisaram o balanço de massa para calcular o volume de água e as cargas de sal de uma mina localizada no Vale Hunter, na Austrália, onde haviam outras 22 unidades em operação e muitas previstas para iniciarem suas atividades. A pesquisa consistiu no desenvolvimento de simulações de longo prazo a fim de prever riscos associados à qualidade da água de minerações a céu aberto e embasar opções de gestão. Nos Estados Unidos, Balistrieri *et al.* (2006) pesquisaram o ciclo sazonal de temperatura e salinidade do Lago Dexter com o auxílio do modelo unidimensional Dyresm. De forma geral, os resultados demonstraram que o sistema computacional foi apropriado para a compreensão do comportamento da cava e que sua hidrologia e geoquímica não são tão complexas como a de outros lagos artificiais.

Rapantová *et al.* (2012) estudaram uma mina da República Tcheca por intermédio de modelagem espacial e temporal dos efeitos do rebaixamento hídrico sobre as condições hidrogeológicas locais, onde ocorrem nascentes termais protegidas que, no passado, irrompe-

### Categoria toxicidade ambiental

Os trabalhos envolvendo a toxicidade ambiental de elementos advindos de áreas mineradas são pouco numerosos e recentes. Historicamente, o primeiro estudo identificado foi o de Antunes *et al.* (2007), que mensuraram o grau de comprometimento ambiental de uma mina portuguesa de urânio por intermédio de ensaios de água e sedimentos de uma cava utilizando algas, crustáceos e dípteros como organismos-teste. Dois anos depois, Neil *et al.* (2009) publicaram uma pesquisa de análise da efetividade do tratamento de águas de um lago de mina da Austrália formado após mais de cem anos de exploração de carvão, tendo concluído que os bioensaios são ferramentas indispensáveis para uma melhor compreensão do grau de toxicidade das substâncias testadas.

Rozon-Ramilo *et al.* (2011) analisaram a toxicidade de pelo menos três efluentes de mineração com bioensaios crônicos associados a análises histológicas de órgãos de peixes, possibilitando a caracterização das vias de exposição e o potencial de toxicidade das substâncias de interesse. No mesmo ano, Rocha *et al.* (2011) publicaram um estudo de toxicidade de frações solúveis de solos afetados por atividades industriais e de minerações portuguesas com o objetivo de compreender melhor os impactos antrópicos sobre os ecossistemas aquáticos locais. Para tanto, utilizaram bactérias marinhas, microalgas e microcrustáceos como organismos-teste. De forma semelhante, o potencial de toxicidade da drenagem ácida de uma mineração localizada em Ohio (EUA) foi analisado ecotoxicologicamente por Aluma e Johnson (2011), mediante bioensaio realizado com exemplares de *Daphnia magna* em estágio inicial de desenvolvimento. O método empregado também

### Categoria planejamento ambiental

Os trabalhos enquadrados nesta categoria objetivaram diagnosticar diferentes impactos de áreas de mineração mediante o estabelecimento de uma base de

ram na área da mina, limitando os métodos de mineração empregados. Os resultados demonstraram que não deverão ser observados impactos significativos da atividade de exploração sobre as fontes termais no longo prazo.

se mostrou uma boa ferramenta de avaliação de riscos ambientais associados a drenagens de mina.

Skipperud *et al.* (2013) pesquisaram a biomagnificação de contaminantes advindos de uma mineração de urânio em peixes mediante a análise histológica de órgãos específicos. A área estudada foi a de Taboshar, no Tajiquistão, onde se localiza uma antiga mina utilizada pelo programa de armas nucleares da União Soviética que gerou cerca de 35 milhões de metros cúbicos de resíduos radioativos e levou à formação de um grande lago artificial onde foram introduzidos peixes para consumo da população do entorno. Além de exemplares da ictiofauna, outros organismos locais foram capturados para análise, como caracóis e musgos. Os autores comprovaram concentrações alarmantes de contaminantes nas espécies estudadas.

Os impactos de minerações francesas sobre as águas do Rio Ritort foram estudados por Herlory *et al.* (2013) por intermédio da análise do potencial bioindicador de comunidades de diatomáceas perífíticas. Durante sete meses, as condições das microalgas presentes no rio foram monitoradas, tendo sido observadas alterações ambientais significativas provocadas pelas atividades de mineração. Finalmente, o estudo mais recente que abordou aspectos da toxicidade ambiental associada a atividades de mineração foi o desenvolvido por Gagnaire *et al.* (2015). Peixes da espécie *Rutilus rutilus* foram confinados em águas de duas lagoas, uma delas, a Pontabrier, contaminada por urânio. Aspectos físico-químicos das águas e dos sedimentos e a bioacumulação de metais nos organismos-teste foram determinados durante os ensaios. A metodologia aplicada na pesquisa possibilitou obter resultados satisfatórios de avaliação dos efeitos de poluentes em ecossistemas aquáticos.

informações a ser utilizada principalmente para fins de planejamento ambiental. No único estudo sobre cavas desenvolvido na Índia identificado no presente

levantamento, Jhanwar (1996) utilizou o sensoriamento remoto para avaliar o grau de interferência de uma atividade de mineração no meio natural local, tendo identificado intervenções profundas em florestas nativas, topografia e drenagem. Com objetivo mais amplo, Grande *et al.* (2014) inventariaram minas existentes em Portugal em uma base cartográfica. A área estudada vem sendo minerada há pelo menos 2000 anos e possui cerca de 90 minas abandonadas formadoras de uma rede difusa de efluentes de mineração. Os pesquisadores estimaram que a contaminação causada por drenagens ácidas já atingiu quase 5000 ha.

Hangen-Brodersen *et al.* (2005) desenvolveram pesquisa para fornecer subsídios ao planejamento ambiental de áreas de mineração da Alemanha, especialmente em relação à qualidade das águas de cavas que seriam desativadas. Por sua vez, Ramalho *et al.* (2009) apli-

### Considerações gerais

As quase quatro décadas de publicações contempladas neste levantamento bibliográfico demonstram que, em termos de distribuição espacial, a maior parte das pesquisas sobre impactos ambientais de cavas foi desenvolvida em países do Hemisfério Norte, notadamente naqueles localizados na Europa (43 artigos: 57,24% do total) e na América do Norte (17 artigos: 22,66%), regiões que respondem por praticamente 80,00% dos trabalhos analisados (Tabela 1).

A América Latina, por exemplo, apesar de contar com algumas das nações com maior potencial de exploração de minérios do mundo, ainda se mostra carente de pesquisas sobre o tema. Há um déficit considerável de estudos especializados principalmente em regiões compostas de

caram métodos geofísicos para avaliação da possibilidade de antigas cavas receberem resíduos de minas adjacentes de forma ambientalmente segura. Os resultados indicaram a necessidade de estabelecimento de um programa detalhado de impermeabilização de áreas críticas para que problemas de drenagem fossem minimizados ou superados, permitindo a instalação de depósitos seguros de resíduos. Por sua vez, Monjezi *et al.* (2009) utilizaram o Método Folchi para avaliar os impactos ambientais de quatro minas iranianas, tendo observado que o meio natural local se mostrava mais suscetível aos efeitos da mina Sarcheshmeh. Recentemente, Sánchez-España *et al.* (2014) buscaram compreender a história da inundação, a evolução limnológica e a dinâmica hidrológica de um complexo sistema de minas da Espanha. Os resultados obtidos serão úteis especialmente para a concepção de futuros planos de fechamento de minas.

países emergentes, especialmente no Brasil, que ainda não possui um levantamento sistematizado dos lagos de mineração existentes em seu território e não dispõe de legislações de disciplinamento específico. Uma possível explicação para a elevada discrepância geográfica de trabalhos sobre cavas no globo é que os países localizados no Hemisfério Norte, em geral, apresentam maior tradição na exploração mineral, pois se industrializaram antes que os do Sul. Consequentemente, aquelas nações se depararam primeiro com os impactos do setor, o que as estimulou a desenvolverem pesquisas há mais tempo. Adicionalmente, é sabido que há maior aporte de recursos financeiros para estudos em países desenvolvidos, favorecendo o desenvolvimento de trabalhos nessa área.

**Tabela 1 – Distribuição dos artigos por região do mundo.**

Região	Número de artigos	Porcentagem (%)
Europa	43	57,24
América do Norte	17	22,66
Oceania	6	7,55
Ásia	5	6,67
América Central	2	2,94
América do Sul	2	2,94

Outra constatação é que as pesquisas sobre os impactos ambientais de cavas são relativamente recentes, tendo em vista que o primeiro artigo foi publicado apenas em 1989. Apesar da escassez de trabalhos sobre o assunto reconhecida por diversos autores (PELLICORI *et al.*, 2005; SÁNCHEZ-ESPAÑA *et al.*, 2008; VILLAIN *et al.*, 2013) e comprovada por este levantamento, estudos ligados ao tema estão aumentando temporalmente, conforme pode ser visualizado na Figura 1.

Verificou-se que a busca por métodos para melhor compreender os impactos ambientais de lagos de mineração é um esforço ainda tímido por parte dos pesquisadores das Ciências Ambientais em nível mundial, refletindo em pouco conhecimento acumulado. Dado o entendimento recente das cavas como problemas ambientais emergentes, os esforços científicos ainda necessitam avançar significativamente para a consolidação de mais informações sobre o tema.

Em relação às categorias de análise, o levantamento demonstrou que a maioria dos estudos analisados se limitou, metodologicamente, à avaliação de aspectos químicos de áreas mineradas (Figura 2).

Naturalmente, a avaliação ambiental contemplando aspectos químicos é necessária, porém limitada, pois retrata apenas estados instantâneos de qualidade am-

biental, não sendo capaz de mensurar, por exemplo, os possíveis efeitos da ação biológica de contaminantes de interesse sobre organismos específicos. Isso porque cavas de mineração, especialmente suas águas, tendem a apresentar variabilidade de diversos aspectos que interagem entre si mediante processos químicos, físicos e biológicos associados:

- a mecanismos de condicionamento geológico — interação rocha-água-ar;
- à sazonalidade;
- ao tempo.

Assim, considerando o grau de complexidade dos impactos ambientais potenciais dessas unidades de origem antrópica, muitas vezes a simples determinação química não é suficiente para possibilitar conclusões mais amplas. Adicionalmente, ainda que as concentrações de determinados analitos de interesse ambiental se apresentem inferiores aos valores legais máximos permitidos, seus efeitos tóxicos sinérgicos podem resultar em prejuízos ambientais significativos quando interagem entre si na coluna d'água (HERLORY *et al.*, 2013; GAGNAIRE *et al.*, 2015).

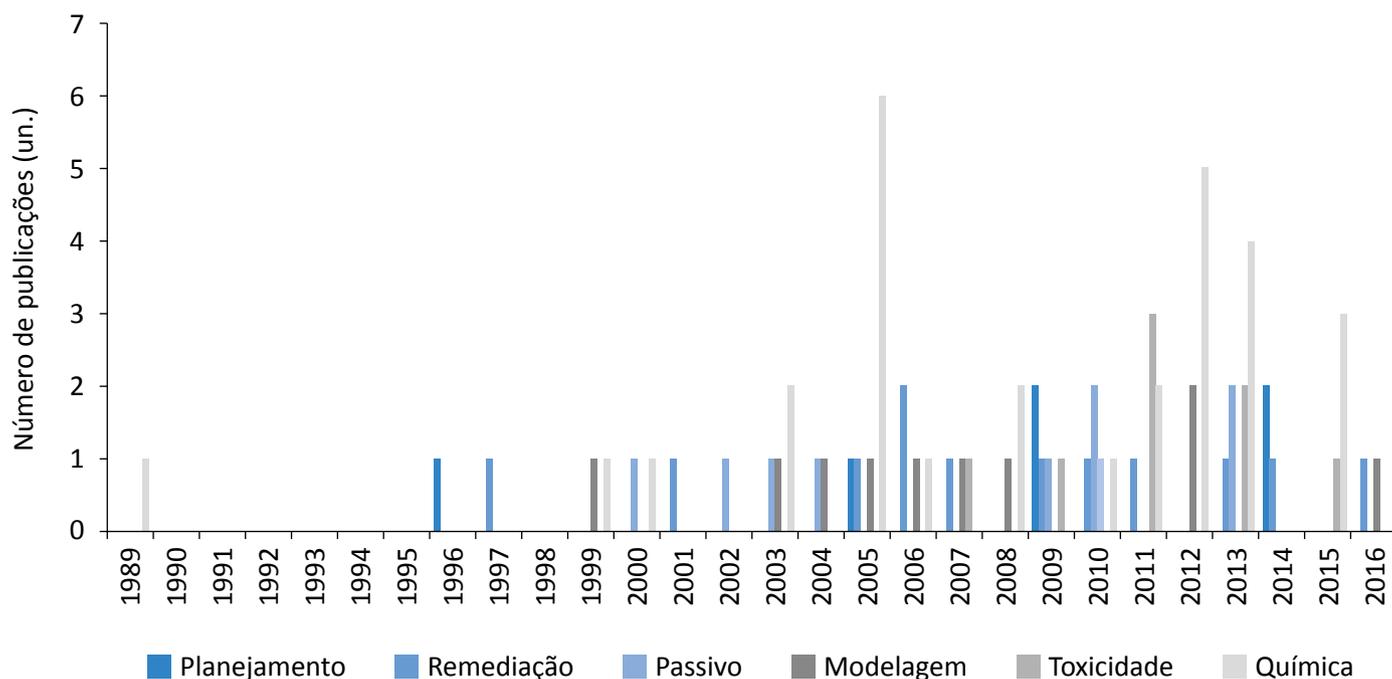


Figura 1 – Distribuição dos artigos por categoria de análise e ano de publicação.

Não obstante o exposto, a experiência acumulada até então demonstra o consenso entre os pesquisadores de que cavas apresentam comportamento complexo e, conseqüentemente, gestão ambiental desafiadora quando comparada à de outros recursos naturais, como recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Enquanto esses dois últimos podem ser gerenciados apenas com base em padrões metodológicos tradicionais de controle e monitoramento ambiental — como a abordagem exclusivamente química —, cavas, por sua natureza ambientalmente variada, exigem abordagens embasadas em critérios que possibilitem uma visão ambiental sistêmica, integrada. Requerem, portanto, abordagens metodológicas interdisciplinares.

Um exemplo de avaliação ambiental integrada de lagos de mineração consiste no desenvolvimento de metodologias investigativas embasadas na associação entre Química e Ecotoxicologia, ciências complementares entre si. Análises ecotoxicológicas agregam mais elementos às avaliações ambientais, pois permitem mensurar os efeitos deletérios potenciais de diversas substâncias químicas sobre o comportamento de organismos-teste padronizados mediante exposições agudas ou crônicas.

Adicionalmente, possibilitam avaliar a evolução temporal dos efeitos tóxicos de elementos químicos de interesse sobre os espécimes expostos. Todavia, apesar de as duas ciências se encontrarem consolidadas há décadas, o levantamento demonstrou que trabalhos com esse enfoque metodológico ainda são raros e muito recentes para lagos de mineração (COSTA & DUARTE, 2005; ROCHA *et al.*, 2011).

Finalmente, considerando que as substâncias químicas presentes em cavas também podem manifestar seus efeitos de forma discreta, a ponto de não serem visualmente perceptíveis em ensaios ecotoxicológicos, entende-se que os princípios da Genotoxicologia Ambiental também devem ser empregados na busca pelo entendimento do comportamento de tais unidades, uma vez que análises genéticas possibilitam o desenvolvimento de abordagens capazes de detectar alterações orgânicas em nível celular nos organismos expostos. Entretanto, investigações científicas centradas na análise dos mecanismos de ação de químicos tóxicos de cavas mediante abordagens mais completas, que busquem avaliar, por exemplo, alterações orgânicas em nível celular por intermédio de abordagens genotoxicológicas combinadas com aspectos ecotoxicológicos e químicos, são desconhecidas.

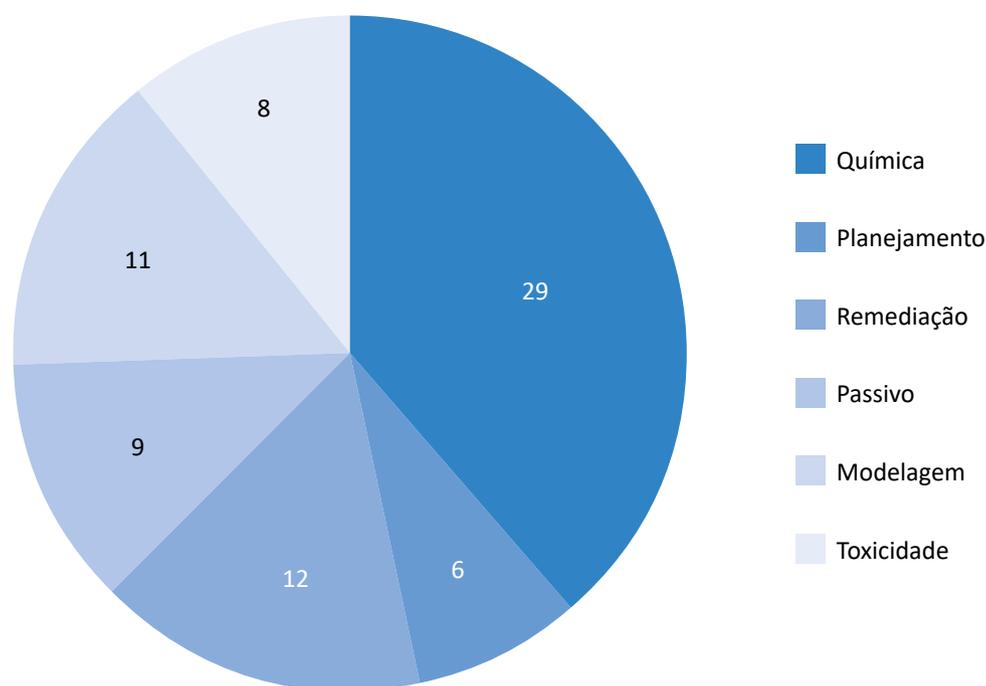


Figura 2 – Distribuição das quantidades de publicações por categoria de análise.

## CONCLUSÕES

A proposta deste estudo foi buscar compreender como cavas e seus impactos ambientais vêm sendo tratados pela comunidade científica internacional ao longo das últimas décadas. Verificou-se que o conhecimento acumulado sobre o tema ainda é incipiente no mundo, tendo em vista o reduzido número de trabalhos publicados, especialmente no Hemisfério Sul. Adicionalmente, a maior parte (39%) dos estudos desenvolvidos até então apresentam abordagem predominante em aspectos geoquímicos de lagos de mineração, importantes, porém limitados frente à complexidade dos impactos ambientais desencadeados.

Do ponto de vista da sustentabilidade, cavas demandam medidas gerenciais diferenciadas que necessitam estar embasadas em investigações amplas e suficien-

temente capazes de abranger o sinergismo dos seus processos químicos, físicos e biológicos associados aos fatores dominantes da evolução da qualidade hídrica. Por outro lado, para que os pesquisadores ampliem o entendimento do problema de forma condizente com suas especificidades ambientais, é necessária a obtenção de respostas — de controle e monitoramento ambiental — que vão além das abordagens tradicionais, normalmente aplicadas de maneira isolada. Nesse sentido, novos trabalhos constituídos de questões de pesquisa, objetivos e metodologias investigativas que contemplem avaliações integradas de aspectos químicos, ecotoxicológicos e genotoxicológicos de cavas, por exemplo, se configuram como oportunidades científicas que futuramente poderão ser desenvolvidas pelos estudiosos das Ciências Ambientais.

## REFERÊNCIAS

- ALUMA, E.; JOHNSON, K. Short communication: a 24 hour ecotoxicity test for acid mine drainage using hatching success in *Daphnia magna*. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, v. 15, p. 231-234, 2011. <http://dx.doi.org/10.4314/jasem.v15i1.65704>
- ANTUNES, I. M. H. R.; GOMES, M. E. P.; NEIVA, A. M. R.; CARVALHO, P. C. S.; SANTOS, A. C. T. Potential risk assessment in stream sediments, soils and waters after remediation in an abandoned W4Sn mine (NE Portugal). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 133, p. 135-145. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.045>
- ANTUNES, S. C.; FIGUEIREDO, D. R.; MARQUES, S. M.; CASTRO, B. B.; PEREIRA, R.; GONÇALVES, F. Evaluation of water column and sediment toxicity from an abandoned uranium mine using a battery of bioassays. *Science of the Total Environment*, v. 374, p. 252-259, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.11.025>
- AYUSO, R. A.; FOLEY, N. K.; SEAL II, R. R.; BOVE, M.; CIVITILLO, D.; COSENZA, A.; GREZZI, G. Lead isotope evidence for metal dispersal at the Callahan Cu-Zn-Pb mine: goose pond tidal estuary, Maine, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 126-127, p. 1-22, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.12.013>
- BALISTRIERI, L. S.; TEMPEL, R. N.; STILLINGS, L. L.; SHEVENELL, L. A. Modeling spatial and temporal variations in the temperature and salinity during stratification and overturn in Dexter pit lake, Tuscarora, Nevada, USA. *Applied Geochemistry*, v. 21, p. 1184-1203, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2006.03.013>
- BARDIN, I. *Análise de conteúdo*. Lisboa, Portugal: Edições 70, 1977.
- BOWELL, R. J.; PARSHLEY, J. V. Control of pit-lake water chemistry by secondary minerals, Summer Camp pit, Getchell mine, Nevada. *Chemical Geology*, v. 215, p. 373-385, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.052>
- BOZAU, E.; BECHSTEDT, T.; FRIESE, K.; FRÖMMICHEN, R.; HERZSPRUNG, P.; KOSCHORRECK, M.; MEIER, J.; VÖLKNER, C.; WENDT-POTTHOFF, K.; WIEPRECHT, M.; GELLER, W. Biotechnological remediation of an acidic pit lake: modelling the basic processes in a mesocosm experiment. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 92, p. 212-221, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2006.08.007>

BRANDENBERGER, J.; LOUCHOUARN, P.; HERBERT, B.; TISSOT, P. Geochemical and hydrodynamic controls on arsenic and trace metal cycling in a seasonally stratified US sub-tropical reservoir. *Applied Geochemistry*, v. 19, p. 1601-1623, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.02.006>

CÁNOVAS, C. R.; PEIFFER, S.; MACÍAS, F.; OLÍAS, M.; MIGUEL NIETO, J. Geochemical processes in a highly acidic pit lake of the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Chemical Geology*, v. 395, p. 144-153, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2014.12.007>

CASTENDYK, D. N.; MAUK, J. L.; WEBSTER, J. G. A mineral quantification method for wall rocks at open pit mines, and application to the Martha Au-Ag mine, Waihi, New Zealand. *Applied Geochemistry*, v. 20, p. 135-156, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.07.001>

CASTENDYK, D. N.; WEBSTER-BROWN, J. G. Sensitivity analyses in pit lake prediction, Martha mine, New Zealand 2: geochemistry, water-rock reactions, and surface adsorption. *Chemical Geology*, v. 244, p. 56-73, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.06.005>

ÇOLAC, M.; GEMICI, Ü.; TARCAN, G. The effects of colemanite deposits on the arsenic concentrations of soil and groundwater in Igdeköy-Emet, Kütahya, Turkey. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 149, p. 127-143, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1025642331692>

COSTA, M. C.; DUARTE, J. C. Bioremediation of acid mine drainage using acidic soil and organic wastes for promoting sulphate-reducing bacteria activity on a column reactor. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 165, p. 325-345, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-6914-7>

CZOP, M.; MOTYKA, J.; SRACEK, O.; SZUWARZYNSKI, M. Geochemistry of the hyperalkaline Gorka pit lake (pH>13) in the Chrzanow region, southern Poland. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 214, p. 423-434, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0433-x>

DAVIS, A.; ASHENBERG, D. The aqueous geochemistry of the Berkeley Pit, Butte, Montana, U.S.A. *Applied Geochemistry*, v. 4, p. 23-36, 1989. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(89\)90056-5](https://doi.org/10.1016/0883-2927(89)90056-5)

DELGADO-MARTIN, J.; JUNCOSA-RIVERA, R.; FALCÓN-SUÁREZ, I.; CANAL-VILA, J. Four years of continuous monitoring of the Meirama end-pit lake and its impact in the definition of future uses. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 20, p. 7520-7533, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1618-9>

DENIMAL, S.; BERTRAND, C.; MUDRY, J.; PAQUETTE, Y.; HOCHART, M.; STEINMANN, M. Evolution of the aqueous geochemistry of mine pit lakes – Blanzey-Montceau-les-Mines coal basin (massif central, France): origin of sulfate contents; effects of stratification on water quality. *Applied Geochemistry*, v. 20, p. 825-839, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2004.11.015>

EDBERG, F.; ANDERSSON, A. F.; HOLMSTRÖM, S. J. M. Bacterial community composition in the water column of a lake formed by a former uranium open pit mine. *Microbial Ecology*, v. 64, p. 870-880, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00248-012-0069-z>

ERG, K. Sulphate balance of lakes and shallow groundwater in the Vasavere Buried valley, northeast Estonia. *Oil Shale*, v. 20, p. 477-489, 2003.

FERRARI, C. R.; AZEVEDO, H.; WISNIEWSKI, M. J. S.; RODGHER, S.; ROQUE, C. V.; NASCIMENTO, M. R. L. An overview of an acidic uranium mine pit lake (Caldas, Brazil): composition of the zooplankton community and limnochemical aspects. *Mine Water and the Environment*, v. 34, p. 230-242, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-015-0333-9>

FYSON, A.; NIXDORF, B.; KALIN, M. The acidic lignite pit lakes of Germany – microcosm experiments on acidity removal through controlled eutrophication. *Ecological Engineering*, v. 28, p. 288-295, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.06.012>

- GAGNAIRE, B.; BADO-NILLES, A.; BETOUILLE, S.; AMARA, R.; CAMILLERI, V.; CAVALIÉ, I.; CHADILI, E.; DELAHAUT, L.; KERAMBRUN, E.; ORJOLLET, D.; PALLUEL, O.; SANCHEZ, W. Former uranium mine-induced effects in caged roach: a multiparametric approach for the evaluation on in situ metal toxicity. *Ecotoxicology*, v. 24, p. 215-231, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10646-014-1374-8>
- GAMMONS, C. H.; PAPE, B. L.; PARKER, S. R.; POULSON, S. R.; BLANK, C. E. Geochemistry, water balance, and stable isotopes of a “clean” pit lake at an abandoned tungsten mine, Montana, USA. *Applied Geochemistry*, v. 36, p. 57-69, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.06.011>
- GAMMONS, C. H.; WOOD, S. A.; JONAS, J. P.; MADISON, J. P. Geochemistry of the rare-earth elements and uranium in the acidic Berkeley pit lake, Butte, Montana. *Chemical Geology*, v. 198, p. 269-288, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00034-2)
- GELLER, W.; KOSCHORRECK, M.; WENDT-POTTHOFF, K.; BOZAU, E.; HERZSPRUNG, P.; BÜTTNER, O.; SCHULTZE, M. A pilot-scale field experiment for the microbial neutralization of a holomictic acidic pit lake. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 100, p. 153-159, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.04.003>
- GOLESTANIFAR, M.; AHANGARI, K. Choosing an optimal groundwater lowering technique for open pit mines. *Mine Water and the Environment*, v. 31, p. 192-198, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10230-012-0196-2>
- GRANDE, J. A.; VALENTE, T.; DE LA TORRE, M. L.; SANTISTEBAN, M.; CERÓN, J. C.; PÉREZ-OSTALÉ, E. Characterization of acid mine drainage sources in the Iberian Pyrite Belt: base methodology for quantifying affected areas and for environmental management. *Environmental Earth Science*, v. 71, p. 2729-2738, 2014. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2652-0>
- HAGLER BAILLY CONSULTING (HBC). Clark fork River NPL sites NRDA, Lethal injuries to snow geese, Berkeley pit, Butte, MT. HBC, 1996.
- HAMBLIN, P. F.; STEVENS, P. E. C.; LAWRENCE, G. A. Simulation of vertical transport in mining pit lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, p. 1029-1038, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:10\(1029\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:10(1029))
- HANCOCK, G. R.; WRIGHT, A.; DE SILVA, H. Long-term final void salinity prediction for a post-mining landscape in the Hunter Valley, New South Wales, Australia. *Hydrological Processes*, v. 19, p. 387-401, 2005. <https://doi.org/10.1002/hyp.5538>
- HANGEN-BRODERSEN, C.; STREMPER, P.; GRÜNEWALD, U. Characteristics of catchments disturbed by lignite mining — case study of Schlabendorf/Seese (Germany). *Ecological Engineering*, v. 24, p. 37-48, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2004.12.005>
- HERLORY, O.; BONZOM, J. M.; GILBIN, R.; FRELON, S.; FAYOLLE, S.; DELMAS, F.; COSTE, M. Use of diatom assemblages as biomonitor of the impact of treated uranium mining effluent discharge on a stream: case study of the ritord watershed (center-west France). *Ecotoxicology*, v. 22, p. 1186-1199, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10646-013-1106-5>
- HERZSPRUNG, P.; DUFFEK, A.; FRIESE, K.; RECHTER, M.; SCHULTZE, M.; TÜMPLING JUNIOR, W. V. Modification of a continuous flow method for analysis of trace amounts of nitrate in iron-rich sediment pore-waters of mine pit lakes. *Water Research*, v. 39, p. 1887-1895, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.02.017>
- HRDINKA, T.; SOBR, M.; FOTT, J.; NEDBALOVÁ, L. The unique environment of the most acidified permanently meromictic lake in the Czech Republic. *Limnologia*, v. 43, p. 417-426, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.limno.2013.01.005>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Gestão para a sustentabilidade na mineração*. Brasília: IBRAM, 2013.
- JHANWAR, M. L. Application of remote sensing for environmental monitoring in Bijolia mining area of Rajasthan. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 24, p. 255-264, 1996. <https://doi.org/10.1007/BF03026233>

- KALIN, M.; WHEELER, W. N.; OLAVESON, M. M. Response of phytoplankton to ecological engineering remediation of a Canadian shield lake affected by acid mine drainage. *Ecological Engineering*, v. 28, p. 296-310, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.08.010>
- KOHFAHL, C.; PEKDEGER, A. Modelling the long-term release of sulphate from dump sediments of an abandoned open pit lignite lake. *Mine Water and the Environment*, v. 23, p. 12-19, 2004. <https://doi.org/10.1007/s10230-004-0031-5>
- KOSCHORRECK, M.; WENDT-POTTHOFF, K. A sediment exchange experiment to assess the limiting factors of microbial sulfate reduction in acidic mine pit lakes. *Journal Soils Sediments*, v. 12, p. 1615-1622, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0547-4>
- LAKATOS, E. V. *Fundamentos de metodologia científica*. São Paulo: Atlas, 2010.
- LEVY, D. B.; CUSTIS, K. H.; CASEY, W. H.; ROCK, P. A. A comparison of metal attenuation in mine residue and overburden material from an abandoned copper mine. *Applied Geochemistry*, v. 12, p. 203-211, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(96\)00064-9](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(96)00064-9)
- LOPES, L. M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. *Sinapse Múltipla*, v. 5, p. 1-14, 2016.
- LOTTERMOSER, B. G.; ASHLEY, P. M.; COSTELLOE, M. T. Contaminant dispersion at the rehabilitated Mary Kathleen uranium mine, Australia. *Environmental Geology*, v. 48, p. 748-761, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0014-2>
- LUEK, A.; BROCK, C.; ROWAN, D. J.; RASMUSSEN, J. B. A simplified anaerobic bioreactor for the treatment of selenium-laden discharges from non-acidic, end-pit lakes. *Mine Water and the Environment*, v. 33, p. 295-306, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10230-014-0296-2>
- MARQUES, E. D.; TUBBS, D.; GOMES, O. V. O.; SILVA-FILHO, E. V. Influence of acid sand pit lakes in surrounding groundwater chemistry, Sepetiba sedimentary basin, Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 112, p. 306-321, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.10.002>
- MIGASZEWSKI, Z. M.; GALUSZKA, A.; HALAS, S.; DOLEGOWSKA, S.; DABEK, J.; STARNAWSKA, E. Geochemistry and stable sulfur and oxygen isotope ratios of the Podwisniówka pit pond water generated by acid mine drainage (Holy Cross Mountains, south-central Poland). *Applied Geochemistry*, v. 23, p. 3620-3634, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.09.001>
- MILLU, V.; LEROY, J. L.; PEIFFERT, C. Water contamination downstream from a copper mine in the Apuseni mountains, Romania. *Environmental Geology*, v. 42, p. 773-782, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0580-5>
- MOLLEMA, P. N.; STUYFZAND, P. J.; JUHÁSZ-HOLTERMAN, M. H. A.; VAN DIEPENBEEK, P. M. J. A.; ANTONELLINI, M. Metal accumulation in an artificially recharged gravel pit lake used for drinking water supply. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 150, p. 35-51, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.12.004>
- MONJEZI, M.; SHAHRIAR, K.; DEHGHANI, H.; NAMIN, F. S. Environmental impact assessment of open pit mining in Iran. *Environmental Geology*, v. 58, p. 205-216, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1509-4>
- MOSER, M.; WEISSE, T. The most acidified Austrian lake in comparison to a neutralized mining lake. *Limnologica*, v. 41, p. 303-315, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2011.01.002>
- NEIL, L. L.; MCCULLOUGH, C. D.; LUND, M. A.; EVANS, L. H.; TSVETNENKO, Y. Toxicity of acid mine pit lake water remediated with limestone and phosphorus. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 72, p. 2046-2057, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.08.013>
- PANILAS, S.; PETALAS, C. P.; GEMITZI, A. The possible hydrologic effects of the proposed lignite open-cast mining in Drama lignite field, Greece. *Hydrological Processes*, v. 22, p. 1604-1617, 2008. <https://doi.org/10.1002/hyp.6729>

- PEIFFER, S. Reaction time scales for sulphate reduction in sediments of acidic pit lakes and its relation to in-lake acidity neutralization. *Applied Geochemistry*, v. 73, p. 8-12, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.07.009>
- PELLICORI, D. A.; GAMMONS, C. H.; POULSON, S. R. Geochemistry and stable isotope composition of the Berkeley pit lake and surrounding mine Waters, Butte, Montana. *Applied Geochemistry*, v. 20, p. 2116-2137, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.07.010>
- POERSCHMANN, J.; KOSCHORRECK, M.; GÓRECKI, T. Organic matter in sediments of an acidic mining lake as assessed by lipid analysis. Part I: fatty acids. *Science of the Total Environment*, v. 414, p. 614-623, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.015>
- RADHAKRISHNAN, N. K.; MCCULLOUGH, C. D.; LUND, M. A. How does storage affect the quality and quantity of organic carbon in sewage for use in the bioremediation of acidic mine waters? *Ecological Engineering*, v. 37, p. 1205-1213, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.021>
- RAMALHO, E.; CARVALHO, J.; BARBOSA, S.; SANTOS, F. A. M. Using geophysical methods to characterize an abandoned uranium mining site, Portugal. *Journal of Applied Geophysics*, v. 67, p. 14-33, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.08.010>
- RAMSTEDT, M.; CARLSSON, E.; LÖVGREN, L. Aqueous geochemistry in the Udden pit lake, northern Sweden. *Applied Geochemistry*, v. 18, p. 97-108, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00068-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00068-9)
- RAPANTOVÁ, N.; KRZESZOWSKI, S.; GRMELA, A.; WOLKERSDORFER, C. Quantitative assessment of mine water resources based on the general mixing equation and multivariate statistics. *Mine Water and the Environment*, v. 31, p. 252-265, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s10230-012-0192-6>
- ROBLES-ARENAS, V. M.; CANDELA, L. Hydrological conceptual model characterisation of an abandoned mine site in semiarid climate. The Sierra de Cartagena-La Unión (SE Spain). *Geologica Acta*, v. 8, p. 235-248, 2010. <http://dx.doi.org/10.1344/105.000001532>
- ROCHA, L.; RODRIGUES, S. M.; LOPES, I.; SOARES, A. M. V. M.; DUARTE, A. C.; PEREIRA, E. The water-soluble fraction of potentially toxic elements in contaminated soils: relationships between ecotoxicity, solubility and geochemical reactivity. *Chemosphere*, v. 84, p. 1495-1505, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.04.035>
- ROMERO, F. M.; PROL-LEDESMA, R. M.; CANET, C.; ALVARES, L. N.; PÉREZ-VÁZQUEZ, R. Acid drainage at inactive Santa Lucia mine, western Cuba: natural attenuation of arsenic, barium and lead, and geochemical behavior of rare earth elements. *Applied Geochemistry*, v. 25, p. 716-727, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.02.004>
- ROZON-RAMILO, L. D.; DUBÉ, M. G.; RICKWOOD, C. J.; NIYOGI, S. Examining the effects of metal mining mixtures on fathead minnow (*Pimephales promelas*) using field-based multi-trophic artificial streams. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 74, p. 1536-1547, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.05.005>
- SÁNCHEZ-ESPAÑA, J.; ERCILLA, M. D.; CERDAN, F. P.; YUSTA, I.; BOYCE, A. J. Hydrological investigation of a multi-stratified pit lake using radioactive and stable isotopes combined with hydrometric monitoring. *Journal of Hydrology*, v. 511, p. 494-508, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydrol.2014.02.003>
- SÁNCHEZ-ESPAÑA, J.; PAMO, E. L.; PASTOR, E. S.; ERCILLA, M. D. The acidic mine pit lakes of the Iberian Pyrite Belt: an approach to their physical limnology and hydrogeochemistry. *Applied Geochemistry*, v. 23, p. 1260-1287, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2007.12.036>
- SANTOFIMIA, E.; LÓPEZ-PAMO, E.; REYES, J. Changes in stratification and iron redox cycle of an acidic pit lake relation with climatic factors and physical processes. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 116-117, p. 40-50, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.03.004>

- SAVAGE, K. S.; BIRD, D. K.; ASHLEY, R. P. Legacy of the California Gold Rush: environmental geochemistry of arsenic in the southern Mother Lode Gold district. *International Geology Review*, v. 42, p. 385-415, 2000. <https://doi.org/10.1080/00206810009465089>
- SCHULTZE, M.; POKRANDT, K. H.; HILLE, W. Pit lakes of the central German lignite mining district: creation, morphometry and water quality aspects. *Limnologica*, v. 40, p. 148-155, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2009.11.006>
- SERVIDA, D.; GRIECO, G.; DE CAPITANI, L. Geochemical hazard evaluation of sulphide-rich iron mines: the rio Marina district (Elba Island, Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, v. 100, p. 75-89, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2008.03.005>
- SHEVENELL, L.; CONNORS, K. A.; HENRY, C. D. Controls on pit lake water quality at sixteen open-pit mines in Nevada. *Applied Geochemistry*, v. 14, p. 669-687, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(98\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00091-2)
- SHEVENELL, L. A. Water quality in pit lakes in disseminated gold deposits compared to two natural, terminal lakes in Nevada. *Environmental Geology*, v. 39, p. 807-815, 2000. <https://doi.org/10.1007/s002540050497>
- SKIPPERUD, L.; JØRGENSEN, A. G.; HEIER, L. S.; SALBU, B.; ROSSELAND, B. O. Po-210 and Pb-210 in water and fish Taboshar uranium mining pit lake, Tajikistan. *Journal of Environmental Radioactivity*, v. 123, p. 82-89, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.03.013>
- TRIANAFYLLIDIS, S.; SKARPELIS, N. Mineral formation in an acid pit lake from a high-sulfidation ore deposit: Kirki, NE Greece. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 88, p. 68-71, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.017>
- VILLAIN, L.; ALAKANGAS, L.; ÖHLANDER, B. The effects of backfilling and sealing the waste rock on water quality at the Kimheden open-pit mine, northern Sweden. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 134, p. 99-110, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.003>
- WENDT-POTTHOFF, K.; BOZAU, E.; FRÖMMICHEN, R.; MEIER, J.; KOSCHORRECK, M. Microbial iron reduction during passive in situ remediation of an acidic mine pit lake mesocosm. *Limnologica*, v. 40, p. 175-181, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2009.10.003>
- WISOTZKY, F.; OBERMANN, P. Acid mine groundwater in lignite overburden dumps and its prevention – the Rhineland lignite mining area (Germany). *Ecological Engineering*, v. 17, p. 115-123, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016%2FS0925-8574\(00\)00152-X](http://dx.doi.org/10.1016%2FS0925-8574(00)00152-X)
- XIAO, H. Y.; ZHOU, W. B.; ZENG, F. P.; WU, D. S. Water chemistry and heavy metal distribution in an AMD highly contaminated river. *Environmental Earth Science*, v. 59, p. 1023-1031, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0094-5>
- XUAN, P. T.; VAN PHO, N.; GAS'KOVA, O. L.; BORTNIKOVA, S. B. Geochemistry of surface waters in the vicinity of open pit mines at the Cay Cham Deposit, Thai Nguyen province, northern Vietnam. *Geochemistry International*, v. 51, p. 931-938, 2013. <https://doi.org/10.1134/S0016702913110062>
- YUCEL, D. S.; BABA, A. Geochemical characterization of acid mine lakes in northwest Turkey and their effect on the environment. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 64, p. 357-376, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00244-012-9843-7>

